

Universidade Federal do Rio de Janeiro

UMA HISTÓRIA DA INTERFEROMETRIA
NO SÉCULO XIX

Roberto Affonso Pimentel Júnior

2012



UFRJ

Uma História da Interferometria no Século XIX

Roberto Affonso Pimentel Júnior

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia (HCTE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

Orientador: Carlos Benevenuto Guisard Koehler

Rio de Janeiro

março de 2012

Uma História da Interferometria no Século XIX

Roberto Affonso Pimentel Júnior

Carlos Benevenuto Guisard Koehler

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia (HCTE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

Aprovada por:

Prof. Carlos Benevenuto Guisard Koehler (orientador)

Prof. André Massafferri

Prof. Angel Alberto Tagliaferri

Prof. Francisco Caruso Neto

Prof. José Carlos de Oliveira

Prof. José Cláudio Oliveira dos Reis

Prof. Ricardo Borges Barthem

Rio de Janeiro

março de 2012

Pimentel Júnior, Roberto Affonso.

Uma História da Interferometria no Século XIX/
Roberto Affonso Pimentel Júnior. – Rio de Janeiro: UFRJ/
HCTE, 2012.

xxxiii, 397 f.: il.; 30 cm.

Orientador: Carlos Benevenuto Guisard Koehler
Tese (doutorado) – UFRJ/ HCTE/ Programa de Pós-
graduação em História das Ciências e das Técnicas e
Epistemologia, 2012.

Referências Bibliográficas: f. 332-365.

1. Óptica. 2. Interferometria. 3. Interferômetro. 4.
História da Física. 5. Século XIX. I. Koehler, Carlos
Benevenuto Guisard. II. Universidade Federal do Rio de
Janeiro, Programa de Pós-graduação em História das Ciências
e das Técnicas e Epistemologia. III. Título.

Para a Maira e o já não tão pequeno Renato,
que interferem tão construtivamente na minha vida.

Acho que apenas quem já passou pelo processo de escrever e defender uma tese de doutorado pode aquilatar o quanto ela necessariamente deve a várias instituições e a um número enorme de pessoas que, em diferentes graus, momentos e instâncias, são relevantes para que o trabalho possa ser completado. Na impossibilidade de lembrar de todos os que me ajudaram de uma forma ou de outra, espero agradecer a alguns, pelo menos, na esperança de que minha memória não venha a cometer nenhum lapso grave.

O interesse pelo tema deve bastante a duas pessoas em particular: o professor Alberto Tagliaferri, que primeiro me apresentou à interferometria quando eu ainda era aluno de graduação em física na UFF, e a amiga Flavia Pedroza, que desbravou antes de mim essas searas da história da ciência, me apresentando ao programa de pós-graduação em história das ciências e das técnicas e epistemologia da UFRJ. À professora Penha Maria Cardozo Dias agradeço ter trazido meus pés de volta ao chão quando a ideia inicial de projeto de tese começava a fugir do razoável. Devo ainda a gerações de alunos e licenciandos do Colégio de Aplicação da UFRJ, minhas vítimas por anos e anos, o plantio e a adubação de meu interesse pela história da física – culminando com a crítica relativamente recente (por mim considerada elogio) de que o curso de física secundária que ali ministro estava se parecendo cada vez menos com um curso de física e cada vez mais com uma aula de história.

Ao longo de todo o projeto contei com o inestimável apoio de um grande número de professores, pesquisadores e colegas, que em inúmeras ocasiões contribuíram generosamente com seu talento e comentários relevantes, indicações ou empréstimo de referências específicas, críticas, apoio acadêmico ou simplesmente a mais sincera torcida positiva. Desta possivelmente imensa lista, não poderia deixar de mencionar os colegas “etéreos” de tantos encontros de bolso, em particular Leandro Guedes, Oscar Matsuura, e Tânia Camel, que me ajudaram em diversos pontos diferentes da tese. Também gostaria de registrar meu agradecimento a André Massafferri, Sebastião Dias Alves e Geraldo Cernicchiaro, do CBPF, Carlos Aguiar, Carlos Alberto Fellows, Ricardo França, Valente, Ronaldo e toda a turma do INMETRO, Lucas Hippolito, Peter Lawson, David DeVorkin, Jan Frercks, Ad Maas, Roberto Lalli, Andrew Butrica, Rebekah Higgitt e Lydia Patton, bem como a José Carlos de Oliveira, Ricardo Barthem, José Cláudio de Oliveira Reis e Francisco Caruso, que como membros da banca de qualificação contribuíram diretamente. É preciso registrar um obrigado especial ao professor e amigo Carlos Koehler, que, mais que um orientador, foi um parceiro ao longo do projeto.

Eu jamais teria tido tempo hábil para realizar o curso e a pesquisa concluída com esta tese não fosse a licença remunerada garantida pelo Colégio de Aplicação da UFRJ, e sou portanto grato aos meus colegas de trabalho por me terem concedido esta oportunidade. Os

esforços da direção da escola e dos professores Milton Flores, da reitoria, e Carlos Filgueiras, então coordenador do HCTE, foram também fundamentais para a concessão da bolsa de pesquisa que permitiu meu acesso a fontes originais importantes na França e na Holanda em 2009, bem como minha participação no 23º Congresso Internacional de História da Ciência e Tecnologia (ICHST), em Budapeste, na Hungria. Agradeço no mesmo sentido ao pessoal do setor de arquivos da *Académie des Sciences* francesa, através de sua diretora, a Sra. Florence Greffe, pelo acesso ao dossiê de Fizeau, bem como à Sra. Godelieve Bolten, do *Noords Holland Archief* em Haarlem, Holanda, pela gentileza com que preparou todo o material de meu interesse dos arquivos sobre Zeeman e Lorentz sob sua guarda. Devo à *National Science Foundation* dos Estados Unidos e ao pessoal da organização do encontro da *History of Science Society* de 2010 em Montréal, no Canadá, a minha participação no evento. Eu tampouco poderia ter participado de nenhum destes congressos sem a hospedagem gratuita e eventuais serviços de orientação e tradução generosamente providenciados por amigos como Silvana Silva Aras e Leandro, Eduardo Lucas, Sara Groenendijk, Simon e Britta Supp, Christian e Gitti Vogl, Miklós Bárczi e Don McIntyre.

Muitas referências foram obtidas pelo portal CAPES, mas gostaria de agradecer também ao trabalho dos bibliotecários anônimos que me orientaram quando das várias solicitações que realizei pelo COMUT. A Márcia Santos, ao menos, eu posso nomear.

Ao amigo Jandê Saavedra agradeço a ajuda com algumas das ilustrações.

Não apenas o tempo é importante para escrever uma tese, mas também o espaço: embora diferentes partes deste texto tenham sido escritas nos lugares mais inusitados, foi em boa parte graças à guarida providencial (por mais de dois anos!) na varanda da casa de minha sogra e à gentil acolhida que tive ao longo de muitas e muitas tardes pelo pessoal do Parque Municipal do Marapendi, no Recreio dos Bandeirantes, de cuja pequena e simpática biblioteca fui um hóspede frequente, que muito da tese foi escrito. Meu muito obrigado à Sra. Tania Jochen, diretora do parque, bem como ao Rodrigo, ao Vinicius, à Nathalia, à Amanda e à Priscila por toda a paciência – e por chamar minha atenção quando o vendedor de pães-doces trazia com sua bicicleta minha fundamental dose de glicose do meio da tarde.

Esta tese foi escrita em meio a percalços de naturezas muito distintas. Concluí-la teria sido inviável sem o suporte logístico de familiares e amigos, que tomaram para si em inúmeras ocasiões tarefas que deveriam ter sido minhas, desde ir buscar o Renato na escola até tomar conta dos gatos. Muito, muito obrigado a todos vocês.

À Maira, que pôs à minha disposição seu talento para a revisão final do texto, e incidentalmente é minha esposa, devo muito mais ainda.

“The past is a foreign country: they do things differently there.”

L. P. Hartley

“A good technique sometimes renders more service to science than the
elaboration of highly theoretical speculations.”

Claude Bernard

Resumo

Uma História da Interferometria no Século XIX

Roberto Affonso Pimentel Júnior

Carlos Benevenuto Guisard Koehler

Resumo da tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia (HCTE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

Este trabalho descreve a trajetória da interferometria no século XIX e início do século XX, mostrando o importante papel desempenhado pelas técnicas interferométricas na evolução das idéias da física do período.

Palavras-chave: Óptica, Interferometria, Interferômetro, História da Física, Século XIX.

Rio de Janeiro

março de 2012

Abstract

A History of Interferometry in the XIXth Century

Roberto Affonso Pimentel Júnior

Carlos Benevenuto Guisard Koehler

Abstract da tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia (HCTE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

This work describes the trajectory of interferometry in the XIXth century and beginning of the XXth, showing the important role played by interferometric techniques in the evolution of ideas in the physics of the period.

Keywords: Optics, Interferometry, Interferometer, History of Physics, XIXth Century.

Rio de Janeiro

March 2012

Sumário

Lista de ilustrações	xii
Lista de tabelas	xxix
Lista de abreviaturas	xxx
Lista de símbolos	xxxii
1 Introdução	1
1.1 O Ponto de Vista dos Interferômetros	1
1.2 Interferência e Interferometria	6
1.3 Dificuldades para uma História da Interferometria	12
1.4 Recorte Temático	16
1.5 Recorte Cronológico	20
1.6 Organização do Trabalho	22
2 O Contexto em que Surge a Interferometria	25
2.1 Os Anéis de Newton e a Questão das Cores <i>circa</i> 1800	25
2.2 O Mito do Debate Polarizado sobre a Natureza da Luz	33
2.3 <i>Checklist</i> de Fenômenos Ópticos	49
2.4 Revoluções	56
3 O Desenvolvimento da Técnica Interferométrica e o Triunfo da Teoria Ondulatória	57
3.1 O Surgimento da Técnica Interferométrica	57
3.2 As Montagens de Fresnel	65
3.3 Um por Todos e Todos pela Teoria Ondulatória da Luz	72
3.4 A Interferência da Luz Polarizada	75
3.5 A Entronização da Teoria Ondulatória da Luz	77

4 Medindo Índices de Refração	80
4.1 O Índice de Refração	80
4.2 O Duplo Tubo de Arago	86
4.3 O Interferômetro de Jamin	97
4.4 O Interferômetro de Mach-Zehnder	115
4.5 O Refratômetro de Rayleigh	122
5 O Problema do Éter	125
5.1 Como o Vento entre Árvores	125
5.2 A Luz como Onda Transversal e a Elasticidade do Éter	131
5.3 O Éter Parcialmente Arrastado	140
5.4 Stokes e o Éter Hidrodinâmico	150
6 O Arrasto no Laboratório	156
6.1 O Experimento de Fizeau de 1851	156
6.2 Os Experimentos de Babinet e de Hoek	170
6.3 A Repetição do Experimento de Fizeau por Michelson e Morley	176
6.4 A Repetição do Experimento de Fizeau por Zeeman	182
6.5 A Dedução Relativística do Coeficiente de Arrasto	188
6.6 Duas Outras Aplicações da Mesma Montagem	193
7 Tentando Medir o “Vento de Éter”	196
7.1 A Luz como Onda Eletromagnética	196
7.2 Hertz e os <i>Maxwellianos</i>	200
7.3 Michelson e o Vento de Éter	206
7.4 O Interferômetro de Michelson	225
7.5 A Base Empírica da Teoria da Relatividade	229
7.6 Rotações no Éter e o Interferômetro de Sagnac	253

8 Interferometria e Astronomia	258
8.1 Primeira Menção ao Possível Uso Astronômico da Interferometria	258
8.2 Primeiras Tentativas de Medir o Diâmetro de uma Estrela Interferometricamente	262
8.3 A Provável Reinvenção do Método Interferométrico por Michelson	266
8.4 A Análise do Método e os Testes Iniciais Feitos por Michelson	272
8.5 A Medição Interferométrica dos Diâmetros dos Satélites Galileanos	280
8.6 A Retomada do Interesse pela Medição do Diâmetro de Estrelas	285
8.7 A Medição Interferométrica da Separação entre Estrelas Binárias	289
8.8 A Medição Interferométrica do Diâmetro de α -Orionis (Betelgeuse)	293
9 Espectroscopia e Metrologia Interferométricas	297
9.1 Introdução	297
9.2 Espectroscopia após Michelson	303
9.3 A Redefinição do Metro em Termos Interferométricos	308
9.4 Interferometria de Feixes Múltiplos	315
10 Conclusão	323
10.1 A Evolução da Interferometria	323
10.2 Conclusão	329
Referências Bibliográficas	332
Referências Primárias	332
Referências Secundárias	352
Apêndice 1: Citações Originais	366

Lista de Ilustrações

Fig. 1.1 (p. 8) – Fotografia da superposição de duas ondas produzidas numa cuba de ondas. As regiões claras e escuras apresentam o tipo de periodicidade e distribuição semelhantes às franjas de interferência da luz (MICHELSON, 1928, encarte).

Fig. 1.2 (p. 10) – Fenda dupla de Young (HECHT, 1990, p. 340). A luz oriunda da fenda única à esquerda dá origem, após atravessar as fendas S_1 e S_2 , a um padrão de franjas claras e escuras correspondendo às direções em que ocorrem, respectivamente, interferência construtiva e destrutiva.

Fig. 2.1 (p. 27) – Anéis de Newton sob iluminação monocromática. A parte superior da figura busca reproduzir o sistema de anéis observado ao se olhar de cima para baixo através da lente convergente prensada sobre uma placa plana de vidro. A região central é escura, com regiões mais claras e mais escuras se sucedendo cada vez mais proximamente uma da outra em função da variação na espessura da fina camada de ar entre a lente e a placa. Regiões claras corresponderiam aos loci de fácil reflexão, enquanto as escuras às posições dos físi de fácil transmissão. (WESTFALL 1989, p. 59).

Fig. 2.2 (p. 46) – Desenho de Euler mostrando a propagação de uma sequência de pulsos (apud HAKFOORT, 1995, p. 99).

Fig. 2.3 (p. 47) – Raio de luz branca incidindo sobre uma superfície, segundo Euler. As diferentes cores presentes na luz branca estavam associadas a diferentes frequências presentes na sucessão de pulsos (apud HAKFOORT, 1995, p. 107).

Fig. 2.4 (p. 48) – Refração de um raio de luz de cor pura de um meio menos refringente para um meio mais refringente, na teoria de Euler (apud HAKFOORT, 1995, p. 102). As distâncias menores entre os pulsos no meio mais refringente se dão de forma a compensar exatamente a diminuição de velocidade e a manter a frequência (cor) do raio de luz a mesma.

Fig. 3.1 (p. 61) – Franjas de Grimaldi projetadas para além da sombra de um fio fino (MACH, 1926, p. 146). As franjas externas decorrem do efeito de difração nas bordas, mas as internas

decorrem da interferência da luz que chega de ambos os lados do fio.

Fig. 3.2 (p. 64) – Desenho de Young da interferência de ondas, onde A e B eram as fontes de ondulações (em fase) e os traços representavam as posições correspondendo aos intervalos dos comprimentos de onda (YOUNG, 1845).

Fig. 3.3 (p. 67) – Espelho duplo de Fresnel. As duas imagens (M e N) produzidas pelos espelhos colocados em ângulo muito obtuso equivalem às fendas na montagem de Young, e portanto estão em condições de interferência.

Fig. 3.4 (p. 68) – Biprisma de Fresnel (BORN e WOLF, 1991, p. 263). A refração de cada parte do feixe incidente no prisma com ângulo muito obtuso produz imagens que equivalem às fendas na montagem de Young, e portanto também estão em condições de interferência.

Fig. 3.5 (p. 69) – Meia-lentes de Billet (em cima) e montagem de Meslin (BORN e WOLF, 1991, pp. 263 e 264, respectivamente). Em cada caso cada metade da lente conjuga uma imagem ligeiramente deslocada da outra, produzindo interferência de forma análoga ao espelho duplo de Fresnel ou à fenda dupla de Young.

Fig. 3.6 (p. 71) – Espelho triplo de Fresnel. Um dos feixes interferentes (externo) sofria duas reflexões, enquanto o outro (interno) sofria apenas uma (MACH, 1926, p. 166).

Fig. 3.7 (p. 72) – Espelho de Lloyd. A placa G serviria para introduzir um atraso no feixe direto com o objetivo de trazer a franja central escura para o campo de visão (MACH, 1926, p. 166).

Fig. 3.8 (p. 75) – Franjas de Brewster. Raios que sofrem duas reflexões no interior da lâmina B (raio 1) terão uma diferença de percurso semelhante à de raios que sofrem três reflexões no interior da lâmina A (raio 2), e portanto interferirão. Não estão representadas na figura as diversas refrações em todas as interfaces, à guisa de clareza (WILLIAMS, 1950, p. 41).

Fig. 4.1 (p. 81) – Refração de um raio de luz na interface entre dois meios transparentes.

Fig. 4.2 (p. 82) – Método utilizado por Biot e Arago para a medição de índices de refração de

gases. O ponto O representa o centro do círculo de Borda utilizado para avaliar o ângulo (f) entre a luz direta e a refratada pelo prisma de gás. Conhecendo-se a , e_1 , e_2 e o índice de refração do vidro do prisma era possível calcular o índice de refração do gás em seu interior (HEILBRON, 1993, p. 62).

Fig. 4.3 (p. 94) – Tubo (ou “refratômetro diferencial”) de Arago para a medição da refração em ar brumoso – diagrama esquemático (em cima) e desenho técnico detalhado (em baixo). Note-se que as placas G que encerram o tubo estendem-se para o lado de maneira a compensar naturalmente o feixe interferente que atravessa o ar do laboratório (ARAGO, 1858h, p. 322).

Fig. 4.4 (p. 95) – Tubo de Arago para a medição da refração em ar brumoso – vista em perspectiva. Percebe-se melhor aqui a estrutura das placas compensadoras na saída do tubo e o semicírculo graduado que permitia a medição de suas inclinações (ARAGO, 1858h, p. 323).

Fig. 4.5 (p. 95) – Detalhes da montagem do tubo de Arago para a medição da refração em ar brumoso: fenda regulável para admissão da luz (esq.); maneira de introduzir o vapor no tubo (centro); tubos acessórios que podiam ser encaixados no tubo de Arago para a determinação do índice de refração de líquidos (dir.) (ARAGO, 1858h, pp. 324-325).

Fig. 4.6 (p. 99) – Interferômetro de Jamin (PRESTON, 1928, p. 227).

Fig. 4.7 (p. 101) – Interferômetro de Jamin (ZEHNDER, 1891, p. 275). A luz oriunda de O dá origem, na placa A, de fundo espelhado, aos raios a e b, que, recombinados (a_1 e b_1) após a reflexão na placa (gêmea) B, projetam no anteparo V um padrão de interferência.

Fig. 4.8 (p. 103) – Montagem de Jamin para determinação do índice de refração de gases. A luz oriunda de uma fenda colimadora em A (à esq. na figura) era separada em dois feixes, que atravessavam os tubos de 1 m de comprimento contendo os gases antes de serem direcionadas pelo espelho côncavo G para um espelho duplo de Fresnel. As franjas de interferência eram observada através da lupa L munida de uma mira de fio, e as placas de compensação estavam montadas à entrada dos tubos, sobre um goniômetro que permitia medir com exatidão sua inclinação (JAMIN, 1857, prancha III).

Fig. 4.9 (p. 107) – Montagem de Jamin para o estudo da variação do índice de refração da

água a diferentes pressões. A pressão da água em um dos tubos podia ser modificada adicionando-se ou retirando-se mercúrio do tubo manométrico a ele conectado. Em detalhe (em baixo) o sistema das placas compensadoras (JAMIN, 1858a, prancha I, à direita).

Fig. 4.10 (p. 110) – Montagem de Jamin para o estudo da refração da luz pelo vapor d'água. Note-se o mesmo sistema interferométrico da figura 4.7, com as placas espessas e as placas compensadoras. Um sistema específico munido de um aspirador K permitia fazer circular o ar através de um sistema de ressecção, e daí através de um dos tubos, a seguir por uma proveta grande preenchida por pedra pome calcinada e encharcada de água destilada, e finalmente pelo segundo tubo. O sistema podia ser invertido, duplicando o deslocamento das franjas, e a umidade do ar controlada quimicamente com diferentes soluções de ácido sulfúrico a temperaturas específicas (JAMIN, 1858a, pp. 178-179 e prancha I, à esquerda).

Fig. 4.11 (p. 115) – Refrator interferencial de Zehnder. A_1 e B_2 são placas finas de vidro, de faces paralelas, enquanto A_2 e B_1 correspondem a espelhos planos. Os quatro elementos são paralelos entre si. A luneta C permite a visualização das franjas (ZEHNDER, 1891, p. 278).

Fig. 4.12 (p. 116) – Refrator interferencial de Ludwig Mach (esq.). O anel basculante D permitia uma flexibilidade na orientação do feixe incidente. À direita, detalhe da mecânica fina do suporte das superfícies refletoras no refrator interferencial de Ludwig Mach, necessária para o alinhamento preciso do interferômetro (MACH, 1892, p. 90).

Fig. 4.13 – Interferômetro de Mach-Zehnder utilizado por Gale para a medição do índice de refração do ar entre 0 e 20 atm. Os tubos paralelos contendo o ar eram colocados ao longo dos feixes na horizontal da figura (GALE, 1902, p. 12).

Fig. 4.14 (p. 119) – Adaptação de um interferômetro de Mach-Zehnder para a leitura interferométrica de pequenas variações de pressão. M e M' são espelhos sobre a superfície livre do mercúrio na balança de pressão (BARUS, 1921, p. 3).

Fig. 4.15 (p. 120) – Diagrama esquemático da montagem de Barus com um diapasão (P-P') inserido num dos braços de um interferômetro de Mach-Zehnder para o estudo da compressão do ar em ondas sonoras (figura 69 no original). Abaixo, dois tipos diferentes de diapasão usados no estudo (67 e 68). Também foram utilizados tubos simples fechados em

uma das extremidades, ou abertos em ambos os lados (BARUS, 1921, p. 47).

Fig. 4.16 (p. 120) – Montagem de Barus para o estudo das vibrações na “placa telefônica” (alto-falante, p na figura) acoplado ao espelho m do interferômetro de Mach-Zehnder (BARUS, 1921, p. 55).

Fig. 4.17 (p. 121) – Conjugação da montagem para determinação da velocidade da luz através do espelho giratório com um interferômetro de Mach-Zehnder. O espelho rotatório mm, quando girado do ângulo adequado, em m'm', reflete a luz para um espelho auxiliar nn, produzindo dois sistemas de franjas distintos (BARUS, 1921, p. 66).

Fig. 4.18 (p. 121) – Conjugação de uma balança de torsão gravimétrica (parte inferior), na qual são instalados dois espelhos m e m', com um interferômetro de Mach-Zehnder (parte superior) (BARUS, 1921, p. 75).

Fig. 4.19 (p. 123) – Interferômetro de Haber e Löwe em visão lateral (acima) e superior (abaixo). À direita, visão frontal evidenciando a região inferior do campo de interferência das fendas ocupado pelos tubos L e G e pelas placas compensadoras (região tracejada) (HABER e LÖWE, 1910, p. 1394).

Fig. 4.20 (p. 123) – Interferômetro de Rayleigh em visão superior (em cima) e lateral (em baixo). A representa a fenda simples de entrada da luz no sistema, e C o sistema de fenda dupla. K e L são as placas compensadoras. A placa H na parte inferior da montagem, que se estendia à frente dos dois tubos, permitia ajustar a projeção do sistema de franjas auxiliar para que tangenciasse perfeitamente o sistema principal logo acima, vistos através da lente em R (WILLIAMS, 1950, p. 11).

Fig. 4.21 (p. 124) – Interferômetro de Rayleigh portátil Zeiss em visão superior (à esquerda) e lateral (à direita). O nicho B abrigava um conjunto constituído de lâmpada, lente colimadora e prisma redirecionador que inseria a luz lateralmente no sistema óptico. S representa o espelho ao final dos tubos. A observação era feita através da lupa em Ok (WILLIAMS, 1950, p. 13).

Fig. 5.1 (p. 130) – O fenômeno da aberração. Uma partícula luminosa oriunda de uma estrela ingressa no tubo de um telescópio em A (figura da esq.) e atinge o olho do observador em B'.

Para que isto aconteça, no entanto, o telescópio não pode estar apontado diretamente para a posição real da estrela, mas deve estar inclinado de um ângulo α na direção do movimento da Terra (e do telescópio) proporcional à relação v/c . Na figura da direita, como o efeito da aberração pode ser estimado a partir da variação percebida da posição da estrela ao longo do ano.

Fig. 5.2 (p. 142) – Experimento do prisma de Arago. Na posição A, às 6h da manhã, a Terra (e o prisma) tem uma velocidade translacional na direção da estrela na parte direita da figura. A velocidade da luz recebida dela deveria se somar à velocidade do prisma em sua direção, alterando ligeiramente o ângulo de refração se comparado com situação semelhante na posição B, às 18h, quando a luz da estrela da esquerda agora teria sua velocidade subtraída da velocidade translacional da Terra. Nenhuma alteração sistemática foi detectada, no entanto.

Fig. 5.3 (p. 148) – Um telescópio preenchido com água recebe um raio de luz de uma estrela S. A refração da luz pela água deveria alterar a posição de observação para R, porém o mesmo não ocorre devido à compensação causada pelo arrasto do éter pela água em movimento (PEDERSEN, 2000, p. 519-520).

Fig. 5.4 (p. 154) – Explicação de Stokes para o efeito de aberração da luz estelar a partir da progressiva inclinação das frentes de onda causadas pelo arrasto do éter pela Terra. As frentes de onda luminosas recebidas na Terra oriundas de S parecerão provenientes de J. O ângulo q é o ângulo de aberração. À direita, o que corresponderia à trajetória do “raio” luminoso (WILSON, 1972, p. 65).

Fig. 5.5 (p. 154) – Ilustração original de Stokes para o efeito de aberração da luz causado pelo arrasto do éter pela Terra. Curiosamente, Stokes chamava a atenção para o fato de que, visto da Terra (E), um planeta (P) parecerá estar numa posição desviada de sua posição verdadeira, porém não apenas por causa do arrasto do éter pela Terra, mas também pelo arrasto do éter pelo próprio planeta, de modo que a trajetória do “raio” luminoso seria a descrita na parte de baixo da figura (STOKES, 1845, p. 13).

Fig. 6.1 (p. 159) – Diagrama do experimento de Fizeau do arrasto do éter de 1851 (MASCART, 1893).

Fig. 6.2 (p. 161) – Página do caderno de laboratório de Fizeau relativa a 18 de julho de 1851 com o rascunho da montagem óptica do experimento do arrasto do éter. Note-se o estudo (no alto) das possibilidades de redução da separação efetiva das fendas por reflexão e por refração, esta última sendo preferida por Fizeau. (ARCHIVES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES).

Fig. 6.3 (p. 162)– Ilustração dos detalhes do sistema hidráulico do experimento de Fizeau 1851. A abertura dos registros R e R' do reservatório de ar comprimido P empurrava violentamente o volume de água contido nos reservatórios nas extremidades dos tubos, permitindo um fluxo de água em grande velocidade, ainda que efêmero (MASCART, 1893).

Fig. 6.4 (p. 165) – Anotações do caderno de laboratório de Fizeau com a série de medidas dos deslocamentos de franjas para a velocidade de 7,059 m/s para o fluxo de água (ARCHIVES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES).

Fig. 6.5 (p. 171) – Diagrama da montagem experimental de Babinet de 1839 conforme compreendida por Frercks (FRERCKS, 2001, p. 86), em que a seta branca representa a direção e o sentido do movimento do éter em relação ao aparelho (ou vice-versa). O retângulo sólido M representa um volume de matéria refringente introduzido num dos braços do interferômetro, enquanto SP é o espelho colocado no foco da lente L_1 .

Fig. 6.6 (p. 174) – Esquema da montagem experimental inicial de Hoek de 1868, em que o interferômetro estava orientado na direção oeste–leste (e a seta portanto representa a velocidade da coluna de água em relação ao éter). O retângulo hachurado T representa a célula de água situada num dos braços do interferômetro, e MM um espelho no foco F_1 do telescópio da direita. Cópia à mão feita pelo autor a partir do original de Hoek (HOEK, 1868).

Fig. 6.7 (p. 180) – Esquema da montagem de Michelson e Morley para a repetição do experimento de Fizeau (5, em baixo). Outros detalhes mostram tubo de Pitot acoplado ao tubo de água para determinação da velocidade da água em diversos pontos (4), inserção em ângulo do fluxo de água nos tubos (3) e visão lateral (1) e superior (2) da instalação hidráulica (MICHELSON e MORLEY, 1886, p. 381).

Fig. 6.8 (p. 184) – Vistas lateral (em cima) e superior (em baixo) da montagem hidráulica de Zeeman para a medição do coeficiente de arrasto para diferentes comprimentos de onda. Zeeman foi especialmente metucioso na confecção das peças das janelas ópticas nas extremidades dos tubos visando uma maior uniformidade no fluxo de água (ZEEMAN, 1914, prancha em anexo).

Fig. 6.9 (p. 185) – Fotografias das franjas tiradas por Zeeman contrastando dois dos métodos por ele empregados para registrar os deslocamentos das franjas: miras de fio (em cima e no meio, comparando as franjas com a corrente de água num e noutro sentido) e máscaras para fotografias sobrepostas, em que a faixa horizontal central apresenta as posições das franjas para quando o fluxo estava no sentido oposto (em baixo) (ZEEMAN, 1915a, prancha em anexo).

Fig. 6.10 (p. 186) – Ajuste para a variação do coeficiente de Fresnel com o comprimento de onda, comparando os valores teóricos calculados a partir da expressão de Fresnel e de Lorentz com os valores experimentais, marcados “EXP” no gráfico (ZEEMAN, 1915a, p. 405).

Fig. 6.11 (p. 187) – Montagem para a medição do arrasto parcial em sólidos. Cilindros de vidro ou de quartzo eram colocados em movimento de vai-vém defasados ao longo da barra horizontal por um motor e um sistema de correias e alavancas (ZEEMAN, 1919, prancha em anexo).

Fig. 6.12 (p. 193) – Montagem interferométrica para a tentativa de medição da suposta variação do índice de refração de um líquido causada pela proximidade a uma superfície sólida, inicialmente através da introdução de uma célula com janelas de vidro num dos braços do interferômetro (à esq.). A luz ingressa em L e as franjas são observadas por um telescópio em T. No detalhe, placa de vidro AA, que eventualmente substituiu a célula CC, contra a qual eram prensadas lâminas de vidro idênticas (B e C) para encerrar uma película de líquido ou ar em contato com o vidro (à dir.) (BARUS, 1921, p. 146).

Fig. 6.13 (p. 195) – Montagem para comparação entre dois sistemas de franjas distintos. L e L' eram duas fontes de luz branca e T o telescópio em se podia observar os sistemas de franjas por elas projetados através do interferômetro. A linha tracejada C representava uma cunha de vidro móvel que visava a regular os tamanhos relativos das franjas em cada sistema, permitindo o uso de um como escala para leitura de deslocamentos no outro (BARUS, 1921, p. 149).

Fig. 7.1 (p. 201) – Alguns dos equipamentos desenvolvidos e utilizados por Hertz para demonstrar a existência e natureza das ondas eletromagnéticas no éter (MORUS, 2005, p. 171).

Fig. 7.2 (p. 205) – “Produção anual de escritos em relatividade”, circa 1924. O campo era reconhecido como tal desde os trabalhos de Lorentz e Poincaré no final do século XIX, e o artigo (hoje tido como seminal) de Einstein de 1905 (EINSTEIN, 1905) não recebia então qualquer destaque especial. Ao contrário, a participação mais relevante de Einstein é marcada na época da 1ª guerra mundial (1914-1918), período no qual formalizou sua teoria da relatividade geral (EINSTEIN, 1916).

Fig. 7.3 (p. 209) – Esquema geral do interferômetro de Michelson em sua montagem original. A luz oriunda de uma fonte em a era parcialmente refletida pela placa de faces paralelas b, produzindo os feixes perpendiculares bc e bd. Espelhos de primeira superfície em c e d refletiam os feixes de volta à placa b, produzindo uma superposição ao longo de be onde se podia observar padrões de interferência. Uma segunda placa de faces paralelas, g, semelhante à primeira, era colocada ao longo do braço bc do interferômetro para compensar a diferença de caminho óptico entre os braços (MICHELSON, 1881, p. 122).

Fig. 7.4 (p. 212) – Vista superior do interferômetro de Michelson original. Os espelhos c e d podiam mover-se ao longo dos braços maiores, enquanto as placas estavam posicionadas sobre a base circular central. À esquerda, em a, era posicionado o lampião, e abaixo, em e, a lupa de observação (MICHELSON, 1881, pp. 123-124).

Fig. 7.5 (p. 214) – Vista em perspectiva do interferômetro de Michelson original, construído em latão pela firma Schmidt & Hænsch de Berlim. Pode-se ver à esquerda o contrapeso que mantinha o equilíbrio mecânico do aparelho. O interferômetro como um todo também podia ser nivelado e girado em torno de um eixo vertical (MICHELSON, 1881, pp. 123-124).

Fig. 7.6 (p. 215) – Gráfico comparando os valores esperados para a variação da posição da franja central do padrão de interferência em função do azimute (senóide tracejada) com os valores medidos (linha contínua) (MICHELSON, 1881, p. 128).

Fig. 7.7 (p. 218) – À esq., diagrama do experimento de Michelson-Morley com o percurso

(corretamente) triangular para o feixe que se deslocava ao longo do braço perpendicular (agora rotulado ab) (MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 335). À direita, demonstração do desvio da frente de onda pela superfície refletora em movimento. A parte inferior da frente de onda é refletida pela superfície em b, quando a superfície está na posição mn, porém a parte superior da frente só a atinge, em d, quando ela já está na posição m_1n_1 (MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 343).

Fig. 7.8 (p. 219) – Desenho em perspectiva da montagem de Michelson e Morley de 1887, sem a cobertura de madeira utilizada durante os procedimentos de observação para controle da temperatura (à esq.) e diagrama em vista superior com o caminho óptico dos feixes ao longo das múltiplas reflexões desde a fonte a até a luneta de observação f. O uso de quatro espelhos em cada extremidade permitiu estender os braços do interferômetro para um comprimento D da ordem de 11 m (centro). À direita, corte transversal da estrutura da base, em que a pedra a mostra-se apoiada sobre uma base de madeira b que “vestia” na calha de ferro c com uma pequena folga, preenchida por mercúrio, permitindo pivotá-la em torno de um eixo d praticamente sem resistência (MICHELSON e MORLEY, 1887, pp. 337, 338 e 339).

Fig. 7.9 (p. 220) – Fotografia da montagem de Michelson e Morley de 1887, albergada no porão do Adelbert Hall, na Western Reserve University (SWENSON, 1972, 4ª página do encarte entre as páginas 106 e 107). Evidentemente esta foto, descoberta apenas muitos anos depois, serviu de modelo para a confecção do desenho em perspectiva da esquerda da figura 7.7.

Fig. 7.10 (p. 227) – Franjas circulares num interferômetro de Michelson com os espelhos perfeitamente perpendiculares, iluminado com luz monocromática.

Fig. 7.11 (p. 228) – Efeito do deslocamento progressivo de um dos espelhos do interferômetro de Michelson quando os espelhos não estão perfeitamente perpendiculares um ao outro. Repare o deslocamento das franjas (neste caso) para a direita.

Fig. 7.12 (p. 228) – Efeito do deslocamento progressivo de um dos espelhos do interferômetro de Michelson quando os espelhos estão perfeitamente perpendiculares um ao outro. Note-se (neste caso) a convergência das franjas para o centro do padrão.

Fig. 7.13 (p. 229) – Efeito da inclinação progressivamente (neste caso) menor dos espelhos do interferômetro de Michelson um em relação ao outro. Quanto mais perto de estarem perpendiculares, mais próximas as imagens virtuais da fonte, e mais largas as franjas – e vice-versa.

Fig. 7.14 (p. 239) – Experimento de Lodge. À esquerda, ilustração em corte transversal do motor com os discos e o interferômetro colocado entre os discos, logo acima do operador (ANDERSON, BILGER e STEDMAN, 1994, p. 977); ao centro, visão em perspectiva do interferômetro, com as lunetas para observação e para a introdução do feixe incidente (LODGE, 1909, p. 79); e à direita diagrama em visão superior do caminho óptico no interior do interferômetro, marcando a posição do semi-espelho M (LODGE, 1909, p. 72).

Fig. 7.15 (p. 245) – Interferômetro em aço utilizado por Morley e Miller em substituição à moldura de pinho no período 1903-1904. Note-se que o aparelho foi colocado sobre as mesmas calha circular e base de tijolos maciços do experimento original. Apenas a quantidade de mercúrio utilizada foi muito aumentada devido ao enorme peso (quase uma tonelada) da estrutura em aço (SWENSON, 1972, 5ª página do encarte entre as páginas 106 e 107).

Fig. 7.16 (p. 251) – Interferômetro automático de Joos construído na fábrica da Zeiss em Jena. Os braços operavam imersos em hélio e as franjas eram fotografadas automaticamente (SWENSON, 1972, 11ª página do encarte entre as páginas 106 e 107).

Fig. 7.17 (p. 254) – Interferômetro de Sagnac original. Um relativamente complexo interferômetro cíclico projetava na placa fotográfica PP' os dois feixes de luz oriundos da fonte em O e que percorriam um polígono fechado de área S em sentidos opostos (POST, 1967, p. 476).

Fig. 7.18 (p. 256) – Interferômetro cíclico de Harress, no qual um anel de blocos de vidro era colocado em movimento giratório (POST, 1967, p. 477).

Fig. 7.19 (p. 257) – Vista superior da montagem dos dois interferômetros cíclicos acoplados (ADCBA e ADEFA, respectivamente) do experimento de Michelson-Gale-Pearson. (SHANKLAND, 1973, p. 2286).

Fig. 8.1 (p. 261) – Proposta de experimento para determinação da direção real de oscilação do éter na luz polarizada através da interferência de dois feixes perpendiculares entre si (a) quando as direções de vibração do éter (setas vazadas) são perpendiculares ao plano definido pelas direções de propagação dos feixes (setas cheias); e (b) quando as direções de vibração do éter estão contidas neste mesmo plano.

Fig. 8.2 (p. 264) – Máscara utilizada por Stéphan sobre o tubo do telescópio Foucault de 80 cm de diâmetro em Marselha (STÉPHAN, 1874). A distância entre os centros das fendas em forma de gomos é de 65 cm, o que resulta numa largura máxima de 15 cm na região central das fendas.

Fig. 8.3 (p. 274) – Esquema para a dedução da largura a de uma fonte luminosa extensa através do desaparecimento das franjas de interferência. Na prática a fonte era uma fenda de largura variável. (MICHELSON, 1890b, p. 2).

Fig. 8.4 (p. 275) – Plotagem da visibilidade do padrão de franjas em função da largura da fonte. Note-se que as franjas desaparecem e reaparecem (menos brilhantes) repetidamente, a cada vez que a/d é um múltiplo inteiro de l/b . Os valores correspondente aos máximos de $|V|$ são +1,000; -0,210; +0,130; -0,091; ... (MICHELSON, 1890b, p. 4).

Fig. 8.5 (p. 277) – Plotagem da visibilidade do padrão de franjas em função da extensão da fonte para os casos de uma abertura retangular (linha contínua); de um disco iluminado uniformemente (linha tracejada); e de um disco de luminosidade não homogênea de maneira semelhante ao Sol (linha picotada) (MICHELSON, 1890b, prancha I).

Fig. 8.6 (p. 278) – Plotagem da visibilidade do padrão de franjas devido a dois discos iluminados idênticos separados de uma distância s perpendicular à direção da maior extensão das fendas do interferômetro, em função do diâmetro dos discos e da separação entre seus centros (linha tracejada). A linha contínua mostra o envelope, que depende apenas do diâmetro dos discos. (MICHELSON, 1890b, p. 12).

Fig. 8.7 (p. 278) – Vistas frontal rebatida (à esq.) e superior (à dir.) da montagem para o teste do método interferométrico para a medição de pequenas dimensões angulares utilizando uma fenda dupla de separação regulável à frente de um telescópio (MICHELSON, 1890b, prancha

II).

Fig. 8.8 (p. 279) – À esq., duas montagens alternativas propostas por Michelson para transformar um telescópio em um “refratômetro”. Os espelhos são representados por retângulos hachurados, enquanto retângulos vazados representam divisores de feixe ou placas compensadoras (MICHELSON, 1890b, p. 18). Michelson dá preferência ao segundo setup, que incorpora num desenho técnico mais minucioso (dir.). Os espelhos estão marcados a e b, e podem ser separados ou aproximados um do outro pelo observador enquanto observa na ocular (MICHELSON, 1890b, prancha II, girada em relação à original para efeito de comparação).

Fig. 8.9 (p. 281) – Máscara/sistema mecânico de “mandíbulas deslizantes” para variar e medir a separação entre as fendas construído para Michelson para a medição dos diâmetros dos satélites galileanos (a ser acoplado sobre a objetiva do telescópio equatorial de 12 polegadas). Novamente uma barra rosqueada (não mostrada na figura) permitia ao observador variar a separação entre as fendas enquanto observava pela ocular (MICHELSON, 1891, p. 276).

Fig. 8.10 (p. 286) – Esquema de classificação de estrelas de acordo com seu brilho e tipo espectral segundo os originais de Hertzsprung (esq.), para as estrelas das Híades (em cima) e das Plêiades (em baixo), e de Russell (centro), ambos de 1911. Esta maneira de plotar as estrelas, chamada de “diagrama H-R” pelas iniciais de Hertzsprung e Russell, passou a ser intimamente relacionada com a teoria da evolução estelar. À dir., uma plotagem mais recente do diagrama H-R.

Fig. 8.11 (p. 288) – Trecho da carta de Michelson a Hale em que explica como uma mera diminuição da visibilidade das franjas poderia produzir um valor para o diâmetro de uma estrela no telescópio de 100 polegadas (DeVORKIN, 1975, p. 9).

Fig. 8.12 (p. 290) – Montagem de Anderson para a determinação da separação entre as componentes de Capela. As fendas retangulares em A projetavam um padrão de interferência observado por uma lente de grande ampliação em E. Toda a máscara contendo as fendas podia ser girada, e a separação entre as fendas variada (ANDERSON, 1920, p. 265).

Fig. 8.13 (p. 294) – Diagrama com o posicionamento dos espelhos (M_1 a M_4) do

interferômetro estelar para a medição do diâmetro de Betelgeuse por Pease e Anderson (em cima, à esq.), com detalhamento técnico (vistas superior e lateral) da barra/linha de base ao longo da qual deslizavam os espelhos (em baixo). Foto da base montada sobre o tubo do telescópio, com posições dos 4 espelhos marcadas (em cima, à dir.) (MICHELSON e PEASE, 1921, pp. 250-251).

Fig. 8.14 (p. 295) – Rascunho do caderno de trabalho de Pease retratando a posição do assistente sobre o final do tubo do telescópio para o ajuste dos espelhos durante a medição do diâmetro de Betelgeuse na noite de 13 de dezembro de 1920 (DeVORKIN, 1975, p. 12).

Fig. 9.1 (p. 298) – Posição das linhas de Fraunhofer no espectro solar. A linha D marca o dubleto do sódio no amarelo. Nesta imagem, retirada da apresentação de Michelson quando da outorga de seu prêmio Nobel, em 1907, outras linhas já haviam sido “batizadas” (b, L, N e P) (NOBEL FOUNDATION, 1998, p. 168).

Fig. 9.2 (p. 300) – Montagem de Fizeau e Foucault com o espelho duplo de Fresnel para o estudo das franjas em ordens superiores (segundo MACH, 1926, p. 173).

Fig. 9.3 (p. 301) – Montagem de Fizeau para a análise da visibilidade das franjas com a luz de sódio e do efeito de batimento que o levou a supor que a linha D era composta de duas linhas distintas muito próximas uma da outra. Um parafuso micrométrico de passo conhecido permitia afastar continuamente e controladamente a placa refletora (hachurada) da lente para atingir ordens altas dos anéis de Newton (segundo MACH, 1926, p. 177).

Fig. 9.4 (p. 302) – Variante do dilatômetro de Fizeau desenvolvida pelo Bureau of Standards estadunidense (atual NIST). A cunha de ar formada entre B e A quando da dilatação desigual das bases A (em quartzo) e C dava origem a franjas paralelas (TOLANSKY, 1955, p. 67).

Fig. 9.5 (p. 304) – A visibilidade das franjas de interferência produzidas a partir do dubleto do sódio no amarelo apresenta um comportamento periódico (gráfico à direita), evidenciando a natureza dupla da linha espectral D (fig. à esq.) (MICHELSON, 1927, p. 35).

Fig. 9.6 (p. 305) – Analisador harmônico de Michelson (esq.), constituído de 80 osciladores similares ao do diagrama da direita, alinhados (MICHELSON, 1903, pp. 67 e 69).

Fig. 9.7 (p. 306) – Simulação no analisador harmônico de diferentes configurações espectrais (esq.) ao lado das curvas de visibilidade esperadas em cada caso (MICHELSON, 1903, p. 71).

Fig. 9.8 (p. 307) – Montagem do interferômetro de Michelson para uso espectroscópico (MICHELSON, 1903, p. 76).

Fig. 9.9 (p. 307) – Análise de algumas das linhas espectrais estudadas por Michelson. De cima para baixo: hidrogênio (vermelho); sódio (amarelo); cádmio (vermelho) e cádmio (verde) (MACH, 1926, p. 183).

Fig. 9.10 (p. 310) – Sub-padrões para a determinação interferométrica do metro. O braço H permite carregar o padrão sem tocar (e, portanto, transferir calor, dilatando) a parte A que contém os espelhos. O espelho M2 podia ser colocado paralelo a M1 graças ao ajuste do parafuso micrométrico S agindo contra a mola que mantinha o espelho em contato com os pinos de suporte (WILLIAMS, 1950, p. 52), num sistema mecânico simples e popular até os dias de hoje entre os fabricantes de equipamentos ópticos.

Fig. 9.11 (p. 311) – Montagem para determinação do metro em função do comprimento de onda de linhas espectrais do cádmio. O observador em o comparava franjas geradas pela superposição do feixe que refletia no espelho de referência d com os feixes refletidos pelos espelhos nos sub-padrões mm' e nn', ambos montados sobre carros que podiam ser deslocados suavemente (MICHELSON, 1903, p. 96).

Fig. 9.12 (p. 314) – Montagem para determinação do metro em função do comprimento de onda de linhas espectrais do cádmio, com o sistema espectroscópico para seleção das linhas (linha diagonal com o prisma) e para iluminação com luz branca (MICHELSON, 1903, p. 100).

Fig. 9.13 (p. 316) – Função de Airy mostrando os perfis de intensidade das franjas para diferentes valores da refletividade R: 4%, 50% e 80%. (JENKINS e WHITE, 1976, p. 298).

Fig. 9.14 (p. 318) – Interferômetro de Fabry-Perot original.

Fig. 9.15 (p. 319) – Imagens das franjas “gravadas a partir das fotografias diretas dos fenômenos” (e portanto gravuras feitas a partir das fotografias, e não as fotografias elas mesmas): (1) franjas de Fizeau, aparentemente de placas de baixa qualidade, mostrando coincidências nas franjas produzidas por duas linhas do mercúrio, não especificadas; (2) espectro “canelado” em luz branca (linhas finas apenas devido à gravura); (3) espectro “canelado” de franjas de Brewster (ou franjas “de superposição” devido a dois pares de placas em série, mostrando um efeito moiré (FABRY e PEROT, 1897 apud CONNES, 1986, p. 20).

Fig. 9.16 (p. 320) – Comparação entre as franjas produzidas por (a) um interferômetro de Michelson e por (b) um interferômetro de Fabry-Perot com superfícies de refletividade igual a 0,8 (JENKINS e WHITE, 1976, p. 304).

Fig. 9.17 (p. 321) – Interferômetro ou placa de Lummer-Gehrcke. Um prisma cortado convenientemente é posicionado sobre a entrada da longa placa de vidro, de modo a que a luz seja nela admitida em um ângulo ligeiramente menor que o ângulo crítico para reflexão total (BORN e WOLF, 1991, p. 342).

Fig. 10.1 (p. 327) – Montagem de um interferômetro de Michelson para metrologia dimensional em laboratório da Divisão de Mecânica do LNM em Xerém. Pode-se reconhecer o laser de He-Ne (A) utilizado como fonte, o divisor de feixe (B), o espelho de referência (C), o espelho móvel (D) e o detector para contar eletronicamente as franjas (E).

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 (p. 11) – Campos e aplicações dentro da interferometria (STEEL, 1967, p.2).

Tabela 4.1 (p. 105) – Comparação entre os índices de refração de gases encontrados por Jamin e os obtidos previamente por Biot e Arago e por Dulong (JAMIN, 1857, p. 301).

Tabela 4.2 (p. 118) – Relações propostas entre a densidade de uma substância e seu índice de refração (GALE, 1902).

Tabela 6.1 (p. 185) – Valores calculados e experimentais para o deslocamento das franjas no experimento de Fizeau para quatro cores diferentes (ZEEMAN, 1915a, p. 404).

Tabela 6.2 (p. 188) – Valores calculados e experimentais para o deslocamento das franjas no experimento do arrasto do éter por blocos de quartzo para quatro cores diferentes (SNETHLAGE e ZEEMAN, 1919, p. 516).

Tabela 8.1 (p. 282) – Valores em segundos de arco para os diâmetros angulares corrigidos dos satélites galileanos de Júpiter conforme medidos por Michelson (A. A. M.) pelo método interferométrico, em comparação com as medições contemporâneas obtidas pelo método micrométrico tradicional respectivamente por Engelmann, Struve, Hough e Burnham e seus valores médios (com as respectivas dispersões). Note-se que as medições micrométricas de Burnham foram realizadas em paralelo com as de Michelson na noite de 7 de agosto de 1891, no mesmo local, com o telescópio de 36 polegadas (MICHELSON, 1891, p. 277).

Tabela 8.2 (p. 292) – Comparação entre os valores obtidos por Anderson interferometricamente para a separação angular entre as componentes de Capela e os valores calculados a partir de elementos espectroscópicos nas mesmas datas. Observe-se que em 23 de abril a dispersão atmosférica afetou significativamente a medição feita à luz do dia, produzindo um resultado aproximadamente 10% menor que o esperado (ANDERSON, 1920, p. 275).

Tabela 9.1 (p. 299) – Valores dos comprimentos de onda das raias espectrais principais de

Fraunhofer conforme diversos pesquisadores. Bernard em particular utilizou o fenômeno da interferência para grandes diferenças de marcha (MASCART, 1868, p. 189).

Lista de Abreviaturas

BIPM – Bureau International des Poids et Mesures (Bureau Internacional de Pesos e Medidas).

Fig. - figura.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial.

LNM – Laboratório Nacional de Metrologia.

NIST – National Institute of Standards and Technology.

Lista de Símbolos

\AA – angstrom (= 10^{-10} m).

$^{\circ}\text{C}$ – grau Celsius.

1 Introdução

“To few it is given to combine the talent of investigation with the happy faculty of making the subject of their works interesting to others. I do not claim to be one of these fortunate few; and if I am not as successful as I could wish in this respect, I can only beg your indulgence for myself, but not for the subject I have chosen. This, to my mind, is one of the most fascinating, not only of the departments of science, but of human knowledge.”¹

A. A. Michelson

1.1 O Ponto de Vista dos Interferômetros

A tese que queremos defender é a de que os estudos sobre o fenômeno da interferência luminosa e as montagens experimentais interferométricas, aí incluído o desenvolvimento dos instrumentos conhecidos como *interferômetros* e suas aplicações, desempenharam um papel significativamente diferente na história da ciência do século XIX em relação ao que lhe é comumente atribuído nas tradições historiográficas mais recentes.

De fato, a maioria dos livros didáticos de física geral, como por exemplo a coleção “Física” de David Halliday e Robert Resnick (HALLIDAY e RESNICK, 1966), e, em certa medida, até mesmo o livro “Physics, the Human Adventure – from Copernicus to Einstein and Beyond”, dos historiadores da ciência Gerald Holton e Stephen G. Brush (HOLTON e

1 “A poucos é dado combinar o talento da investigação com a feliz faculdade de tornar o objeto de seus trabalhos interessante para os outros. Eu não não tenho a pretensão de ser um desses afortunados; e, se eu não for tão bem-sucedido quanto eu gostaria neste aspecto, posso apenas implorar vossa indulgência para comigo, mas não para com o tema que escolhi. Este, a meu ver, é um dos mais fascinantes, não só dos departamentos da ciência, mas do conhecimento humano” (MICHELSON, 1903, p. 1, referindo-se à interferometria; tradução nossa).

BRUSH, 2004), que apresenta uma abordagem histórica e filosófica original para um livro didático, não destaca a importância da interferometria no processo, à exceção de dois famosos experimentos. O primeiro deles é o *experimento da fenda dupla*, que teria demonstrado o caráter ondulatório da luz; e o segundo o não menos famoso *experimento de Michelson-Morley*, cujo resultado teria comprovado a não-existência do éter e constituiria a base empírica para a teoria da relatividade restrita. Estas apresentações, que constituem em boa medida as noções com que a maior parte dos físicos recém-formados sai de seus cursos de graduação, pecam muitas vezes não apenas por omissões importantes mas também por incorreções históricas, como veremos ao longo deste trabalho.

É preciso notar que há um subconjunto de livros didáticos especificamente dedicados ao estudo da óptica (por exemplo HECHT, 1990), no qual se destacam quatro livros clássicos em que há alguma espécie de preocupação com uma abordagem histórica. Num deles (BORN e WOLF, 1991), o tratamento inicia-se com uma seção introdutória de oito páginas em que uma espécie de história da óptica como um todo é apresentada. Apesar de relativamente breve, faz menção indireta a alguns dos trabalhos mais importantes em interferometria. Desenvolvimentos específicos são mencionados parcimoniosamente ao longo do texto dos capítulos, sem a pretensão de traçar uma história detalhada da técnica em cada caso, porém indicando ao leitor referências primárias relevantes, como ocorre também no segundo livro (JENKINS e WHITE, 1976). O livro de Thomas Preston (PRESTON, 1928), cuja primeira edição foi impressa ainda em 1890, traz diversas referências específicas, realizando um apanhado que pode não se propor histórico, mas que registra muitos dos desenvolvimentos citando suas fontes primárias. A última obra (MACH, 1926) é a *única* referência que

encontramos em que o tratamento histórico e filosófico (como prometido no subtítulo) avança para detalhes específicos da história e relevância de diversas montagens interferométricas. Registre-se no entanto que em todos os casos estamos falando de uma história *internalista*².

O caráter sintético e pedagógico característico dos textos didáticos não deve servir de pretexto para este tipo de falha, porém é preciso desculpar seus autores uma vez que em geral mesmo os compêndios escritos pelos historiadores da ciência do século XX não têm, tradicionalmente, dado atenção ao papel da técnica interferométrica na evolução da ciência do século XIX, preferindo destacar outros aspectos do processo (SILLIMAN, 1974; FOX, 1974; FRANKEL, 1976; HARMAN, 1995)³. Uma exceção consiste no trabalho do eminente historiador da ciência estadunidense Jed Z. Buchwald. Embora focalizando a atenção nos debates a respeito do fenômeno da *polarização* da luz (e da *birrefringência*) ao discutir o

2 *Internalismo* é um termo relativamente recente que designa uma visão historiográfica calcada exclusivamente nos fatos históricos *internos* a uma dada área do conhecimento, *i. e.*, nos avanços teóricos, resultados experimentais e debates entre as principais personagens envolvidas, sem recurso ao que se passa “no mundo externo” àquela dada disciplina. Uma visão oposta, segundo a qual os eventos na história de uma determinada área do conhecimento são determinados em grande medida, senão em sua totalidade, por fatores *externos* a ela, por exemplo revoluções estruturais na sociedade, avanços em outras áreas da técnica, movimentos culturais, pressões econômicas, eventos catastróficos, puro acaso, etc., é designada como *externalismo*. Este trabalho não tem a pretensão de constituir uma análise de caso na defesa de uma ou outra visão, embora advogemos que nem uma nem outra nos parece completa em sua forma extrema, e uma visão historiográfica que incorpore elementos de ambas deve ser preferida. Assim, embora na maior parte deste trabalho uma visão internalista seja suficiente para narrar a evolução da técnica interferométrica no século XIX, quando pertinente ou necessário são feitas incursões a externalidades.

3 Isto é bastante diferente quando se analisa a historiografia da ciência mais próxima do século XIX, em que a relevância das montagens interferométricas aparece de maneira mais evidente e detalhada (por exemplo, em WHEWELL, 1847, ou WHITTAKER, 1910). Isto se dá em parte talvez pela proximidade e portanto empatia com a relevância do tema, mas também talvez em função da própria visão historiográfica predominante na época, que tendia a valorizar, mais que hoje, os resultados e avanços técnicos e experimentais.

processo que levou à aceitação da teoria ondulatória da luz na primeira metade do século XIX, Buchwald aborda algumas montagens interferométricas relevantes no processo (BUCHWALD, 1989). Os recortes temático e cronológico do trabalho de Buchwald no entanto impedem que essa análise detalhada se estenda a todos os outros episódios em que montagens interferométricas tiveram uma participação importante no avanço da física, e mesmo o trabalho pioneiro do polímata inglês Thomas Young (1773-1829) se vê inexplorado.

Para dificultar as coisas ainda mais, a historiografia da área, como é de praxe, tem abrigado diversas polêmicas ao longo do tempo, o que faz com que por vezes uma ou outra determinada visão tenha se cristalizado fora do *métier*, ainda que temporariamente, como “a” visão da história da ciência quanto ao episódio. Nesse sentido, e no que tange às duas experiências citadas, percebemos num caso uma tendência a se acreditar que o experimento de Michelson-Morley *não* tenha tido nenhum papel relevante no processo que levou à teoria da relatividade restrita, e noutro uma visão de que, qualquer que tenha sido sua contribuição inicial, Young teria sido logo abandonado e o crédito do triunfo da teoria ondulatória da luz deveria ser dado ao físico francês Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) e seus trabalhos sobre a difração da luz. Em ambos os casos, não apenas essas visões diferem do “senso comum da história da física” transmitido para cada nova geração de físicos, como também constituem imagens incompletas, para dizer o mínimo, e que merecem o olhar crítico que lhes pretendemos lançar ao longo deste trabalho.

Além disso, embora a importância fundamental do conceito de éter luminífero seja bem reconhecida historicamente, outros conceitos outrora relevantes não são bem tratados, como os conceitos de “poder refrativo” dos materiais, relevante para a física da época, ou do

coeficiente de arrasto de Fresnel, relacionado ao que depois se convencionaria chamar de “óptica dos corpos em movimento”. Nestes e possivelmente em outros casos, o olhar moderno dificulta a apreciação da relevância dos conceitos da época para a física do período.

Se os livros didáticos de física geral não costumam fazer uma abordagem histórica, os tratados mais técnicos, destinados à instrução específica em interferometria, tampouco dedicam espaço a um tratamento desta natureza, ou o fazem muito rara, tímida, superficial e incorretamente (por exemplo TOLANSKY, 1955; FRANÇON, 1966; STEEL, 1967 e HARIHARAN, 1985). Não é incomum encontrarmos nestas obras mitologias sendo construídas ou repetidas, uma vez que seus autores não têm via de regra formação específica em história da ciência e aparentemente nenhuma pretensão em verificar a correção do que escrevem em trechos como o seguinte, presente logo ao primeiro parágrafo do livro⁴:

O fenômeno da interferência teve uma considerável influência no desenvolvimento da física. A observação de Young e sua explicação da interferência dos feixes [que passam] através de dois buracos proveu a base para a teoria ondulatória da luz de Fresnel, e o mesmo experimento foi usado como fundação da moderna teoria da coerência. A teoria da relatividade restrita de Einstein foi desenvolvida para explicar o resultado negativo do experimento de Michelson-Morley. (STEEL, 1967, p. 1)[i1]⁵

4 Ao longo deste trabalho todas as citações consistem de traduções nossas dos textos originais, que se encontram no apêndice 1, indexados por capítulo pelo correspondente numeral romano italicizado, e listados na ordem em que aparecem no texto.

5 É curioso que o autor consiga colocar na mesma frase, e de maneira tão clara, ambos os mitos. Como veremos, nem Fresnel tinha conhecimento do trabalho de Young antes de desenvolver por conta própria seus trabalhos em interferência e difração, só tendo sido apresentado a este pelo astrônomo francês François Arago (1786-1853) *a posteriori*, nem o resultado nulo do experimento de Michelson-Morley parece ter inspirado Einstein diretamente, como colocado no texto, na gênese da teoria da relatividade restrita. O autor aqui parece seguir (e reforçar) a tradição que atribui à fenda dupla de Young e ao experimento de Michelson-Morley um papel exagerado no desenvolvimento da física. Mais à frente, na mesma obra, Steel insiste novamente que “o resultado negativo obtido [no experimento de Michelson-Morley] *levou Einstein a formular* a teoria da relatividade restrita” (STEEL, 1967, p. 154, grifo nosso).

Assim, órfã de pai e mãe, a interferometria tem sido relegada a um papel a nosso ver distorcido em relação ao que lhe é devido na história da ciência.

Nossa pesquisa representa em uma certa medida um resgate da possivelmente correta (no sentido de não-mitológica ou anedótica) relevância da interferometria na evolução dos conceitos e das técnicas na física e em outras disciplinas. Esperamos conseguir demonstrar que o uso do fenômeno da interferência luminosa foi crucial no estudo e eventual solução tanto de questões específicas – por exemplo na determinação do tamanho das estrelas (*cf.* capítulo 8) – quanto nas questões mais gerais e fundamentais da física do século XIX, como o debate sobre a natureza da luz e o movimento em relação ao éter e seus efeitos sobre a matéria ordinária.

Portanto, mais do que uma “história da interferometria”, nosso objetivo neste trabalho é produzir uma “história interferométrica” da ciência do século XIX, e mesmo por vezes do início do século XX. Ao leitor generoso solicitamos considerar este trabalho como constituindo, portanto, uma espécie de história da ciência do período narrada pelo ponto de vista dos interferômetros.

1.2 Interferência e Interferometria

O fenômeno da interferência luminosa foi descoberto por Young em 1800. Ele teve origem numa bem-sucedida analogia com a interferência de ondas sonoras, ou de outras ondas

mecânicas conhecidas, como as ondas na superfície de um líquido⁶. Young percebeu que onde quer que duas ondas se sobrepusessem seus efeitos podiam ser somados sem que isso alterasse qualquer uma delas, que, para todos os efeitos práticos, continuava a se propagar independentemente da presença da outra.

Tomemos como exemplo a superfície de um lago de águas tranqüilas. A percussão de um ponto qualquer da superfície (como ocorre por exemplo quando se deixa cair nela uma pequena pedra) faz com que a partir deste ponto seja irradiada uma perturbação, ou pulso, que se propaga pela superfície com uma mesma velocidade em todas as direções, configurando portanto uma frente de onda na forma de uma circunferência com centro na origem da perturbação e cujo raio aumenta progressivamente. Caso a percussão consista em um estímulo periódico, isto é, se a superfície da água no ponto em questão é perturbada repetidamente com uma freqüência constante, a cada frente de onda segue-se outra idêntica, e assim por diante. Deste modo, um ponto qualquer da superfície, uma vez atingido pela primeira frente de onda, passa a subir e descer repetidamente, com a mesma freqüência do estímulo original. Ao se introduzir uma segunda onda na mesma superfície, todos os pontos da superfície parecem sentir os efeitos combinados de ambas as ondas. Assim, por exemplo, num ponto da superfície onde uma crista (região mais alta) de uma onda encontra uma crista da outra onda as alturas das ondas se somam (de fato, dá-se ao efeito o nome de *interferência construtiva*), e a superfície da água neste ponto é elevada mais do que se sofresse a ação de apenas uma das ondas. Por

6 De fato, Young é o inventor da cuba de ondas, equipamento didático utilizado até hoje para estudar ondas bidimensionais, e que consiste num tanque transparente iluminado por baixo, onde se pode produzir controladamente pequenas ondulações na superfície da água, dando origem a padrões de claro e escuro projetados no teto ou, com o auxílio de um espelho, numa parede ou tela à frente do aparelho.

outro lado, num ponto da superfície onde a crista de uma das ondas encontra um vale (região mais baixa) da outra onda, a soma dos efeitos devidos a cada onda faz com a superfície da água neste ponto sofra seu menor deslocamento (*interferência destrutiva*). Em particular, no caso em que as amplitudes (alturas máximas) das ondas são exatamente iguais, nestes pontos o efeito de uma será perfeitamente anulado pelo da outra, de modo que ali a superfície da água não sofrerá nenhum deslocamento. A figura 1.1 mostra o padrão de interferência gerado por duas ondas superpostas. As franjas formadas representam as posições para as quais a superposição das duas ondas se dá da mesma maneira⁷.

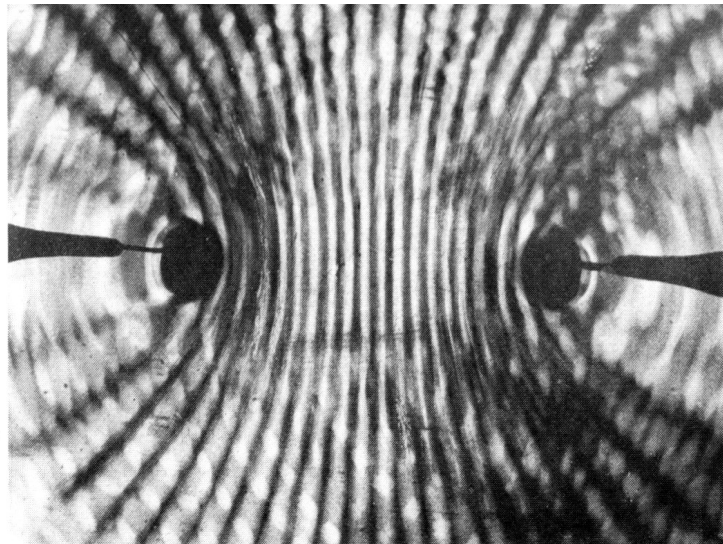


Fig. 1.1 – Fotografia da superposição de duas ondas produzidas numa cuba de ondas. As regiões claras e escuras apresentam o tipo de periodicidade e distribuição semelhantes às franjas de interferência da luz (MICHELSON, 1928, encarte).

7 As regiões claras e escuras na foto não correspondem exatamente às regiões de interferência construtiva e destrutiva, mas marcam as regiões onde a concavidade da superfície da água é mais positiva ou mais negativa (em ambos os casos situações de interferência construtiva). Quando a superfície da água apresenta uma concavidade positiva ela funciona como uma lente divergente, abrindo o feixe luminoso e portanto diminuindo sua intensidade percebida (faixas escuras). No caso inverso (concavidade negativa), a superfície da água se comporta como uma lente convergente, condensando a luz e aumentando a intensidade observada (faixas claras). A interferência destrutiva ocorre nas regiões onde a superfície da água se mantém plana e portanto a luminosidade fica intermediária (regiões acinzentadas na foto).

Conforme percebeu Young, é justamente o fato de observarmos que os efeitos de uma e outra onda se somam que nos permite concluir que as ondas se propagam de maneira independente:

É surpreendente que um matemático tão brilhante quanto o Dr. Smith possa ter considerado por um momento a ideia de que vibrações que constituem diferentes sons possam ser capazes de atravessar uma a outra em todas as direções sem afetar as mesmas partículas de ar individuais com suas forças somadas: sem dúvida elas se atravessam sem perturbar o progresso uma da outra, mas isso não pode ocorrer senão quando cada partícula compartilha ambos os movimentos (YOUNG, 1800, p. 130)[i2].

Young se referia às ondas sonoras, e não às ondas na superfície da água, mas o princípio se aplica da mesma maneira. A questão para Young, justamente, era demonstrar que a luz exibia características ondulatórias, que podiam ser apreendidas de um conjunto de fenômenos ópticos e de sua analogia especialmente com fenômenos acústicos, o mais relevante dos quais sendo o fenômeno por ele descoberto da interferência⁸.

Um exemplo importante da aplicação do princípio da interferência às ondas sonoras é na explicação das ondas estacionárias geradas por instrumentos musicais, como por exemplo em tubos de órgãos. Young tentava estabelecer uma analogia entre a utilização da ideia de interferência na explicação de fenômenos acústicos e na explicação de fenômenos ópticos, como os anéis de Newton e as cores em películas de sabão e outros filmes finos.

Uma situação tão exemplar que se tornou icônica para o fenômeno da interferência, sugerida posteriormente por Young, é a fenda dupla. Em sua configuração mais didática, a montagem envolve uma placa com uma fenda ou um orifício (à esquerda na figura 1.2 a

⁸ Como observado por Robert Crease, a seção XI do texto de Young de 1800, que se inicia com a citação anterior, constitui possivelmente a mais canhestra introdução de um fenômeno fundamental novo em toda a história da ciência (CREASE, 2006).

seguir) que filtra a luz oriunda de uma fonte monocromática, funcionando na prática como uma fonte puntiforme para duas fendas estreitas S_1 e S_2 , idênticas e paralelas, muito próximas uma da outra⁹. A região do espaço logo após as fendas, na qual se dá a interseção das ondas luminosas oriundas de cada fenda, hospedará portanto um padrão de interferência constituído de direções em que a interferência é sempre construtiva intercaladas com outras direções ao longo das quais a interferência é sempre destrutiva. Ao ser interceptada por uma superfície paralela ao plano definido pelas fendas, a luz projetada nesta superfície se assemelhará então a uma sucessão de franjas alternadamente claras e escuras paralelas à direção da maior dimensão das fendas. Neste padrão de interferência as regiões claras correspondem a posições de máximos de interferência, enquanto as regiões escuras correspondem às posições de mínimos.

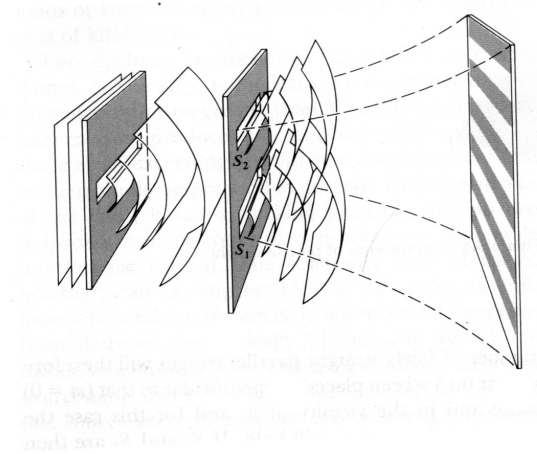


Fig. 1.2 – Fenda dupla de Young (HECHT, 1990, p. 340). A luz oriunda da fenda única à esquerda dá origem, após atravessar as fendas S_1 e S_2 , a um padrão de franjas claras e escuras correspondendo às direções em que ocorrem, respectivamente, interferência construtiva e destrutiva.

A interferometria trata justamente da medição de propriedades de um sistema através da interrelação destas propriedades com características do padrão de interferência criado por

⁹ O mesmo efeito seria obtido utilizando-se orifícios em vez de fendas, porém as fendas têm a vantagem de produzir um padrão muito mais luminoso.

uma montagem experimental específica à qual o sistema está associado. Assim, por exemplo, veremos como é possível determinar a pequena diferença entre os índices de refração do ar seco e do ar úmido através de um sistema semelhante ao da fenda dupla de Young, em que se procede à medição do deslocamento lateral das franjas de interferência quando o ar defronte a uma das fendas é ressecado (*cf.* capítulo 4).

A tabela 1.1 a seguir sintetiza a relevância da interferometria como técnica experimental através de diversas de suas aplicações já bem estabelecidas, na visão de W. H. Steel, que escreve em 1967.

Medida		Aplicações
Direta	Derivada (Indireta)	
Posição das franjas	Diferença de fase média	Padrão de comprimento e comprimentos de onda Comparação de comprimentos e controle de máquinas Refratometria Velocidade da luz Microscopia interferencial
	Variações de fase	Microfotografia Teste óptico (de superfícies)
Visibilidade das franjas	Espectro da fonte	Perfis de linhas espectrais simétricas
	Distribuição espacial na fonte	Diâmetros estelares Espectroscopia por interferência direta
Distribuição de intensidade completa (posição e visibilidade)	Espectro da fonte	Espectroscopia de Fourier Função de transferência óptica
	Distribuição espacial da fonte	Radioastronomia Hologramas

Tabela 1.1 – Campos e aplicações dentro da interferometria (STEEL, 1967, p.2).

Além disso, é claro que métodos interferométricos podem ser utilizados para o estudo de outras grandezas e relações. Por exemplo, quando dois feixes de luz interferem, a visibilidade das franjas é função não apenas das características espaciais e cromáticas da fonte,

mas também da diferença entre os estados de polarização da luz em cada feixe. Logo, um interferômetro pode bem ser usado para medir polarização. De fato, embora na óptica tradicionalmente interferometria e polarimetria sejam considerados dois campos distintos, isto não ocorre na área de radioastronomia, onde os dois se fundem e medidas de polarização são consideradas aplicação direta da interferometria (STEEL, 1967, p. 52).

1.3 Dificuldades para uma História da Interferometria

O leitor pode depreender de nossa argumentação inicial que deve haver muitas dificuldades para a realização de uma história como a que propomos. Se não por outro motivo, pelo simples fato de que justamente afirmamos que tal abordagem não existe atualmente, ou existe excepcionalmente. No entanto, as dificuldades, mesmo para o historiador da ciência brasileiro, são de uma natureza muito específica, e de um modo geral *não* dizem respeito a dificuldades de acesso às fontes primárias ou à literatura especializada, boa parte das quais encontra-se disponível gratuitamente nos depósitos de documentos digitalizados acessíveis ao cidadão comum pela internet (como o sistema Gallica da biblioteca nacional francesa, ou a base de dados do Observatório Astrofísico Smithsoniano (SAO/NASA ADS), por exemplo). Artigos que não são facilmente encontrados nestes depósitos podem ser solicitados sem maiores problemas e a preços módicos pelo sistema COMUT de intercâmbio bibliográfico, que permite a troca de documentos entre as bibliotecas do país, e mesmo a busca em

bibliotecas no estrangeiro. Uma parte considerável da literatura secundária pôde ser acessada através dos periódicos disponibilizados pelo portal CAPES. No caso de livros, muitos foram adquiridos em segunda mão através de sítios de revenda na internet, a preços também bastante acessíveis. O acesso direto a documentos e outras fontes primárias, quando possível, também foi facilitado pela generosidade com que as instituições a quem compete sua guarda acolhem os pesquisadores interessados no tema (por exemplo, o material sobre Fizeau nos arquivos da *Académie des Sciences* francesa; ou o material sobre Lorentz e Zeeman no *Noord Hollands Archief* (NHA) em Haarlem, na Holanda). Algumas das fontes primárias e secundárias utilizadas neste trabalho puderam ser obtidas nos acervos de algumas das bibliotecas institucionais de nosso entorno imediato. No Rio de Janeiro temos a felicidade de ter ao alcance da mão bibliotecas com acervos significativos em história da ciência, como a do Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST), a do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e a do Instituto de Matemática Pura e Aplicada (IMPA)¹⁰, todos centros mantidos pelo Ministério da Ciência e Tecnologia. Dentre as bibliotecas universitárias, a biblioteca do Museu Nacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), em São Cristóvão, e a biblioteca de obras raras do Centro de Tecnologia da UFRJ, bem como as bibliotecas dos Institutos de Física tanto da Universidade Federal Fluminense (UFF), em Niterói, quanto da própria UFRJ, possuem material relevante. Portanto a dificuldade de acesso às fontes, problema comumente apontado por historiadores como um dos maiores empecilhos à realização da pesquisa histórica, não é um fator importante a ser levado em consideração neste caso, e a explicação para a inexistência de uma história da interferometria, ou, como pretendemos, de uma

10 Cuja coleção do *The Dictionary of Scientific Biography* foi muito útil (GILLISPIE, 1970-1980).

“história interferométrica” da ciência, precisa ser buscada em outro lugar.

A questão do idioma também não chega a constituir um impedimento, uma vez que a maior parte das fontes mais importantes está escrita em inglês ou francês, com eventuais textos em alemão ou, muito raramente, em holandês ou italiano.

Acreditamos no entanto que duas outras dificuldades sejam mais significativas, a primeira das quais está relacionada à necessidade de um conhecimento técnico por parte do historiador, e, mais especificamente, ao fato deste conhecimento ter uma natureza híbrida talvez mais destacadamente que na maior parte dos saberes aplicados similares. Uma experiência pessoal mínima com a técnica, tanto nos seus aspectos teóricos quanto práticos, parece ser necessária para se aquilatar as dificuldades envolvidas e o papel das inovações nos episódios em que a técnica interferométrica interveio.

A maior dificuldade no entanto talvez seja a identificação de relações complementares entre os avanços técnicos ou experimentais e os avanços teóricos, e em que sentido e intensidade um se fez sentir sobre o outro. Não parece ser trivial estimar a suposta influência da divulgação do resultado de um experimento no surgimento de novos modelos ou hipóteses no domínio teórico, ou, reciprocamente, o quanto novas idéias avançadas no campo da teoria inspiraram ou mesmo impuseram a proposição e realização de novos experimentos, complexidade evidenciada quando o historiador da ciência se debruça sobre os detalhes envolvendo instrumentos, modelos, episódios e personagens específicos.

Estas dificuldades não são inéditas, mas aparecem recorrentemente quando se escolhe tratar de temas de natureza intermediária entre conceitos teóricos e aplicações específicas. Um exemplo interessante pode ser encontrado num trabalho sobre a história do vidro e sua relação

com o desenvolvimento técnico-científico (MACFARLANE e MARTIN, 2002). Nele os autores argumentam que a história do vidro exemplifica bem

(...) este movimento entre o material e o teórico que acontece sempre. Por exemplo, o aperfeiçoamento na teoria (matemática e óptica) levou ao desenvolvimento de espelhos e lentes melhores, que se multiplicaram e por sua vez retroalimentaram desenvolvimentos teóricos posteriores, que levaram de volta a microscópios e telescópios, que a seguir melhoraram a saúde e a agricultura e permitiram ainda mais pesquisa.

De fato, torna-se difícil distinguir o material e o teórico. Antropólogos têm visto a tecnologia desde muito como uma mistura de coisas e ideias, de ideias embutidas ou congeladas em objetos que só têm poder a partir das práticas que ditam seu uso (MACFARLANE e MARTIN, 2002, p. 195)[i3].

Nem sempre estas relações estão colocadas claramente, ou mesmo é fácil destrinchá-las com os recursos e fontes históricas disponíveis, mas em alguns casos isso é possível. Veremos por exemplo no capítulo 9 como a invenção do interferômetro de Fabry-Perot foi possibilitada pelo desenvolvimento prévio da técnica de deposição metálica sobre vidro, que permitiu controlar a refletividade dos espelhos. Como escreveu o físico e prêmio Nobel estadunidense Robert Millikan (1868-1953) numa memória biográfica em homenagem a seu conterrâneo Albert A. Michelson (1852-1931), “a história do interferômetro mostra o quão vitalmente teoria e experimento cooperam no progresso da ciência” (MILLIKAN, 1938, p. 135).

1.4 Recorte Temático

O fenômeno da interferência luminosa, tomado numa acepção abrangente, gerou uma gama relativamente vasta de novas aplicações, e seria virtualmente impraticável tentar abarcar todas elas numa pesquisa como a aqui proposta. Impôs-se portanto alguma espécie de delimitação do tema do trabalho, que é pertinente justificar. Ela se deu em duas dimensões: (a) numa dimensão *temática*, em que o assunto foi restringido ao desenvolvimento das montagens que denominamos *interferométricas* e instrumentos que hoje chamaríamos de *interferômetros*; e (b) numa dimensão *temporal*, restringindo o alcance da pesquisa a um período específico.

No primeiro caso, buscamos tratar de questões em que montagens experimentais ou discussões conceituais envolvendo o fenômeno da interferência da luz tiveram voz, porém com particular ênfase àquelas relacionadas àquilo que chamaremos doravante de “montagens interferométricas”: montagens experimentais em que o feixe luminoso incidente é dividido de alguma maneira em *dois* feixes, e em que estes dois feixes, após uma manipulação qualquer, são recombinados de forma a gerar um padrão observável de franjas de interferência. Por vezes, mas nem sempre, estas montagens passaram à posteridade com o título de “interferômetros”.

Entretanto, o termo *interferômetro* é um tanto quanto anacrônico neste trabalho, uma vez que quase nunca foi utilizado pelos autores estudados no período em questão, que via de regra se referiam às suas montagens como “refratômetros” ou simplesmente não as caracterizavam com nenhum termo específico. No entanto, na grande maioria dos casos estudados nesta tese é possível caracterizar as montagens experimentais desta forma, isto é, como “interferômetros”, e assim o faremos, nos permitindo a licença poética do uso da

terminologia moderna para nos referirmos a montagens específicas tais como o “interferômetro” de Jamin, o “interferômetro” de Michelson, e assim por diante. Em alguns casos nos referiremos apenas a “montagens interferométricas”, em lugar de “interferômetros”, quando a montagem em questão não tiver sido adotada como um modelo padronizado de disposição de elementos ópticos utilizável em diversas aplicações distintas, mas constituir simplesmente o *setup* de apenas um experimento específico, como por exemplo as montagens interferométricas utilizadas por Fresnel e Arago para a descoberta das leis da interferência da luz polarizada (*cf.* capítulos 3 e 4), ou a montagem interferométrica do experimento de Fizeau do arrasto do éter pela água (*cf.* capítulo 6).

De toda maneira, o objetivo de caracterizar as montagens interferométricas desta forma é deixar de fora desta pesquisa outras questões e aplicações do fenômeno da interferência da luz que, embora muito importantes para o desenvolvimento da óptica e da ciência do período, constituíram abordagens ligeiramente diferentes. Um exemplo disso seria a teoria da difração da luz: embora ela tenha sido certamente fundamental para o debate sobre a natureza da luz no início do século XIX, e na prática estar intimamente relacionada à *ideia* de interferência luminosa, faremos aqui uma distinção forte entre efeitos de *difração* e efeitos de *interferência* conforme qualificados acima. Assim, a montagem experimental da “mancha de Poisson”, por exemplo, não será considerada uma montagem interferométrica, porquanto o feixe que incidia sobre o obstáculo circular para produzir o ponto luminoso no centro de sua sombra geométrica *não era* dividido em dois e depois re combinado. De fato, tratava-se de um efeito coletivo decorrente da interferência da luz que chegava ao centro da sombra geométrica oriunda *de todos os pontos* da área externa ao disco.

Num outro exemplo, mais instrumental, também ficaram de fora desta análise todas aquelas aplicações envolvendo *redes de difração*, outra importante inovação tecnológica do século XIX e que certamente teve um papel relevante na evolução da ciência do período, especialmente no que diz respeito à espectroscopia. O elemento fundamental em toda e qualquer rede de difração é a interferência de um número expressivamente grande (da ordem de centenas ou milhares) de frentes de onda refletidas ou transmitidas, não havendo, diferentemente da maioria das montagens interferométricas, nenhuma diferenciação entre a luz espalhada por um ou outro elemento da rede.

Uma ressalva precisa ser feita com respeito a duas aplicações que foram consideradas no trabalho a seguir, apesar de fugirem à regra. Trata-se dos interferômetros de Fabry-Perot e de Lummer-Gehrcke, dispositivos que fazem uso, de fato, de múltiplas refrações e reflexões, de forma semelhante, num certo sentido, às redes de difração, mas que devido à tradição têm sido considerados historicamente como “interferômetros” — de fato, podemos chamá-los de “interferômetros de feixes múltiplos” (TOLANSKY, 1955)¹¹. Neles, uma vez que o raio incidente é dividido em dois (o refletido e o refratado) a cada incidência sobre a interface, estes interferem posteriormente em função da reflexão na interface seguinte (*cf.* capítulo 9), e por

11 A confusão semântica pode ser apreciada considerando-se ainda o seguinte trecho de um importante livro-texto em interferometria:

Embora a rede de difração óptica seja tradicionalmente classificada como uma aplicação da teoria da difração em vez da interferência, ela poderia ser igualmente bem tratada como um interferômetro de feixes múltiplos no qual há interferência de muitos feixes, cada um vindo de uma ranhura da rede. (...)

Uma série de antenas espaçadas uniformemente e disposta ao longo de uma linha é análoga a uma rede, porém em radioastronomia isto é classificado como um interferômetro (STEEL, 1967, pp. 128-129)[14].

isso podem ser considerados legitimamente como montagens interferométricas no sentido que estamos atribuindo à expressão¹². Especialmente o interferômetro de Fabry-Perot veio a ter diversas aplicações importantes até hoje, e por isso também julgamos conveniente incluí-lo no rol de montagens interferométricas a serem estudadas.

Uma lista de interferômetros recentemente compilada na Wikipedia (em http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_types_of_interferometers) enumera 61 tipos de interferômetros diferentes, e ainda está longe de pretender exaurir o tema. Entretanto, muitos dos interferômetros listados são evoluções relativamente recentes (por exemplo, o interferômetro de intensidade de Hanbury-Brown e Twiss), enquanto outros podem ser considerados meras adaptações ou aplicações específicas de outros interferômetros anteriores (como o interferômetro de Twyman-Green em relação ao interferômetro de Michelson). Finalmente, há ainda um grupo de interferômetros da lista que não se encaixaria no nosso critério para “interferômetro” (por exemplo, as redes de difração, justamente), de modo que uma listagem mais realista dos principais *interferômetros* que efetivamente foram estudados nesta pesquisa pode ser resumida aos seguintes:

1. fenda dupla de Young;
2. duplo tubo de Arago;
3. interferômetro de Jamin;
4. interferômetro de Michelson;
5. interferômetro estelar;

12 W. H. Steel argumenta que “o Fabry-Perot é o equivalente para feixes-múltiplos do interferômetro de Michelson” (STEEL, 1967, p. 116).

6. interferômetro de Rayleigh;
7. interferômetro de Mach-Zehnder;
8. interferômetro de Fabry-Perot¹³;
9. interferômetro de Lummer-Gehrcke;
10. interferômetro de Sagnac¹⁴.

Evidentemente outras montagens interferométricas utilizadas em experimentos relevantes são citadas ao longo do trabalho, algumas de fundamental importância, e esta lista não deve ser encarada pelo leitor como uma espécie de fio condutor ou espinha dorsal deste trabalho.

1.5 Recorte Cronológico

O recorte temporal (ou cronológico) é por um lado mais simples, pois o primeiro estudo a mencionar o efeito da interferência da luz, ainda que de forma tímida, surgiu em 1800, com a analogia feita por Young entre o som e a luz, enquanto que os trabalhos de Fabry e Perot em que seu interferômetro era apresentado datam de 1898 e 1899, fechando o século. Em particular as últimas décadas do século XIX foram bastante prolíficas em montagens ópticas interferométricas, tendo tido em Michelson seu grande expoente.

13 Aparentemente em algumas referências francesas o nome é invertido para “interferômetro de Perot-Fabry” (STEEL, 1967, p. 8).

14 Steel dá também como sinônimo o termo “interferômetro cíclico” (STEEL, 1967, p. 8).

No entanto, é preciso ressaltar que, por um lado, efeitos de interferência eram já bastante bem conhecidos desde o século XVII, embora evidentemente não se tivesse uma explicação “interferométrica” para os mesmos, como era o caso dos anéis de Newton e das cores em filmes finos (bolhas de sabão, por exemplo). É preciso manter em perspectiva como o conhecimento destes efeitos participou da descoberta do fenômeno da interferência luminosa, e em que contexto (*cf.* capítulo 2).

Por outro lado, é preciso fazer algumas concessões a interferômetros e montagens interferométricas desenvolvidas já adentrando o século XX, uma vez que as pesquisas de muitas das questões da ciência do século XIX tiveram continuidade no início do século XX. O exemplo mais notório, e que fez uso mais agressivamente de técnicas interferométricas, é a pesquisa a respeito do movimento da Terra em relação ao éter. Não apenas a questão gerou um grande número de repetições do experimento de Michelson-Morley até pelo menos o final da década de 1920, mas também promoveu o desenvolvimento de novas montagens e pelo menos um novo instrumento importante, o interferômetro de Sagnac.

No campo conceitual, veremos como os resultados obtidos com estas montagens interferométricas influenciaram os avanços teóricos na área da óptica dos corpos em movimento, que levariam em última instância à teoria da relatividade restrita (*cf.* capítulos 6 e 7), corroboraram novas teorias de evolução estelar (*cf.* capítulo 8) e tiveram participação em outras áreas de pesquisa.

Finalmente, onde possível, pretendemos dar uma indicação, ainda que superficial, da evolução posterior da técnica, de modo que o recorte temporal no final das contas não é tão restrito quanto o título do trabalho pode fazer acreditar, abordando um período de cerca de

trezentos anos que estende-se *de facto* desde pelo menos o final do século XVII até o final do século XX.

1.6 Organização do Trabalho

O contexto em que surge a interferometria é apresentado no capítulo 2, onde se traça um resumo da evolução dos debates sobre a natureza da luz anteriormente à descoberta do fenômeno da interferência luminosa, e onde se situa o leitor no contexto da física, e em particular da óptica, do final do século XVIII e início do século XIX, relacionando os eventos, personagens e descobertas que levariam às primeiras montagens experimentais que se utilizavam do fenômeno da interferência da luz.

No capítulo 3 apresenta-se o desenvolvimento da interferometria como técnica experimental e como algumas das primeiras montagens interferométricas tinham como propósito por vezes ilustrar as características ondulatórias da luz, enquanto outras vezes constituíam recursos instrumentais, ou, ainda, de descoberta, como no caso das leis de polarização de Arago-Fresnel. Discute-se ali o papel que elas tiveram portanto no estabelecimento da teoria ondulatória da luz como novo paradigma.

As primeiras montagens interferométricas propriamente ditas (duplo tubo de Arago, interferômetro de Jamin, etc.) permitiram medir diferenças muito pequenas nos índices de refração dos materiais. São apresentadas ao longo do capítulo 4, onde também se analisa a

evolução do uso da interferometria para a medição de índices de refração (refratômetro de Rayleigh, etc.). O interferômetro desenvolvido por Ludwig Zehnder e Ludwig Mach no final do século a partir do interferômetro de Jamin é comentado.

O problema do éter luminífero é o tema do capítulo 5, onde se caracteriza a evolução dos problemas enfrentados pela teoria ondulatória da luz no que diz respeito à natureza e às características que deveria possuir este meio, do qual a luz era considerada uma perturbação. Ali diversos dados observacionais e experimentais são contrastados com os modelos teóricos, levando a uma progressiva sofisticação dos mesmos ao longo do século.

O experimento de Fizeau de 1851, suas conseqüências e as repetições do mesmo levadas a cabo por Michelson e Morley em 1886 e por Zeeman em 1914 são analisados no capítulo 6. Este experimento introduz um resultado positivo importante, estabelecendo o coeficiente de arrasto de Fresnel como um dado empírico, doravante levado em consideração num status semelhante à aberração da luz estelar¹⁵. O experimento de Babinet-Hoek é mencionado quase como um elemento de ligação com o capítulo seguinte, e a dedução relativística do coeficiente de arrasto por von Laue é apresentada.

No capítulo 7 mostra-se como os trabalhos de Faraday, Maxwell, Hertz e outros levaram a uma compreensão da luz como uma onda eletromagnética, o que posteriormente levaria a uma ruptura com a visão mecânica de mundo e o estabelecimento de uma teoria de campos na física. Neste capítulo também é introduzido o interferômetro de Michelson e as tentativas de medição do “vento de éter”, e se discute o que levou Michelson e Morley a realizarem o seu famoso experimento de 1887. Analisa-se as implicações do resultado nulo do

¹⁵ Por sua vez explicado no capítulo 5.

experimento na física da época, por exemplo, no desenvolvimento da teoria do elétron de Lorentz e na hipótese da contração de FitzGerald-Lorentz. O leitor é apresentado ainda a dois pontos pertinentes ao tema: uma discussão do papel dos experimentos de Fizeau e de Michelson e Morley na gênese e na aceitação da teoria da relatividade restrita de Einstein e um relato dos esforços de diversos pesquisadores (Dayton Miller, Sagnac, etc.) para, através de sofisticadas montagens interferométricas, detectar um “vento de éter” no início do século XX.

O capítulo 8 mostra algumas aplicações da interferometria à astronomia, começando por uma ideia de Fizeau para medir os diâmetros das estrelas e os problemas associados à sua execução no Observatório de Marselha. A seguir relata-se a provável reinvenção do método por Michelson e a primeira medição bem-sucedida do diâmetro de uma estrela, contextualizando-se o feito dentro do quadro da astrofísica estelar teórica da época.

O princípio básico e a evolução da espectroscopia interferométrica são apresentados no capítulo 9, onde também se discute a redefinição do metro pelo Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) em termos do comprimento de onda de uma linha espectral específica, além do interferômetro de Fabry-Perot e a placa de Lummer-Gehrcke.

Finalmente, na conclusão (capítulo 10), lembramos o propósito do trabalho e como os diversos episódios analisados corroboram a tese de que o desenvolvimento das técnicas interferométricas foi significativamente mais relevante do que o comumente acreditado para o estabelecimento da teoria ondulatória da luz no século XIX e para a evolução dos conceitos da física e de outras disciplinas ao longo dos dois últimos séculos.

2 O Contexto em que Surge a Interferometria

“The science of optics is one of the most elegant, and the most important branches of natural and mechanical philosophy. It presents us with experiments attractive by their beauty and variety, with investigations affording an ample scope for mathematical refinements, and with instruments of extensive utility both in the pursuit of other sciences, and in the common employments of life; nor is there any department of the study of nature in which an unprejudiced observer is more convincingly impressed with the characteristic marks of the perfect works of a supremely intelligent Artist.”¹⁶

Thomas Young

2.1 Os Anéis de Newton e a Questão das Cores *circa* 1800

Thomas Young foi, sem sombra de dúvida, um homem fora do comum. Normalmente descrito como um “polímata”, Young deu contribuições a diversas áreas do conhecimento, desde as técnicas de construção naval e a resistência dos materiais até a fisiologia da visão e a decifração dos hieróglifos egípcios¹⁷. Na óptica Young será sempre lembrado como o

16 “A ciência da óptica é um dos ramos mais elegantes e mais importantes da filosofia mecânica e natural. Ela nos apresenta experimentos atraentes por sua beleza e variedade, investigações que permitem um amplo escopo para refinamentos matemáticos e instrumentos de extensa utilidade tanto nas buscas de outras ciências quanto nos empregos comuns da vida; nem há qualquer departamento do estudo da natureza em que um observador isento de preconceitos seja impressionado de forma mais convincente pelas marcas características dos trabalhos perfeitos de um Artista supremamente inteligente” (YOUNG, 1845, p. 320, tradução nossa).

17 Educado na tradição quacre de estudos disciplinados, aprendeu ainda em criança diversos idiomas, e, muito brilhante, na faculdade ganhou o apelido de “Young fenômeno”. Como se fosse pouco as inúmeras contribuições científicas que deu, Young ainda teve uma carreira como médico e era um incansável divulgador da ciência. Seus múltiplos interesses eram de fato tão impressionantes que pelo menos dois de seus biógrafos não resistiram a arrolá-los em curiosos (e longos) subtítulos. Em 1954 Alex Wood publicou “Thomas Young, Natural Philosopher (1773-1829) – *fellow* e secretário para o estrangeiro da Royal Society, membro do Instituto Nacional da França; um homem igualmente eminente em quase todos os departamentos do aprendizado humano. Paciente de labor inintermitente, agraciado com a faculdade da percepção intuitiva, que,

descobridor do princípio da interferência da luz e um dos artífices da revolução óptica do início do século XIX.

A “inauguração” da interferometria deu-se ao longo do período que vai de 1800 a 1807. A origem do interesse de Young pelo tema, no entanto, pode ser rastreada até pelo menos 1798, quando conduziu as investigações sobre a relação entre o som e a luz que formariam o ponto de partida de seu artigo de 1800, intitulado “Experimentos sobre o Som e a Luz” (YOUNG, 1800), e de sua teoria da interferência da luz. Depois Young apresentou um relato mais detalhado de sua teoria da interferência na palestra *bakeriana* “Sobre a Teoria da Luz e Cores” (YOUNG, 1802); porém “(o) primeiro experimento a lançar sérias dúvidas sobre a visão corpuscular foi uma demonstração da interferência da luz por Young em 1803” (SHAMOS, 1959, p. 94) no contexto das franjas de Grimaldi¹⁸, apresentado em outra palestra *bakeriana*, “Experimentos e Cálculos Relativos à Óptica Física” (YOUNG, 1804), onde Young resumiu suas observações sobre interferência e apresentou novos fenômenos correlatos. Em 1807 Young republicaria diversos de seus resultados em partes de seu “Curso de Palestras sobre Filosofia Natural e as Artes Mecânicas”, apresentando aí também o experimento da fenda dupla (YOUNG, 1845 – ver especialmente a palestra 39 à p. 364).

trazendo igual maestria para as mais abstrusas investigações das letras e ciências, primeiro estabeleceu a teoria ondulatória da luz, e primeiro penetrou a obscuridade que havia velado por eras os hieróglifos do Egito” (WOOD, 1954), enquanto em 2006 Andrew Robinson publicou “O Último Homem que Sabia Tudo – Thomas Young, o polímata anônimo que provou que Newton estava errado, explicou como enxergamos, curou os doentes e decifrou a Pedra de Rosetta, entre outros feitos de gênio” (ROBINSON, 2006). Apesar de caricatos, estes subtítulos dão uma dimensão do quão variadas foram as contribuições de Young. A biografia clássica de Young no entanto tem um título muito mais discreto: “The Life of Thomas Young, M.D., F.R.S.”, escrita por George Peacock, que também publicou uma compilação dos trabalhos de Young (PEACOCK, 1855).

18 Mais a respeito no capítulo 3.

Uma questão subjacente ao final dos trabalhos de Young era como explicar as características dos anéis de Newton em termos ondulatórios¹⁹. Os anéis de Newton eram um sistema de anéis coloridos concêntricos que um observador via ao olhar de cima para baixo em direção a uma lente convexa suave apoiada sobre uma placa plana de vidro sob iluminação de luz branca. O efeito periódico fora observado por Isaac Newton (1643-1727²⁰) um século antes, e para explicá-lo num contexto corpuscular Newton lançara mão de um conceito híbrido, os *fits* de fácil reflexão e de fácil transmissão, segundo o qual as partículas de luz seriam mais facilmente refletidas em determinadas regiões do sistema e mais facilmente transmitidas em outras regiões, que se seguiam periodicamente em função da rarefação e condensação de um “éter” partícipe da coesão dos corpos e que interagia com as partículas luminosas.

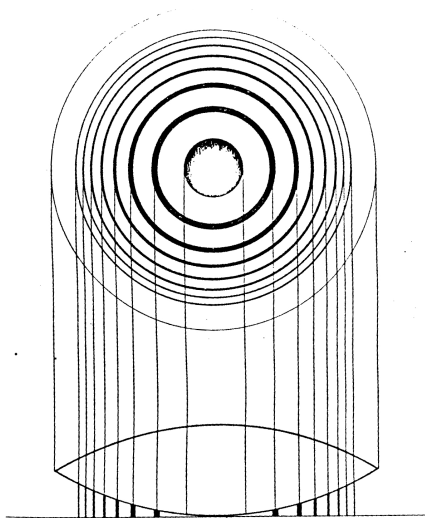


Fig. 2.1 – Anéis de Newton sob iluminação monocromática. A parte superior da figura busca reproduzir o sistema de anéis observado ao se olhar de cima para baixo através da lente convergente prensada sobre uma placa plana de vidro. A região central é escura, com regiões mais claras e mais

19 Uma descrição da história dos “anéis coloridos” pode ser encontrada em ARAGO, 1858i. Ver também ARAGO, 1858c.

20 Newton nasceu no dia de Natal de 1642 pelo calendário juliano então ainda vigente na Inglaterra. A correção para o calendário gregoriano traz seu nascimento para o dia 4 de janeiro de 1643, no entanto.

escuras se sucedendo cada vez mais proximamente uma da outra em função da variação na espessura da fina camada de ar entre a lente e a placa. Regiões claras corresponderiam aos *loci* de fácil reflexão, enquanto as escuras às posições dos *fits* de fácil transmissão. (WESTFALL 1989, p. 59).

Por que a questão de Young era importante? Porque a explicação para as cores dos objetos em Newton ainda era objeto de debate no final do século XVIII. A natureza das cores, mais do que qualquer outra questão, parece ter sido o tópico mais controvertido na óptica do período. À esta época, com a reputação de Newton já estabelecida, é fácil compreender como, “através da maior parte do século XVIII, a questão de por que os objetos são coloridos da maneira que eles são era respondida com referência ao *Opticks* de Newton” (LEVITT, 2009, p. 21). De fato, a óptica do século XVIII seria dominada pelas discussões levantadas pelos trabalhos de Newton sobre a luz, em particular aqueles apresentados no livro *Opticks*. A obra, publicada no ano seguinte ao falecimento de Robert Hooke (1635-1703), com quem Newton havia alimentado uma ríspida e longeva rivalidade desde as primeiras críticas de Hooke às ideias iniciais de Newton sobre o tema (NEWTON, 1672), trazia não apenas uma síntese das descobertas de Newton sobre “o fenômeno das cores”²¹ e suas ideias a respeito da maioria dos fenômenos ópticos conhecidos à época, mas também uma nova abordagem metodológica. Escrita originalmente em inglês (e não em latim, como o *Principia*²²), a obra trazia ainda em sua seção final (livro terceiro) uma série de questões (*queries*), colocadas de forma retórica²³, ao longo da qual Newton elaborava seus pensamentos sobre uma diversidade de fenômenos e

21 A composição da luz branca.

22 Houve, no entanto, uma edição subsequente em latim (NEWTON, 1706).

23 Ou seja, em lugar de afirmar que acreditava que os corpos agiam sobre a luz a distância, por exemplo, Newton escrevia: “[N]ão agem os corpos sobre a luz a distância, e por sua ação entortam seus raios, e não é esta ação (*cæteris paribus*) tão mais forte quanto menor a distância?” (NEWTON, 1730, p. 313)

suas relações (NEWTON, 1704; 1717; 1721 e 1730).

No entanto, apesar deste reconhecimento,

(u)ma onda de críticas à ‘Teoria de Newton’ apareceu na França na década de 1790. (...) Poucas pessoas objetavam a seu trabalho com a decomposição da luz ou mesmo ao relato fenomenológico²⁴ dos anéis de Newton. O que ficou mesmo sob fogo, entretanto, foi a reivindicação de que as cores dos corpos naturais podiam ser tratadas como as cores dos anéis de Newton, e assim explicadas em termos inteiramente analíticos²⁵ (LEVITT, 2009, p. 23)[ii1].

Por outro lado, depois da bem-sucedida redução da acústica à mecânica no século XVIII, era natural que se buscasse promover outras tentativas de matematicamente reduzir outros campos da *physique particulière* às leis gerais da mecânica, por exemplo a óptica e a teoria das cores, e assim havia uma ambiguidade de propostas. De fato,

(p)ode-se pensar que as cores dos anéis de Newton eram um tópico obscuro, mas não era. Na época em que Arago e Biot estavam escrevendo²⁶, o tópico era o mais importante no campo da óptica. (...) De fato, dentro das próprias instituições que formaram Arago e Biot havia uma divisão de opinião (...) sobre a teoria das cores de Newton (LEVITT, 2009, p. 20)[ii2].

Um novo e importante elemento da cultura científica introduzido ao longo do século XVIII a partir da universidade de Leiden, na Holanda, foi a física experimental curricular. A partir daí as universidades passariam a contar com “gabinetes” (laboratórios didáticos) de física, com o objetivo de reproduzir demonstrações e experimentos considerados importantes para a

24 Já a explicação do fenômeno em termos de *fits* de fácil reflexão e de fácil transmissão seria motivo de diversas críticas, mesmo na Inglaterra, por exemplo com o astrônomo William Herschel (1738-1822)(HERSCHEL, 1807; 1809 e 1810).

25 Goethe, por exemplo, o famoso poeta alemão, viria a sugerir uma nova “teoria das cores”, em oposição à teoria newtoniana, baseada mais nas percepções das cores em sombras do que propriamente em propriedades mensuráveis (“analíticas”).

26 Tanto Arago quanto Biot tiveram vidas longevas e muito produtivas, de forma que a citação fora de contexto é ambígua. A autora se refere nesta passagem ao início de suas carreiras, nos primeiros anos do século dezenove.

apropriação dos principais conceitos dos modelos físicos mais relevantes em mecânica, hidráulica, pneumática, óptica e acústica²⁷. Novas gerações de pensadores passaram a ser formadas com um contexto experimental diferente, mais voltado para a matematização de grandezas controláveis através de experimentos. Os reflexos não se fizeram tardar. Na França, onde o *establishment* físico-matemático dos “geômetras” levaria a mecânica newtoniana a seus estertores, com a revolução de 1789

(u)ma transformação social rompeu o antigo sistema de status e o substituiu pela promessa de mobilidade. Este novo foco naquilo que a pessoa faz, ao invés daquilo que a pessoa é, impactou o reino científico tanto quanto o reino cívico, produzindo uma mudança do sábio generalista autodidata para o físico de carreira moldado pelas novas instituições profissionais francesas (LEVITT, 2009, p. 7)[ii3].

O advento das *Hautes Écoles*²⁸ trouxe um novo patamar à formação científica e logo estas instituições foram incorporadas ao “fazer ciência”, porém reproduzindo a dicotomia presente nas discussões científicas vigentes:

(q)uando o *Cours révolutionnaire* começou em 1794, vários dos instrutores fizeram da crítica da cor newtoniana uma parte central de seus cursos (...). Como o professor de física²⁹, Hassenfratz, afirmou em 1795, o estudo da cor, ‘estagnado a partir do instante em que Newton findou suas pesquisas, tem se expandido consideravelmente na *École Polytechnique* nos últimos seis meses *através dos numerosos experimentos* que ali têm sido realizados’. Em cursos tão diversos quanto desenho, geometria descritiva e física, uma única reclamação vinha à superfície: a abordagem analítica para a cor era insuficiente. Cada um deles disparava contra a teoria

27 Algumas dessas montagens experimentais são surpreendentemente perenes, sendo utilizadas até hoje em laboratórios didáticos de escolas e universidades. O Museu Boerhaave em Leiden guarda em seu acervo boa parte dos itens clássicos do gabinete de Leiden, que podem ser vistos no programa da exposição (de CLERCQ, 1989).

28 A *École Normale Supérieure*, a *École Polytechnique*, a *École de Ponts et Chaussées*, etc.

29 Theresa Levitt, citando o historiador da ciência estadunidense Alan Shapiro, nota que o termo “física” tinha à época ainda um significado de transição entre o significado que tinha no século XVIII, isto é, o de estudo geral da natureza, e o que a ele seria atribuído no século XIX, relacionado a uma disciplina específica. A maior parte do trabalho de Hassenfratz tinha a ver com o que hoje classificaríamos como química.

newtoniana da cor como sendo excessivamente abstrata e autoritária (LEVITT, 2009, p. 24, grifos nossos)[ii4].

A crítica no entanto era não apenas de certa forma incorreta, mas também se mostraria inócua, pois a teoria ondulatória da luz eventualmente triunfaria *justamente* por sua capacidade de fazer previsões matemáticas (analíticas) para os fenômenos ópticos, inclusive aqueles relacionados às cores (por exemplo no caso dos anéis de Newton ou da polarização cromática):

(a) o fazer [a comparação entre as teorias ondulatória e corpuscular da luz] não é suficiente ficar em explicações vagas que possam ser moldadas para se adequar a qualquer teoria. Qualquer que seja a aparente simplicidade de uma hipótese – qualquer que seja sua analogia com leis conhecidas – é apenas quando ela é passível de expressão matemática, e quando as suas consequências matemáticas podem ser numericamente comparadas com fatos estabelecidos, que a verdade pode ser completa e finalmente verificada (LLOYD, 1834, p. 19 *apud* CHEN, 2000, p. 118) [ii5].

De fato, numa síntese dialética,

(a) ‘nova óptica’ combinava análise matemática quantitativa com precisão experimental, e marcou a transição da filosofia natural do século dezoito para o campo distinto da física (BUCHWALD, 1989 *apud* LEVITT, 2009, p. 3)[ii6],

levando a historiadora da ciência Theresa Levitt a observar que

(h)istórias da ciência clássicas há muito têm reconhecido o desenvolvimento da óptica na França nas primeiras décadas do século XIX como um momento seminal na criação de uma física matemática rigorosa (LEVITT, 2009, p. 3).

Tudo isto teve início, ou pelo menos pode ser bem representado, com a intenção expressa por Young ao aplicar o princípio da interferência ao estudo dos anéis de Newton.

Supondo-se que a luz de qualquer dada cor consiste de ondulações, de uma certa extensão [comprimento de onda], ou de uma certa frequência, segue-se que estas ondulações devem estar sujeitas àqueles efeitos que já examinamos no caso das ondas de água, e dos pulsos de som. Foi mostrado que duas séries iguais de ondas, procedendo a partir de centros próximos um do outro, devem destruir os efeitos uma da outra em certos pontos, e em outros pontos redobrá-los; e o batimento de dois sons foi explicado a partir de uma interferência similar. Agora vamos aplicar os

mesmos princípios à união e à extinção alternadas das cores (YOUNG, 1845, p. 364) [ii7].

Young percebeu que “[u]m método ainda mais comum e conveniente de exhibir os efeitos da interferência mútua da luz nos é oferecido pelas cores das lâminas finas de substâncias transparentes” (YOUNG, 1845, p. 367) e a partir daí estabeleceu então uma relação entre a interferência da luz, que considerava responsável pelo surgimento das franjas nos experimentos de Grimaldi, por exemplo, e as cores em filmes finos:

Do acordo das medidas, e da similaridade dos fenômenos, podemos concluir que estes intervalos³⁰ são os mesmos que os relativos à produção das cores em placas finas; mas mostra-se, pelos experimentos de Newton, que estes [intervalos] são tanto menores quanto mais denso o meio³¹; e, uma vez que se pode presumir que seu número permanece inalterado em uma dada quantidade de luz, segue-se evidentemente que a luz se move em um meio mais denso mais lentamente do que em um meio mais rarefeito: isto sendo assegurado, deve-se conceder que a refração não é o efeito de uma força atrativa dirigida a um meio mais denso³² (YOUNG, 1804, p. 12)³³[ii8].

Com isso Young “amarrava” a explicação dos anéis de Newton e do fenômeno correlato das cores em filmes finos às franjas dos experimentos de Grimaldi com a inflexão da luz e à teoria ondulatória, de uma forma elegante e heurísticamente promissora.

30 Young refere-se aqui aos intervalos nos quais a luz periodicamente se anula no experimento de Grimaldi das franjas observadas no interior da sombra geométrica de um objeto, e a outras observações reportadas pelo padre jesuíta italiano.

31 Isto é, o comprimento de onda diminui em meios mais densos (SHAMOS, 1959, p. 100).

32 Arago chegaria à mesma conclusão analisando um experimento semelhante. Este e outros aspectos da relevância do fenômeno da refração para a discussão da natureza da luz serão discutidos em mais detalhes no capítulo 4.

33 Morris Shamos (SHAMOS, 1959, p. 95) toma como referência a data em que a palestra bakeriana foi proferida (24 de novembro de 1803) para datar a referência como YOUNG, 1803. Preferimos seguir a convenção usual de datar pela data de publicação do texto (nas *Philosophical Transactions* de 1º de janeiro de 1804).

2.2 O Mito do Debate Polarizado sobre a Natureza da Luz

Uma *outra* questão era a natureza da luz. Embora em geral não fossem constituídos para *explicar* a natureza da luz, muitos dos modelos introduzidos para explicar determinados conjuntos de fenômenos ópticos precisavam necessariamente fazer suposições sobre a natureza da luz. Inicialmente estes “modelos” (ver questão semântica em HAKFOORT, 1995) e experimentos visavam afirmar a luz como um fenômeno “mecânico” (isto é, “material”) em contraposição à visão de “qualidade” aristotélica que existia previamente – e nesse sentido não era tão importante se a luz era uma partícula ou uma onda, conquanto fosse uma explicação “mecânica” ou material.

Mas de acordo com uma visão dualística relativamente recente da história da óptica, o debate entre as teorias corpusculares e ondulatórias da luz era o problema *central* da óptica, desde os trabalhos de Newton e do filósofo natural holandês Christiaan Huygens (1629-1695) no final do século XVII até pelo menos a década de 1830. Desta maneira, quer-se fazer crer que toda a óptica do século XVIII foi construída em torno deste debate, que teria então avançado até pelo menos as primeiras décadas do século XIX, quando a teoria ondulatória se estabeleceu como o paradigma vigente de maneira inquestionável (ou quase, como veremos). Se isto fosse verdade, a chamada “revolução óptica” teria durado pelo menos 140 anos.

A relevância do debate sobre a natureza da luz, bem como sua polarização entre modelos estritamente ondulatórios e corpusculares, foi construída entretanto *a posteriori*. A longevidade do debate bipolarizado sobre a natureza da luz parece ser um mito, cuja construção foi permitida por dois motivos. Em primeiro lugar, o que era chamado de teoria

corpuscular da luz e o que era chamado de teoria ondulatória da luz pela metade do século XIX simplesmente não existiam como tal à época de Newton e Huygens, ou mesmo na primeira metade do século XVIII. Os trabalhos historiográficos em óptica escritos a partir da segunda metade do século XIX tendiam a pecar portanto por presentismo, avaliando as obras de períodos anteriores fora de seu contexto original, e pautando-as como base de comparação para as questões científicas e o conhecimento físico e astronômico de seu próprio tempo. Em segundo lugar, de um modo mais sutil, a maneira pela qual a ciência de um tempo coloca suas questões pode também ser transplantada para o passado. Assim, na década de 1920 uma questão fundamental para a óptica era (e aqui é justamente tentador acrescentar o advérbio “novamente”, tamanho o condicionamento alcançado por esta historiografia) se a luz consistia de um jato de partículas emitidas (*quanta* de luz) ou de um movimento ondulatório, num claro paralelo com os debates sobre a natureza da luz no início do século XIX³⁴. Portanto pareceria apenas natural estender esta abordagem dualística e compreender os debates em óptica do final do século XVII e da primeira metade do século XVIII nos mesmos termos (HAKFOORT, 1995, pp. 4-5).

No entanto, antes dos trabalhos em óptica do matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783), e mesmo nos trabalhos do próprio Newton, era comum encontrar modelos explicativos que congregavam elementos posteriormente associados a uma ou outra tradição³⁵:

34 A pergunta de fato era tão boa que a mecânica quântica só iria conseguir superá-la, já findo o primeiro quarto do século XX, ao inventar uma nova entidade englobando as duas características, a “onda-partícula”.

35 Foi esta característica híbrida, ou ambígua, que permitiu a Young citar longos trechos das obras de Newton em óptica para defender seu modelo ondulatório nos primeiros anos do século XIX (YOUNG, 1802), ao mesmo tempo em que era fustigado pelo lado adversário com argumentos tirados do próprio Newton (por exemplo, BROUGHAM, 1803).

[Newton] chegou mesmo até a oferecer a Hooke sugestões para completar a sua [de Hooke] teoria *mediada* da luz. Uma de suas dicas interessantes era a ligação das cores com as ‘diversas profundidades ou grandiosidades’ das vibrações do éter, análogas à variedade das vibrações no ar que produziam diferentes tons [sonoros]. Newton estava provavelmente pensando em comprimentos de onda e não em amplitudes. Hooke não seguiu esta sugestão, mas a analogia entre som e luz continuou a ser feita frequentemente, garantindo que o conceito de periodicidade reemergisse (HAKFOORT, 1995, pp. 17-18)[ii9].

Na citação acima preferimos usar o termo “mediada” em vez de “ondulatória”, acompanhando Hakfoort na compreensão de que o último causaria uma ambiguidade e poderia fazer confusão com as teorias ondulatórias da luz do século XIX, por exemplo. A principal característica das teorias mediadas do final do século XVII e início do XVIII é justamente que a ação luminosa não podia prescindir da ação de um meio intermediário (*medium*), mas isso não implicava necessariamente a propagação de uma onda no sentido moderno do termo (significando uma perturbação periódica contínua). Huygens, por exemplo, fala de pulsos.

Para que seja possível elaborar com clareza o que aconteceu no debate em óptica ao longo do século XVIII é preciso primeiramente esclarecer uma questão fundamental de terminologia. É comum que ao longo do tempo, e por influência de diversos autores, o termo “teoria” se refira a coisas distintas. Um exemplo dado pelo historiador da ciência holandês Casper Hakfoort envolve a comparação entre o significado do termo em três instâncias: quando se refere à “teoria óptica” de Newton nas *queries* do *Opticks*; quando se refere à “teoria da luz” do sábio holandês Willem Jacob 's Gravesande (1688-1742); e quando se refere à “teoria da emissão (corpúscular) no século XVIII”. Em cada caso o termo denota entidades heurísticamente distintas, quais sejam, respectivamente, uma *hipótese*, uma *teoria (stricto sensu)*

e finalmente uma *tradição* (HAKFOORT, 1995, p. 7).

É importante, para a discussão que se seguirá, perceber que de fato para Newton a ideia de que a luz seria constituída de um jato de partículas ou corpúsculos constituía uma hipótese (ainda que manifestamente reticente³⁶), e, o que é mais importante, sua teoria das cores lhe parecia *totalmente independente* de qualquer hipótese (causal) sobre a natureza última da luz, *i. e.*, era uma teoria “descritiva” (e não “explicativa”). Esta reivindicação epistemológica parece ter sido incorporada nos trabalhos e debates subsequentes, de modo que podia-se aceitar a teoria das cores de Newton sem compartilhar de sua preferência por um modelo dentro da tradição corpuscular (HAKFOORT, 1995, p. 8). A questão central, para os contemporâneos de Newton que professavam uma visão mecanicista de mundo, era a da defesa da *materialidade* da luz, em oposição à visão aristotélica dos raios de luz como *qualidade* (e não como *substância*)³⁷. Portanto, a discussão sobre se a natureza material da luz era corpuscular ou ondulatória consistia numa dissensão interna e, neste contexto, menor.

O próprio Newton, ao contrário do que faz parecer a historiografia de períodos subsequentes, jamais subscreveu sem reservas a hipótese corpuscular, pelo menos por escrito.

36 Pois, como se sabe, a abordagem metodológica de Newton, em geral, não pretendia levantar hipóteses sobre as causas últimas dos fenômenos, o que em outro contexto culminou com seu famoso adágio, “*hypothesis non fingo*”.

37 A propósito, é este contexto, juntamente com uma abordagem metodológica inovadora, que dá ao trabalho de Newton em óptica a sua dimensão revolucionária, fato pouco apreciado quando não se aqilata como a luz e as cores eram compreendidas e tratadas dentro da tradição prévia. Há que se notar, no entanto, que como para Newton a sua teoria das cores prescindia de qualquer hipótese explicativa, sendo baseada completa e unicamente em experimentos, uma das críticas feitas por seus contemporâneos foi justamente a de que a teoria newtoniana das cores não oferecia ou implicava necessariamente nenhuma explicação mecânica para as cores (HAKFOORT, 1995, p. 17) e, portanto, de certa forma não podia servir para descartar inequivocamente as ideias aristotélicas em favor de uma visão mecânica de mundo.

Em particular, na carta que Newton escreveu em 1672 para Henry Oldenburg (*ca.*1618-1677), primeiro secretário da recém-fundada³⁸ Royal Society, na qual relatava seus experimentos e conclusões sobre a teoria das cores, a questão da materialidade da luz aparecia prioritariamente logo à primeira proposição: “(...) [As] cores não são *qualificações da luz*, derivadas de refrações ou reflexões dos corpos naturais (como se crê em geral), mas *propriedades originais e conatas* que são diversas em raios diversos” (NEWTON, 1672, p. 3081, grifos no original), e ainda mais à frente, na conclusão³⁹, enquanto a questão da natureza da luz era mencionada apenas de forma enigmática: “porém, não é tão fácil determinar de maneira mais absoluta o que a luz é, de que maneira é refratada e por quais modos ou ações são produzidos em nossas mentes os fantasmas⁴⁰ das cores” (NEWTON, 1672, p. 3085).

Suas conjecturas nas *queries* pareciam-se mais com sugestões relativamente vagas do que com firmes convicções, o que soava consistente com as opções metodológicas e epistemológicas de Newton. Entretanto, e apesar dos esforços em contrário de Young, o nome e a autoridade de Newton acabariam encampados pelo lado corpuscular de uma maneira tão completa que uma vez encerrado o debate, em meados da primeira metade do século XIX, e vencedora a causa ondulatória, a historiografia contemporânea da óptica lamentaria que o peso de Newton tivesse “desviado a ciência do caminho correto” por mais de um século (por exemplo, ARAGO, 1830, p. 123), opinião que ainda hoje encontra eco na cultura científica.

38 Em 1660.

39 E mesmo de uma forma um pouco confusa, pois Newton aí emprega os termos “corpo” e “substância” de maneira pouco clara. Embora no trecho em questão Newton esteja certamente fazendo uma defesa da materialidade (mecânica) da luz, em contraposição à visão aristotélica, *a posteriori* o trecho pôde ser interpretado como se Newton aí defendesse uma visão corpuscular para a natureza da luz.

40 Isto é, as sensações das cores.

Mesmo o historiador da ciência Thomas Kuhn desliza e escreve, em sua famosa e ultracitada obra “A Estrutura das Revoluções Científicas”, que

(...) a teoria ondulatória não foi a primeira das concepções a ser aceita pelos praticantes da ciência óptica. Durante o século XVIII, o paradigma para este campo de estudos foi proporcionado pela *Óptica* de Newton, a qual *ensinava que a luz era composta de corpúsculos de matéria* (KUHN, 1992, p. 32, grifos nossos).

Outra coisa a se considerar, de natureza heurística, é como Newton pensava suas hipóteses sobre o comportamento da luz e sua natureza de uma maneira intimamente relacionada com outros fenômenos e propriedades de um universo mecânico. Assim, por exemplo, a inflexão (difração) da luz conforme relatada nos trabalhos do padre jesuíta italiano Francesco Maria Grimaldi⁴¹ (1618-1663) (GRIMALDI, 1665) podia ser entendida como uma ação das partes constituintes das bordas dos corpos sobre os raios de luz que lhes passavam próximos, e a forma matemática com que se dava esta ação podia ser especulada a partir dos fenômenos ópticos observados nestes casos⁴².

No afã de facilitar a entrada das ideias newtonianas na França setecentista⁴³, um de

41 ou Francisco Maria Grimaldo, como grafado originalmente na obra.

42 Mesmo a reflexão e a refração em Newton eram entendidas como processos localizados ao longo de uma certa extensão (e não restritos à superfície matemática da interface), e intermediados pela maior ou menor concentração do éter coesivo nas proximidades dos corpos (HAKFOORT, 1995, pp. 33-35). É preciso lembrar que mesmo (e talvez principalmente) em Newton os modelos explicativos eram continuamente mudados, e se falamos numa “explicação” de um fenômeno, de uma forma assim simplificada, trata-se em geral de uma última explicação, após a elaboração de diversas explicações-tentativas, ou numa explicação “genérica”, cujos detalhes específicos podem ter sofrido alterações significativas ao longo da obra do autor (*cf.* por exemplo as alterações nas queries de diferentes edições do *Opticks*); de outra forma a narrativa seria muito truncada.

43 É curioso notar como o debate em torno das ideias de Newton na França foi muito mais profícuo que na própria Inglaterra, devido ao peso da tradição cartesiana na primeira. Os convertidos franceses tiveram que se esforçar muito mais para demonstrar a superioridade do modelo mecânico newtoniano sobre a visão de mundo cartesiana, e no processo dotaram a teoria de Newton de novas explicações, previsões e comprovações. Neste processo de “aculturação” da teoria newtoniana na França, a leitura mais analítica por parte de três

seus “evangelistas”, Clairaut, decidiu atacar a questão da forma das forças de curto alcance que agiriam sobre as partículas luminosas na proximidade de um corpo ou da interface entre dois meios. Clairaut buscou estabelecer uma equivalência entre o problema de explicar tanto a refração quanto a capilaridade em termos de ações de curto alcance próximas às interfaces dos meios, abordagem retomada por Laplace posteriormente. O problema da determinação da forma das forças foi resolvido por Laplace considerando-as de tão curto alcance que no processo de integração a forma exata da força não importava (HEILBRON, 1993, pp. 150-158).

Para ter uma ilustração de como as ideias cartesianas por vezes se amalgamaram a conceitos importados de Newton no cadinho da cultura científica francesa do século XVIII, basta notar o modelo proposto pelo filósofo natural Dotours de Mairan em um trabalho de 1717 originalmente voltado para o fenômeno da luminescência⁴⁴. No sistema de de Mairan um meio etéreo ainda preenchia o espaço intersidereal e seu turbilhonamento era responsável por arrastar os planetas em suas órbitas, como no *plenum* de Descartes, porém ele não participava dos fenômenos luminosos, que eram explicados como na teoria da emissão pela ejeção por parte dos corpos luminosos de *outro* tipo de matéria, os corpúsculos luminosos. Para endereçar as objeções evidentes de que as partículas luminosas deveriam ser retardadas pela presença do meio e que o Sol deveria diminuir de tamanho ou perder massa ao emitir tamanha quantidade de partículas por tanto tempo (objeção aplicável aliás a qualquer teoria de

gerações de sábios franceses dedicados à tarefa foi produzindo ao longo do século uma versão mais ascética e ateia do newtonianismo, que se convencionou chamar *laplacianismo* em virtude de ter chegado ao seu ponto culminante com os trabalhos do marquês de Laplace e seus pares já próximo à virada para o século XIX.

44 Em que, no entanto, o nome de Newton não é citado diretamente.

emissão), de Mairan adiantou que o seu éter deveria oferecer uma resistência próxima de zero e que ou as partículas luminosas deveriam ser extremamente tênues e leves, ou a perda de massa deveria ser compensada pela absorção de outras partículas luminosas (a partir das estrelas, por exemplo), ou ainda pela absorção de partículas de outra natureza que poderiam ser convertidas de alguma maneira em partículas luminosas (HAKFOORT, 1995, pp. 39-40). Ao abordar especificamente a questão da luminescência, de Mairan introduz uma série de outras “explicações”, fazendo referência também à reflexão⁴⁵ e à refração da luz e ao tamanho (variável, mas sempre maior que as partículas do éter) e formato (esférico) das partículas luminosas. O ponto mais importante a salientar é que o exemplo de de Mairan mostra que era possível incorporar uma teoria da emissão *à la* Newton sem necessariamente precisar importar também o conceito de vácuo newtoniano e a ação a distância.

A mais importante fonte de divulgação da teoria da emissão “newtoniana” no início do século XVIII, mesmo na Inglaterra, foi o livro-texto escrito pelo filósofo natural holandês 's Gravesande, publicado entre 1720 e 1721⁴⁶. Influenciado pelo filósofo natural e químico Boerhaave, a abordagem de 's Gravesande parecia considerar a luz como “fogo emitido”. Não há no livro tampouco qualquer menção à busca de Newton por uma explicação para as forças que agem sobre as partículas de luz e para os *fits* de fácil reflexão e transmissão da luz nos anéis de Newton como sendo devidos à ação (sobre as partículas luminosas) de um éter tênue e elástico. Ou seja, a teoria de 's Gravesande era uma espécie de versão “purificada” das ideias

45 De Mairan explicava a reflexão em termos de colisões mecânicas entre as partículas de luz e os corpos, não incorporando as sofisticadas explicações newtonianas (publicadas no mesmo ano, na edição do *Opticks* de 1717) que usavam a ideia de forças de curto alcance (HAKFOORT, 1995, p. 41).

46 Uma segunda edição seria lançada em 1742, sem alterações significativas a não ser a menção à atualização em função da ideia das forças de curto alcance.

de Newton. A principal objeção levantada por 's Gravesande contra as teorias mediadas dizia respeito ao que era transmitido pelo meio, se uma pressão ou um movimento, o que evidencia o quanto a teoria de Huygens já havia sido esquecida em favor de teorias mais próximas da cartesiana⁴⁷ (HAKFOORT, 1995, pp. 42-44).

Outro importante propagador do newtonianismo no continente neste período foi o holandês Petrus van Musschenbroek⁴⁸. Em sua visão, publicada em seu “*Elementa*” de 1734, como na de 's Gravesande, as partículas luminosas (ou “de fogo”) constituíam uma espécie de fluido muito tênue, e boa parte da argumentação tinha origem em fenômenos químicos relacionados à emissão ou absorção de luz. Van Musschenbroek postulou que diferentes tipos de matéria (como fogo, eletricidade ou corpos materiais em geral) eram qualitativamente distintos – visão que influenciaria a cristalização ao longo do século do conceito de “fluidos imponderáveis”, isto é, de “substâncias de pouco ou nenhum peso, distinguíveis umas das outras por suas propriedades tanto químicas quanto físicas” (HAKFOORT, 1995, p. 47).

Diferentemente de 's Gravesande, van Musschenbroek tentava endereçar a questão dos *fits*, postulando de forma retórica a existência não de um éter mas de uma “força ondulante” que emanaria da superfície das substâncias e seria responsável por refletir ou deixar passar as partículas de luz em diferentes regiões da superfície. A ideia desapareceria da edição seguinte (1741) e não mais retornaria, de modo que uma importante descoberta experimental de Newton, mas que causava dificuldades à consistência de uma versão purificada (sem éter) da

47 Nas quais a luz era compreendida como uma pressão transmitida ao longo do meio da fonte de luz até os olhos do observador, na visão original de Descartes com uma velocidade infinita.

48 De fato, Boerhaave, 's Gravesande e Musschenbroek estavam todos ligados à supracitada revolução na abordagem pedagógica da física que teve início com o gabinete de física de Leiden (de CLERCQ, 1989).

teoria da emissão, paulatinamente seria varrida para baixo do tapete (HAKFOORT, 1995, pp. 47-48).

Do ponto de vista da tradição mediada, que havia tido em Descartes, Hooke e Huygens seus principais campeões no século XVII, os expoentes do período subsequente foram o francês Nicolas Malebranche e o suíço Johann Bernoulli (junior), culminando com a teoria de Euler no meio do século.

As ideias de Malebranche evoluíram bastante ao longo do período de cerca de 40 anos em que publicou a respeito, porém os maiores destaques podem ser dados para a forma como, a partir de 1712, ele se apropriou da teoria das cores de Newton, postulando que as cores eram distinguíveis pelas frequências de oscilação. Mais que isso, Malebranche postulou que ao longo do processo de refração a *frequência* da luz (e não o comprimento de onda, por exemplo) permanecia a mesma, baseando-se nos experimentos de Newton com os prismas, que mostraram conclusivamente que as cores dos raios luminosos eram imutáveis (HAKFOORT, 1995, pp. 58-59).

Johann Bernoulli produziu a mais complexa teoria mediada da luz no período, anunciada em seu tratado de óptica de 1736. Conforme Malebranche, Bernoulli partiu da concepção de um éter constituído de microvórtices responsáveis por prover-lhe elasticidade pela ação da força centrífuga, porém de maneira original (e mais próxima de Newton) ligou a cor à frequência da luz postulando a existência de “partículas de luz” espalhadas pelo éter e dotadas de vibrações periódicas. Estas partículas, extremamente pequenas e duras, variavam ligeiramente de tamanho, porém sempre mantendo uma distância entre elas da ordem de milhares de vezes seus diâmetros, de modo que um número muito grande destas partículas se

alinhas em qualquer linha reta traçada no espaço. As partículas ficavam em repouso enquanto a pressão sobre elas causada pelos microvórtices de éter permanecia balanceada. Quando uma “força nova” sobre uma destas partículas, isto é, um estímulo externo, perturbava esse balanço, a partícula era empurrada numa direção em particular, comprimindo os vórtices de éter entre a partícula e a seguinte, e propagando portanto a ação em linha reta partícula a partícula. Desta maneira, um número grande (porém finito) de partículas era deslocado, tudo isso ocorrendo antes que os microvórtices entre a primeira e a segunda partículas tivessem sido comprimidos até o seu tamanho mínimo. Quando isto ocorria, os microvórtices se distendiam, puxando de volta toda a linha de partículas no sentido oposto. Depois o movimento se repetia, de modo que as partículas de luz no modelo de Bernoulli perfaziam vibrações longitudinais extremamente rápidas e pequenas em torno de posições de equilíbrio. Além disso, a frequência do estímulo externo agrupava as partículas, originalmente dispersas de uma maneira aleatória, em “fibras” contendo partículas de mesmo tamanho, o tamanho da primeira partícula determinando a escolha. Partículas maiores ou menores que a primeira seriam incapazes de acompanhar o movimento vibratório e seriam seletivamente expulsas da fibra, de onde por exemplo cada cor era refratada numa direção diferente por um prisma⁴⁹. Portanto a teoria de Bernoulli oferecia uma explicação para a homogeneidade das cores nos experimentos de Newton (HAKFOORT, 1995, pp. 60-61).

Curiosamente, Bernoulli foi forçado a concluir, pela análise matemática que fez do fenômeno da refração, que era “muito provável” que a frequência do raio luminoso

49 Mais uma vez a analogia entre luz e som parece ter desempenhado um papel importante, pois Bernoulli comparava o mecanismo ao processo de afinamento de um instrumento de corda, em que a ressonância “seleciona” quais cordas vibrarão na mesma frequência do estímulo original (HAKFOORT, 1995, p. 61).

permanecesse a mesma durante o processo, o que deveria fazer com que a velocidade do raio luminoso na água fosse *maior* do que no ar por conta do aumento da elasticidade do éter, um resultado que lhe pareceu paradoxal e digno de nota porque ia contra o senso comum de que corpos mais densos tinham um efeito retardador na propagação da luz⁵⁰ (HAKFOORT, 1995, pp. 63-64).

Outra observação importante do trabalho de Bernoulli é que ele constituiu a primeira tentativa, dentro da tradição mediada, de associar as cores dos anéis de Newton com a frequência de vibração da luz.

Além disso, a teoria de Bernoulli nos mostra cabalmente que a maneira pela qual cor e periodicidade foram eventualmente ligadas não era clara desde o princípio. Depois de Malebranche ter introduzido a ideia geral de relacionar periodicidade e cor, toda sorte de opções ainda estavam em aberto tanto no nível ontológico quanto no matemático. As partículas de cores de Bernoulli num éter e a matemática das ondas estacionárias proveram apenas uma dessas opções. A elaboração do conceito de periodicidade na tradição mediada compreende um processo histórico complexo e fascinante que abrange um considerável período de tempo, o que parece ter passado despercebido pelos historiadores até agora (HAKFOORT, 1995, p. 65)[ii10].

A tradição mediada teve uma adição significativa em 1746 com a publicação do “*Nova Theoria Lucis et Colorum*” por Euler. Embora posteriormente a teoria de Euler tenha sido comparada frequentemente à de Huygens, ela guarda mais diferenças para com aquela do que propriamente semelhanças. De fato, a única semelhança significativa é o ponto de partida, como sempre uma analogia entre os fenômenos luminosos e os sonoros. Euler descartava o princípio de Huygens como incapaz de explicar a propagação retilínea da luz⁵¹, e iniciava o texto apresentando uma lista de argumentos a favor e contra cada uma das tradições. Foi esta

50 Bernoulli se referia é claro aos modelos dentro da tradição mediada.

51 Apenas com Fresnel e o princípio da interferência da luz isso seria conseguido.

abordagem que inaugurou o debate polarizado entre as duas teorias. A partir de então “(n)ada de teorias híbridas *à la* Bernoulli, nada de teorias “fazendo a ponte” do tipo de de Mairan. A hora de trocar e de sintetizar havia passado. O duelo havia começado” (HAKFOORT, 1995, p. 76).

E Euler mostrou claramente de que lado estava através da análise de seis argumentos principais⁵², que podem ser assim sumarizados:

I. Analogia entre o som e a luz e a economia de meios da natureza⁵³;

II. Movimento desimpedido dos planetas⁵⁴;

III. Desconstrução do argumento de Newton da inconsistência na analogia entre o som e a luz em função da propagação retilínea e da formação de sombras;

IV. Sol perdendo corpúsculos deveria perder massa;

V. Colisões entre as inúmeras partículas de luz proibiriam o princípio da independência dos raios luminosos;

VI. Transparência de corpos materiais⁵⁵.

52 Os três primeiros argumentos retóricos “defensivos”, em que Euler defende a teoria ondulatória de ataques comumente feitos por proponentes de teorias emissivas. Nos três últimos Euler argumenta “ofensivamente”, buscando minar as teses corpusculares.

53 A “economia de meios da natureza” é um princípio metafísico da *Naturphilosophie* segundo o qual diferentes fenômenos da natureza operam através de princípios se não idênticos, semelhantes. Nesse sentido, o éter do modelo ondulatório de Euler não era apenas o meio para a propagação de perturbações luminosas, mas também era instrumento das interações elétricas, magnéticas, da coesão dos corpos e da gravidade (HAKFOORT, 1995, p. 90).

54 Este argumento é uma inteligente inversão do argumento usado pelos defensores da teoria da emissão para tentar desacreditar as teorias mediadas a partir da ideia de que a presença de um meio etéreo no espaço retardaria perceptivelmente o movimento dos planetas com o tempo, o que não era observado. Euler recoloca a questão em termos do efeito sobre o movimento dos planetas do imenso fluxo de partículas de luz com que os emissionistas preenchiam o espaço, e nesse sentido ele é um movimento tanto defensivo quanto ofensivo.

55 A transparência de um corpo material era explicada em alguns modelos corpusculares através da ideia de que

A teoria de Euler não era estritamente “ondulatória”, no sentido moderno de uma perturbação com um perfil senoidal, mas constituía-se num modelo que caracterizava o raio de luz pela periodicidade (frequência) de sua sequência de pulsos (fig. 2.2), percebendo que a velocidade v de propagação da onda devia se relacionar com a frequência f dos pulsos conforme a relação

$$d = \frac{v}{f} ,$$

onde d era a distância entre dois pulsos sucessivos, isto é, algo equivalente ao comprimento de onda da teoria ondulatória moderna.

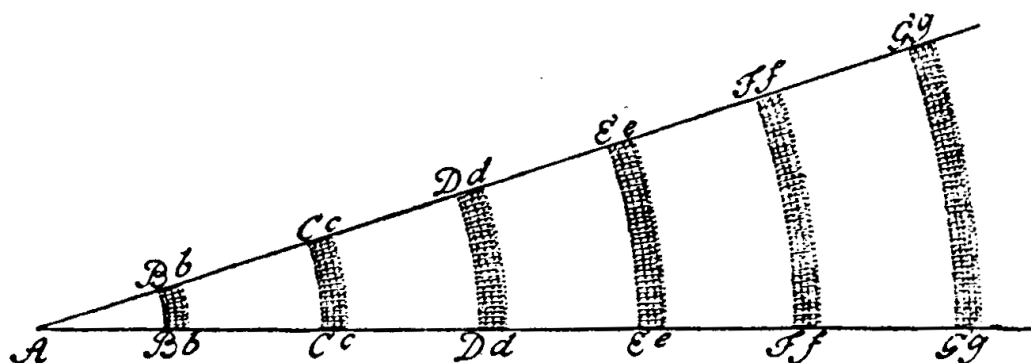


Fig. 2.2 – Desenho de Euler mostrando a propagação de uma sequência de pulsos (*apud* HAKFOORT, 1995, p. 99).

Para Euler um “raio composto”, isto é, um raio de luz branca, não era uma coleção ou mistura de raios de cores distintas (como em Newton), mas um *único* raio produzido por vibrações não-isócronas, isto é, por uma sequência de pulsos que não guardavam entre si um mesmo intervalo de tempo. Um raio de luz solar, para Euler, se pareceria mais com a

as moléculas destes corpos teriam “poros” pelos quais as partículas luminosas conseguiriam passar desimpedidas. Euler mostrou que isto não era compatível com o fato de que os corpos transparentes como a água o são em qualquer direção.

representação da figura 2.3 a seguir⁵⁶.

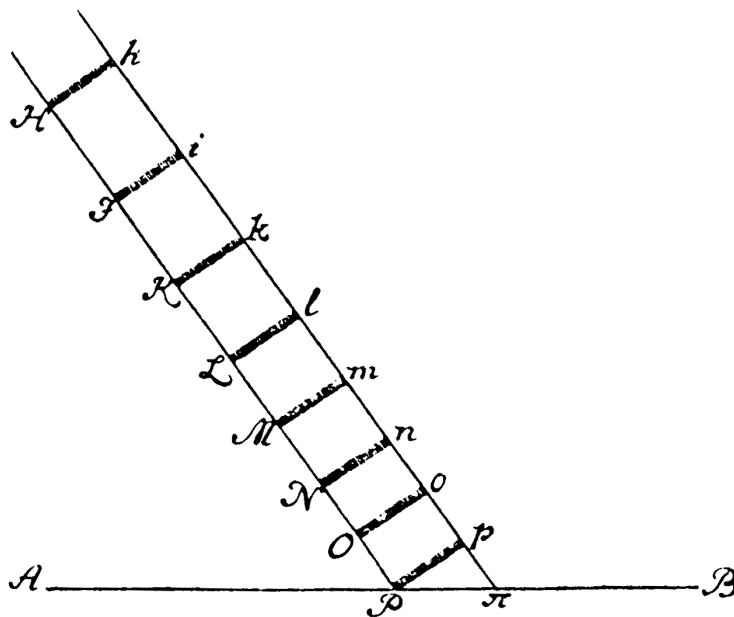


Fig. 2.3 – Raio de luz branca incidindo sobre uma superfície, segundo Euler. As diferentes cores presentes na luz branca estavam associadas a diferentes frequências presentes na sucessão de pulsos (*apud* HAKFOORT, 1995, p. 107).

Euler explicava a refração da luz através do mesmo raciocínio utilizado desde Huygens e que já havia se tornado padrão nas teorias mediadas na metade do século XVIII. A velocidade de propagação dos pulsos devia diminuir à medida que a luz adentrava o meio mais refringente para que ele se retardasse e se desviasse segundo a lei de Snell⁵⁷. A explicação introduziu no entanto um problema, uma vez que para Euler a velocidade de propagação dos pulsos dependeria unicamente das propriedades elásticas do éter no interior dos meios, porém agora o desvio desigual de raios de diferentes cores, *i. e.*, a dispersão cromática, obrigava-o a

56 Como que para ilustrar a distinção entre “contexto de descoberta” e “contexto de justificativa”, Euler afirma que as maiores frequências na luz visível não deviam exceder as menores por um fator maior do que 2, baseado na analogia que fez entre a luz e o som, o espectro cromático representando uma oitava, isto é, uma variação de frequências por um fator 2 (HAKFOORT, 1995, pp. 113-114).

57 Para Euler esta dedução era elegante por respeitar o princípio do tempo mínimo, que considerava uma lei natural fundamental (HAKFOORT, 1995, p. 102).

introduzir uma nova propriedade através da qual os pulsos sucessivos teriam uma influência uns sobre os outros. Embora não tenha sido muito claro a respeito do mecanismo desta influência, Euler postulava que uma série de pulsos gerava como resultado um aumento na velocidade de cada pulso, e, além disso, esse aumento dependeria da frequência dos pulsos⁵⁸.

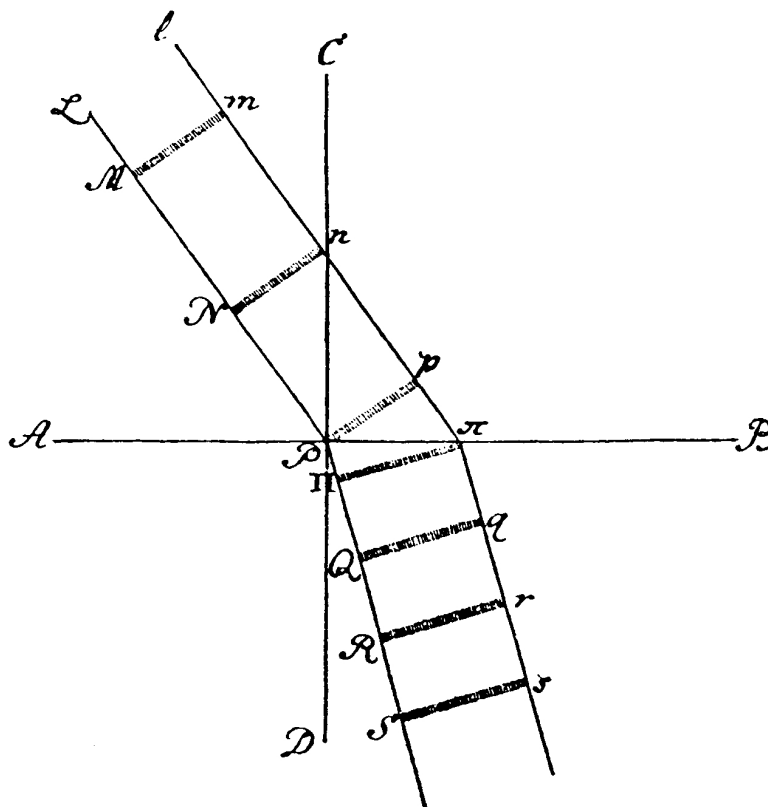


Fig. 2.4 – Refração de um raio de luz de cor pura de um meio menos refringente para um meio mais refringente, na teoria de Euler (*apud* HAKFOORT, 1995, p. 102). As distâncias menores entre os pulsos no meio mais refringente se dão de forma a compensar exatamente a diminuição de velocidade e a manter a frequência (cor) do raio de luz a mesma.

Apenas a partir de Euler, portanto, uma visão dual do debate sobre a natureza da luz estaria estabelecida e o embate interno polarizado entre corpuscularistas e onducionistas se

58 Euler atribuía a maior frequência ora à luz vermelha ora à violeta, mudando de ideia ao longo do tempo devido à impossibilidade de decidir o mecanismo de interação entre os pulsos para explicar a dispersão cromática. O ponto importante, no entanto, é que Euler abordava a questão matematicamente, buscando uma fórmula descritiva que funcionasse (HAKFOORT, 1995, p. 105).

tornaria possível⁵⁹. No entanto, apenas nas duas últimas décadas do século XVIII pode-se dizer que o fiel da balança pendeu para o lado da teoria corpuscular, e este predomínio se deu não em função de qualquer experimento ou avanço físico no campo da óptica, mas especificamente devido aos estudos sobre os efeitos químicos da luz, em boa extensão trazidos por químicos originalmente à margem do debate (HAKFOORT, 1995, pp. 151-175).

2.3 *Checklist* de Fenômenos Ópticos

De uma forma semelhante a Euler, repassemos brevemente os fenômenos ópticos conhecidos antes de 1800, e que portanto os modelos teóricos desenvolvidos no período precisavam dar conta, ainda que não o visassem direta ou originalmente. Eram eles, resumidamente:

1. O conjunto de princípios e leis da longa tradição da óptica geométrica, baseado no conceito fugidio de raio luminoso⁶⁰ e na existência de fontes luminosas e de objetos não-luminosos opacos, translúcidos e transparentes. Em particular dois destes princípios eram sistematicamente utilizados retoricamente por um e outro campo do debate para defender suas

⁵⁹ A formulação do debate em termos de “isso ou aquilo”, sem meios-termos, funcionava porque atendia a uma necessidade de ambos os lados. Como nenhum modelo era capaz de dar conta satisfatoriamente de *todas* as questões relacionadas aos fenômenos ópticos, tornava-se mais fácil retoricamente validar um modelo por exclusão, isto é, simplesmente através da refutação do outro, como pretendeu ter feito de Mairan, por exemplo (HAKFOORT, 1995, p. 38).

⁶⁰ A cuja ambiguidade de significação Jed Buchwald credits o diálogo de surdos entre ambos os campos do debate (BUCHWALD, 1989).

posições e atacar as rivais: o princípio da propagação retilínea da luz e os efeitos correlatos de sombra e penumbra, que pareciam favorecer a teoria da emissão, e o princípio da independência dos raios luminosos, que parecia favorecer a hipótese ondulatória na medida em que se a luz fosse constituída de um jato de partículas elas deveriam se chocar nas regiões de superposição de feixes luminosos distintos, e a luz então deveria ser “espalhada” em todas as direções em virtude dos choques entre as partículas. A propagação da luz no vácuo impunha à teoria ondulatória ainda a necessidade adicional de introduzir um meio etéreo que, perturbado, daria suporte à onda luminosa.

2. As leis da reflexão da luz, que estabeleciam que os ângulos de reflexão eram iguais aos ângulos de incidência, e que o feixe incidente, o feixe refletido e a reta normal à superfície refletora no ponto de incidência estavam sobre um mesmo plano. Ambos os modelos as explicavam com facilidade.

3. As leis da refração da luz (leis de Snel-Descartes): a razão entre o seno do ângulo de incidência e o seno do ângulo de refração é constante para um dado par de meios transparentes; e o raio incidente, o raio refratado e a reta normal à interface entre os dois meios no ponto de incidência estão contidos no mesmo plano⁶¹. Novamente ambos os modelos davam conta de explicar o fenômeno, porém lançando mão de premissas opostas: enquanto numa visão corpuscular era preciso que a partícula luminosa fosse acelerada ao ingressar num meio mais refringente para que a lei de Snel fosse verificada, numa visão ondulatória era necessário que a onda fosse retardada ao ingressar num meio mais refringente.

61 HEILBRON, 1993, pp. 139-184, fala do círculo de Arceuil e da visão laplaciana para a refração da luz num contexto em que isso se integrava com o restante da mecânica laplaciana.

Assim sendo, as previsões feitas por um e outro modelos para a velocidade da luz num meio mais refringente eram necessariamente opostas. Infelizmente a velocidade da luz é tão grande, mesmo em meios bastante refringentes, que um *experimentum crucis* nesse sentido não teria sido possível⁶². Em todo caso, é preciso perceber que na refração há mais a explicar do que simplesmente a lei em si: os índices de refração deveriam também depender dos meios de uma forma que parecia guardar uma relação com as densidades dos meios⁶³.

4. Além disso, era preciso explicar a absorção ou a extinção da luz por um meio, bem como a atenuação geométrica da intensidade luminosa com o quadrado da distância e outras relações fotométricas básicas conhecidas desde os primórdios da fotometria comparativa em meados do século XVIII. Em ambas as teorias os efeitos podiam ser bem explicados, fosse pela diminuição da densidade de partículas ou pelo aumento da área coberta pela frente de onda.

5. Outro efeito evidente e que, como vimos, foi motivo de intenso debate, referia-se à policromia, às cores dos objetos e à percepção visual. Relacionado a isto era preciso ainda dar conta dos efeitos de decomposição da luz na refração (dispersão cromática), associando tamanhos e velocidades ou comprimentos de onda (conforme o caso) ligeiramente diferentes para cada cor, e a formação de arcos-íris e outros fenômenos ópticos atmosféricos correlatos. De forma semelhante, e já vimos como isto foi relevante, era preciso explicar a formação de cores em filmes finos, bolhas de sabão e na montagem dos anéis de Newton. Embora possa-se

62 Ele foi realizado apenas em 1850, quando já era praticamente supérfluo para o debate. De qualquer forma, é interessante notar que até pelo menos a metade do século XVIII “não parece ter havido qualquer possibilidade de que a ideia (de que determinar a velocidade da luz no ar e na água pudesse ser decisivo na escolha entre as tradições ondulatória ou corpuscular) tomasse forma” (HAKFOORT, 1995, pp. 67-68).

63 Através de uma grandeza característica chamada “poder refrativo” do meio. Mais a respeito no capítulo 4, pois isto justamente viria a ser testado, inclusive interferometricamente.

criticar a explicação corpuscular inicial dos *fits* newtonianos para os anéis de Newton, a teoria ondulatória também tardou a explicar por que o anel central era escuro, por exemplo, de modo que o fenômeno inicialmente pelo menos trazia dificuldades para ambas as teorias.

6. Os efeitos de inflexão da luz pelas bordas de objetos opacos, por exemplo como no caso dos experimentos de Grimaldi. Aqui a teoria ondulatória pareceria ter uma vantagem, porém é preciso lembrar que uma explicação rigorosa e completa do fenômeno só viria com a teoria da difração de Fresnel em 1815.

7. A birrefringência do espato-da-Islândia, descoberta por Bartholinus ainda no século XVII, e que levou Newton a postular a existência de “polos” nos raios luminosos (dando origem ao termo “polarização”) e Huygens a formular o conceito de frente de onda elíptica. De fato este fenômeno estava na base do pensamento de Huygens na formulação de seu modelo mediado e do princípio de Huygens (HUYGENS, 1690).

8. A finitude e a aparente constância da velocidade da luz, conforme estimada a partir dos trabalhos do astrônomo dinamarquês Ole Rømer (1644-1710) e do astrônomo inglês James Bradley (1693-1762). Este era um ponto sistematicamente usado contra a teoria da emissão, por exemplo por Young, que se mostrava surpreso com o fato de aparentemente as partículas luminosas serem ejetadas dos corpos sempre com a mesma velocidade, não importando que o corpo emissor fosse uma vela ou o Sol. No caso da teoria ondulatória, a velocidade de propagação da onda seria determinada apenas pelas características do meio em que ela se propagava, e portanto não havia dificuldades.

9. A aberração da luz estelar descoberta por Bradley e por ele próprio explicada (de forma trivial) em termos da teoria da emissão. Uma explicação ondulatória seria um pouco

mais complexa, porém não muito⁶⁴.

10. Finalmente, os efeitos de luminescência (fosforescência e fluorescência) e a ação química da luz (sobre sais de prata, por exemplo). Foram justamente estes fenômenos, de difícil explicação no quadro da teoria ondulatória, que levariam à preponderância da teoria da emissão no final do século XVIII.

O início do século XIX trouxe no entanto uma série de novas observações e descobertas quase simultâneas envolvendo novos fenômenos que reavivaram a pesquisa em óptica e o debate sobre a natureza da luz. Eis as mais relevantes:

a. O fenômeno da interferência da luz descoberto e explicado por Young entre 1800 e 1807, e os resultados de toda uma série de experimentos com as franjas de interferência nos padrões de franjas de Grimaldi, bem como o experimento da fenda dupla. Aqui evidentemente a teoria ondulatória se sentia em casa, e a teoria da emissão se via em maus lençóis.

b. A descoberta, por Herschel, em 1800, de que o calor radiante⁶⁵ parecia se comportar exatamente como a luz visível, trazendo à baila a questão da unidade dos fenômenos da natureza e da relação entre luz e calor. No ano seguinte o químico e físico prussiano Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) descobriria a ação fotoquímica para além do violeta, postulando a existência dos raios ultravioletas.

c. A descoberta da polarização por reflexão pelo físico francês Étienne Malus (1781-1812) em 1808 e de diversas propriedades da luz polarizada (polarização circular e elíptica,

64 Retornaremos a este fenômeno ao longo do capítulo 5.

65 A radiação infravermelha. Herschel mostrou que o calor radiante do Sol era refratado por um prisma, afetando termômetros colocados para além do final vermelho do espectro visível (HEILBRON, 1993, pp. 127-131).

polarização cromática) e dos materiais (ângulo de Brewster, cristais birrefringentes biaxiais, etc.). A polarização foi o tema mais estudado na óptica do início do século XIX, justamente por apresentar dificuldades para ambas as teorias. Durante uma década no entanto os fenômenos relacionados à polarização da luz pareceram favorecer mais uma visão corpuscular⁶⁶.

d. O advento de uma teoria matemática completa da difração da luz por Fresnel em 1815, e a previsão e posterior observação da “mancha de Poisson” e outros efeitos⁶⁷. Como a teoria da difração estava intimamente relacionada com o princípio da interferência da luz, é claro que a partir de 1815 a teoria ondulatória ganhava um forte argumento. A relação é posta em evidência pelas seguintes citações de Fresnel:

(a)s franjas que se observa no interior da sombra de um corpo estreito, ou [mesmo] aquelas que se obtém com dois espelhos⁶⁸, resultam evidentemente da

66 Até Young e Fresnel postularem que a onda luminosa devia ser transversal, e não longitudinal, quando então o jogo se inverteu. Mais a respeito no capítulo 5. Para um estudo minucioso do papel fundamental desempenhado pelas questões relacionadas à polarização no debate sobre a natureza da luz, ver BUCHWALD, 1989.

67 A teoria da difração de Fresnel foi apresentada no contexto de um concurso proposto pela *Académie des Sciences*. A comissão formada para avaliar as monografias entregues, composta preponderantemente de defensores da teoria da emissão, parecia acreditar que o tema da difração favorecia uma análise corpuscular. No entanto o texto de Fresnel, partindo de uma hipótese ondulatória, saiu-se vencedor, tamanho o rigor matemático com que Fresnel calçou suas conclusões. Um final dramático à história foi acrescentado por Siméon Denis Poisson (1781-1840), membro da banca de avaliação e emissionista convicto. Dono de uma grande intuição física e matemática, Poisson logo percebeu que de acordo com o raciocínio desenvolvido por Fresnel para explicar a difração, um disco circular opaco interposto a uma fonte de luz puntiforme deveria gerar no centro de sua sombra um ponto luminoso, já que as frentes de onda oriundas de todos os pontos da borda do disco ali chegariam em fase e seus efeitos se somariam. Como isto parecia ser um absurdo, a teoria de Fresnel devia estar errada. Arago, que também estava na banca e não era tão convencido assim da teoria da emissão, resolveu fazer a experiência e observou a mancha clara no centro da sombra, que ficou então conhecida como “mancha de Poisson”.

68 E aqui a menção ao espelho duplo de Fresnel como inspiração para a teoria da difração já põe em evidência

influência mútua dos raios luminosos, [e] a analogia indica que o mesmo deve se passar com as franjas exteriores que ladeiam as sombras dos corpos iluminados por um ponto luminoso. A primeira hipótese que se apresenta ao pensamento é a de que elas são produzidas pelo encontro dos raios diretos e dos raios refletidos pelas bordas do corpo opaco, enquanto as franjas interiores resultam da ação recíproca dos raios infletidos para o interior da sombra, dos dois lados do corpo opaco, estes raios infletidos partindo igualmente de sua superfície, ou de pontos infinitamente vizinhos [à superfície]. Esta parece ser a opinião do Sr. Young, e é também a que eu havia adotado inicialmente, antes que um exame mais aprofundado dos fenômenos me fizesse reconhecer sua inexatidão⁶⁹ (FRESNEL, 1826, pp. 360-361)[ii11].

e, ainda,

(a)pós ter demonstrado (...) que o sistema de emissão, e mesmo o princípio das interferências, quando aplicado apenas aos raios diretos e aos raios *refletidos ou infletidos sobre as bordas mesmas da tela* [obstáculo opaco], são insuficientes para explicar o fenômeno da difração, vou fazer ver agora que se lhe pode dar uma explicação satisfatória e uma teoria geral, no sistema das ondulações, sem o auxílio de qualquer hipótese secundária, e apoiando-se somente no princípio de Huygens e naquele das interferências, que são um e outro consequências da hipótese fundamental [de que a luz pode ser tratada como uma onda] (FRESNEL, 1826, p. 373, grifos no original)[ii12].

Neste contexto se dá portanto a introdução do princípio de Huygens em sua forma moderna, mais geral, por vezes (com justiça) também chamado de “princípio de Huygens-Fresnel”.

uma contribuição importante das montagens interferométricas. Mais sobre o espelho duplo no capítulo 3.

⁶⁹ Por volta de meados de 1816. É preciso recordar que esta versão do texto da monografia foi editado *a posteriori* por Fresnel (FRESNEL, 1826, p. 339 – ver nota de rodapé).

2.4 Revoluções

Para muitos estudiosos, a proposição de uma teoria ondulatória da luz vitoriosa no início do século XIX constituiu uma “revolução científica” no sentido kuhniano. Para outros, o sentido da revolução é ainda mais abrangente, envolvendo não apenas um modelo físico específico, mas também um conjunto de práticas, metodologias e visões de ciência: “(o)riginando-se na França, a revolução óptica varreu toda a Europa, transformando não apenas as teorias da luz, mas também práticas instrumentais e modos de explicação” (CHEN, 2000 *apud* LEVITT, 2009, p. 3). Finalmente, há quem defenda mesmo que a revolução óptica foi ainda mais além, transformando a maneira do ser humano ver o mundo, e que “(t)eorias da luz estavam então no centro de uma reorganização total de como se estudava o mundo” (LEVITT, 2009, p. 3), e que, inclusive, “(a) ‘revolução óptica’ não foi apenas um evento interno na disciplina da física, mas poderia ser usada para descrever o nascimento de uma cultura visual moderna” (LEVITT, 2009, p. 4), da qual seríamos herdeiros diretos.

3 O Desenvolvimento da Técnica Interferométrica e o Triunfo da Teoria Ondulatória

“You are only coming through in waves...”⁷⁰

Pink Floyd

3.1 O Surgimento da Técnica Interferométrica

Uma vez que as condições nas quais o fenômeno da interferência se tornava visível foram estabelecidas, inicialmente por Young nos primeiros anos do século e, a seguir, de maneira mais rigorosa, por Fresnel a partir de 1815⁷¹, tornou-se mais fácil reconhecer os efeitos da interferência da luz em diversos fenômenos, bem como desenhar experimentos especificamente para demonstrar ou tirar proveito do fenômeno. Na prática, isso significava que, paralelamente aos debates e estudos, muito frequentemente baseados em resultados experimentais ou na observação e tentativas de quantificação de novos fenômenos no campo da óptica, surgia uma nova *técnica experimental* – a interferometria. Ou, como melhor coloca Ernst Mach,

(...) não foi difícil (...) imaginar um grande número de novas formas de

70 “Você só está vindo em ondas...” (GILMOUR e WATERS, 1979, tradução nossa).

71 Entretanto, uma teoria completa, que viria a ser batizada de *teoria da coerência*, seria desenvolvida apenas nos anos 1930s por dois físicos holandeses trabalhando independentemente: Pieter Hendrik van Cittert (1889-?) e Frits Zernike (1888-1966), este último tendo a propósito recebido o Nobel de física de 1953 por sua invenção do microscópio de contraste de fase, uma importante aplicação interferométrica do século XX. O principal ponto da teoria da coerência era o chamado “teorema de van Cittert-Zernike”, que em última instância estabelecia finalmente de forma completa as condições para a visibilidade dos padrões de interferência e introduzia o conceito de “grau de coerência” da luz (van CITTERT, 1934; ZERNIKE, 1938 e van CITTERT, 1958).

experimentos ou reconhecer e explicar os vários tipos de fenômenos de interferência à medida que eles casualmente apareciam⁷². Estes experimentos também passaram a ser considerados interessantes de um ponto de vista técnico e prático (MACH, 1926, p. 164)[iii1].

Quais eram, afinal, as condições para que as franjas de interferência pudessem ser vistas? Segundo Young,

(p)ara que os efeitos das duas porções de luz possam ser assim combinados, é necessário que elas sejam derivadas da mesma origem, e que cheguem ao mesmo ponto por caminhos diferentes, em direções não muito desviantes uma da outra⁷³ (YOUNG, 1845, p. 364)[iii2].

Em primeiro lugar, os feixes interferentes precisavam então ser oriundos de uma mesma fonte. Young não explicitava as razões que o haviam levado a postular esta condição, mas é possível que ele tenha experimentado com fontes distintas iluminando cada lado de um obstáculo fino ou cada fenda de uma fenda dupla e tenha percebido que o efeito não se manifestava. Além disso, a analogia acústica frequentemente presente no raciocínio de Young pode também ter desempenhado um papel (MACH, 1926, p. 155). Fresnel foi um pouco mais

72 De fato, não foram apenas os fenômenos mais gerais da óptica que foram escrutinados à luz do novo conceito da interferência luminosa. Fenômenos como a cintilação das estrelas, explicado por Arago a partir da interferência causada pela refração não uniforme da luz das estrelas por uma atmosfera dinâmica em que camadas de ar de diferentes temperaturas, pressões e densidades estão em constante movimento, ou os arcos supernumerários nos arcos-íris, que Young pôde elucidar como sendo resultado da interferência de dois conjuntos superpostos de raios que emergiam paralelos, porém tendo perfeitado dois caminhos diferentes no interior das gotas de chuva, também somaram ao rol de sucessos explicativos da teoria ondulatória no início do século XIX. De fato, uma teoria completa do arco-íris só foi conseguida com Potter utilizando uma abordagem interferométrica. Uma versão mais detalhada da teoria, levando em conta a intensidade luminosa, foi desenvolvida por George Biddell Airy (1801-1892) e verificada experimentalmente por Miller (PRESTON, 1928, pp. 579-584).

73 Isto é, em terminologia moderna, que sejam *coerentes*. Provavelmente Young aprendeu isso experimentalmente (SHAMOS, 1959, p. 102). Há uma outra condição, como será visto em breve, relacionada à polarização dos feixes interferentes; no entanto nos casos a que Young se referia, em que era utilizada luz branca ordinária obliterada por fendas, esta condição não era relevante.

generoso ao explicar a condição, chegando a dizer que

(...) se não há qualquer dependência entre os centros de vibração, o instante de emissão de um sistema de ondas não estará ligado ao instante de emissão das ondas vizinhas, uma vez que qualquer que seja a causa que as engendra ela não opera modificações simultâneas nos dois pontos luminosos; assim as linhas de acordo e discordância [as franjas claras e escuras] mudarão de lugar continuamente e o olho não terá mais que uma sensação de uma luz uniforme; o que sem dúvida impediu desde muito tempo o reconhecimento da influência que os raios luminosos exercem uns sobre os outros (FRESNEL, 1868 *apud* MACH, 1926, p. 155, ver nota de rodapé)[iii3].

A segunda condição era a de que a distância entre os centros de emissão dos feixes interferentes fosse muito pequena, de outro modo as franjas seriam tão estreitas que fugiriam à resolução espacial do olho e pareceriam uma iluminação uniforme.

Como uma terceira condição, era preciso que houvesse uma diferença de percurso pequena entre os feixes interferentes, em particular para que as poucas ordens disponíveis na interferência da luz branca pudessem ser distinguidas. À época a interferência era praticamente um fenômeno localizado, dada a baixíssima coerência das fontes utilizadas⁷⁴.

Finalmente, era necessário que a fonte de luz utilizada não fosse muito extensa (pelo menos numa dimensão⁷⁵), o que guardava grande relação com a primeira condição, posto que uma fonte extensa podia ser entendida com um conjunto (incoerente) de fontes.

Esta questão tem uma ilustração muito feliz na analogia (novamente, acústica) com uma colméia de abelhas, relatada por Ernst Mach:

(u)ma fonte luminosa puntiforme pode emitir um trem de ondas regular consistindo de muitos milhões de ondas. Uma vez que, no entanto, no caso de uma chama uma partícula luminosa é continuamente substituída por outra,

74 Esta peculiaridade seria (muito) mais tarde utilizada como uma ferramenta quando da realização interferométrica do metro (*cf.* capítulo 9).

75 O caso de uma fenda retangular longa e estreita é ilustrativo nesse sentido.

irregularidades bastante apreciáveis devem aparecer nos trens de onda, que não guardarão nenhuma relação simples para duas fontes de luz diferentes. A melhor ilustração acústica disto é dada por uma colméia de abelhas, cujos indivíduos estão continuamente mudando [de posição], porém de uma maneira tal que o bater das asas daqueles que deixam a colméia não estão em fase com o bater de asas das abelhas que entram. Os trens de onda sonoros de duas dessas colméias não podem produzir interferência audível, mas aqueles da mesma colméia são capazes de interferir, uma vez que a mesma mudança de fase ocorre *simultaneamente* em cada trem de ondas procedente da colméia (MACH, 1926, p. 155, grifo no original)[iii4].

O estudo das franjas de Grimaldi por Young, Arago e Fresnel parece ter sido fundamental para o surgimento do conceito de interferência luminosa.

Grimaldi foi o primeiro a reconhecer a ação que os raios luminosos exercem uns sobre os outros. Nestes últimos tempos, o célebre doutor Thomas Young provou, por uma experiência simples e engenhosa, que as franjas interiores resultam do encontro dos raios infletidos por cada lado do corpo opaco, interceptando um dos feixes luminosos com um anteparo; o que fez sempre desaparecer completamente as franjas interiores, quaisquer que fossem a forma, massa e natureza do anteparo, e quer se interceptasse o feixe luminoso antes ou depois de sua imersão na sombra (FRESNEL, 1826, p. 359)⁷⁶[iii5].

Elaborando sobre os experimentos de Grimaldi, Young já havia estudado em 1803 as condições nas quais as franjas presentes no interior da sombra geométrica de um corpo estreito iluminado em toda a sua largura por uma fonte colimada (um fio fino colocado paralelamente a uma fenda, por exemplo) desapareciam ao se bloquear com um obstáculo opaco a luz que passava *por apenas um* dos lados do corpo (fig. 3.1). Young suspeitou que para que as franjas se formassem era necessária a superposição tanto do feixe que passava por um lado do fio quanto do feixe que passava pelo outro lado, e, consistentemente, verificou que ao obstruir um deles todas as franjas de interferência desapareciam, não importando se o

76 Esta referência é a monografia submetida por Fresnel em 29 de julho de 1818 para a competição patrocinada pela *Académie des Sciences* sobre o tema da difração, e “coroadada” (premiada) em 1819, ligeiramente editada e acrescida de notas ao final trazendo experimentos pertinentes atualizados (FRESNEL, 1826, p. 339).

obstáculo era colocado imediatamente antes, logo ao lado ou imediatamente depois do fio.

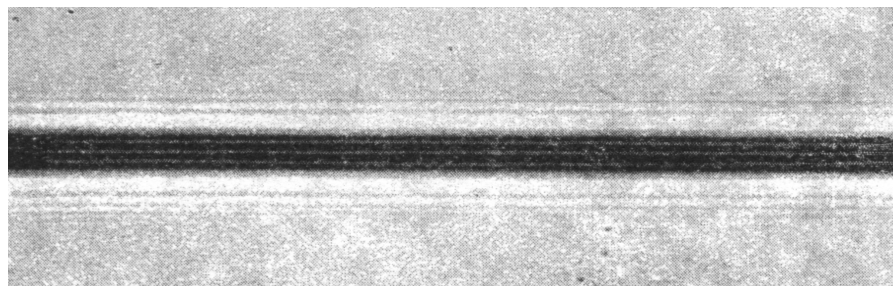


Fig. 3.1 – Franjas de Grimaldi projetadas para além da sombra de um fio fino (MACH, 1926, p. 146). As franjas externas decorrem do efeito de difração nas bordas, mas as internas decorrem da interferência da luz que chega de ambos os lados do fio.

Arago, trabalhando a partir da hipótese de Fresnel⁷⁷, observou com certa surpresa que o mesmo acontecia mesmo que em lugar de um obstáculo opaco fosse usada uma placa de vidro de espessura razoável. Ainda que ambos os feixes fossem admitidos, o fato de um deles ser obrigado a atravessar uma lâmina de material mais refringente parecia destruir as franjas. Seguindo a sugestão de Fresnel, baseada na sua “teoria das interferências”, de que o efeito se dava porque a refração pela espessura do vidro introduzia um grande retardo num dos feixes e destruía as condições de interferência (aumentando em muito a diferença de caminho óptico), Arago percebeu entretanto que a introdução de uma placa de vidro fina não fazia desaparecer as franjas, mas apenas deslocava-as para o lado, e tanto menos quanto menor a espessura da placa. Mais do que isso, Arago notou ainda que uma placa fina (de mica, por exemplo) causava um deslocamento das franjas idêntico ao que era conseguido quando eram colocadas, em

⁷⁷ Há quem argumente, um tanto maquiavelicamente, que o interesse de Arago em promover Fresnel e, por conseguinte, a teoria ondulatória da luz, teve o caráter de uma vingança contra Biot, que era um defensor notório da teoria da emissão e que teria se apropriado do campo de estudo da polarização cromática inaugurado por Arago (BUCHWALD, 1989b). No entanto, as trajetórias científica e cívica de Arago apresentam diversos exemplos de apoio a jovens talentos, e de uma grande preocupação em difundir o conhecimento de uma forma despida de preconceitos, e credenciam Arago como um homem de visão aberta. A vingança sobre Biot pode ter sido portanto apenas um bônus.

ambos os lados do corpo, placas de vidro cuja diferença de espessuras correspondia à espessura da placa fina (ARAGO, 1858h, pp. 343-345⁷⁸).

Embora pouco conhecidos, estes experimentos estão no cerne do advento dos interferômetros⁷⁹. No entanto um sistema interferométrico desenvolvido por Young alguns anos antes, o experimento da fenda dupla, seria muito mais celebrado pela posteridade.

Embora tivesse estudado o assunto desde pelo menos 1799, foi em 1802 que Young estabeleceu claramente o princípio da interferência *aplicado à luz*, declamando em uma de suas conferências *bakerianas*⁸⁰ que

(o)nde quer que duas porções da mesma luz cheguem no olho por rotas diferentes, tanto exatamente quanto muito aproximadamente na mesma direção, a luz se torna mais intensa quando a diferença das rotas é qualquer múltiplo de um certo comprimento, e menos intensa no estado intermediário das porções interferentes; e este comprimento é diferente para luz de diferentes cores (YOUNG, 1802a, p. 387 *apud* ROTHMAN, 2003, p. 17, ver nota de rodapé)[iii6].

Em algum momento entre novembro de 1803⁸¹ e 1807 Young parece ter tido a ideia do experimento da fenda dupla⁸², que apareceu pela primeira vez descrito em texto na publicação

78 Incidentalmente, os experimentos que Arago fez em 1816 foram lembrados por ele nesta que foi a sua última comunicação, ditada pouco antes de sua morte e publicada em 1858.

79 Como veremos no capítulo 4. Repare que, dado que ele tivesse um valor para o comprimento de onda da luz médio da luz empregada, uma medição do deslocamento das franjas já daria a Arago uma medição muito exata da espessura da lâmina de vidro fina utilizada.

80 As conferências eram publicadas a seguir nas *Philosophical Transactions* da Royal Society. É curioso como diferentes autores consideram diferentes enunciados como “o” enunciado original do princípio de interferência. Vimos no capítulo 1 como Robert Crease considera uma citação de um princípio de interferência “genérico” do artigo de Young de 1800 como o enunciado original, e também Ernst Mach opta por um enunciado inteiramente distinto (MACH, 1926, p. 275).

81 Sabemos disso porque na conferência *bakeriana* de 1803 (YOUNG, 1804) Young não mencionava a fenda dupla, embora discorresse sobre diversos experimentos sobre as franjas de Grimaldi e resultados experimentais precisos envolvendo a aplicação do princípio da interferência da luz.

82 A realização do experimento da fenda dupla por Young é questionada pelo físico estadunidense Tony Rothman, que é da opinião de que Young teria apenas calculado quais *seriam* os resultados experimentais

(cuja primeira edição saiu em 1807) de uma compilação de palestras que Young dera na *Royal Institution* ao longo de diversos anos (YOUNG, 1845).

Este desvio [responsável pela diferença de percurso entre dois feixes interferentes] pode ser produzido em uma ou em ambas as porções [feixes] por difração, por reflexão, por refração, ou por quaisquer destes efeitos combinados⁸³; porém o caso mais simples parece ser quando um feixe de luz homogênea incide numa tela na qual há dois pequenos buracos ou fendas, que podem ser considerados centros de divergência, de onde a luz é difratada em todas as direções. Neste caso, quando os dois novos feixes assim formados são recebidos em uma superfície colocada de forma a interceptá-los, sua luz é dividida por listras escuras em porções aproximadamente iguais, mas que se tornam mais largas à medida que a superfície está mais longe das aberturas, de maneira a subtender ângulos muito aproximadamente iguais a partir das aberturas, para qualquer distância, e mais largas também na mesma proporção em que as aberturas são aproximadas uma da outra. O meio das duas porções é sempre luminoso, e as listras brilhantes de cada lado estão a distâncias tais que a luz que vem a elas de uma abertura deve ter passado por um caminho maior do que a que veio da outra abertura por um intervalo que é igual à extensão de uma, duas, três ou mais das supostas ondulações, enquanto que os espaços escuros intervenientes correspondem à diferença de metade da suposta ondulação, de uma e meia, de duas e meia, ou mais (YOUNG, 1845, p. 365)[iii7].

Ou, ainda, nas palavras de Fresnel, com a clareza permitida pelo distanciamento histórico e a experiência acumulada:

(p)roduz-se franjas mais vivas e mais bem definidas fazendo-se, num cartão ou folha metálica, duas fendas paralelas muito finas e suficientemente próximas, e posicionando-se a tela assim perfurada diante de um ponto luminoso; assim, se se observa a sombra com uma lupa colocada entre o corpo opaco e o olho, vê-se um grande número de franjas coloridas bem distintas quando a luz chega pelas duas aberturas de uma vez, e que desaparecem quando a luz de uma das fendas é interceptada (FRESNEL, 1826, p. 359)[iii8].

esperados caso o experimento fosse tentado. Para isso Young teria usado os dados dos trabalhos de Newton com os anéis de Newton (ROTHMAN, 2003, pp. 12-23). O argumento de Rothman no entanto é frágil, baseado em uma análise da linguagem e do texto empregados por Young – que, como já vimos através de uns poucos exemplos, tinha lá suas peculiaridades.

83 Young tinha razão, é claro, como veremos em breve. É curioso no entanto que Young não tenha reportado nenhuma montagem detalhada em que demonstrasse isso.

Na busca de uma ilustração do princípio da interferência para suas palestras públicas na *Royal Institution*⁸⁴, Young teve a ideia de construir, para o estudo das ondas, uma cuba de água em que se podia produzir ondas interferentes tornadas visíveis pela refração diferenciada da luz projetada por cristas e vales da superfície do líquido. A “cuba de ondas” até hoje é um instrumento pedagógico popular para o estudo de ondas, como todo estudante de física sabe por experiência própria, e pode portanto ter sido instrumental para a analogia mecânica com o fenômeno de interferência da luz por uma fenda dupla.

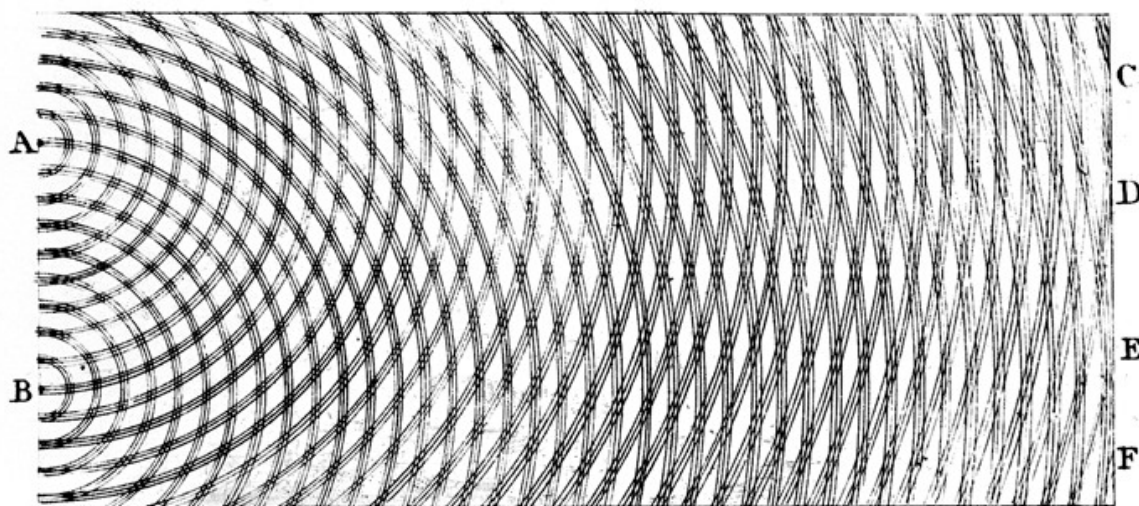


Fig. 3.2 – Desenho de Young da interferência de ondas⁸⁵, onde A e B eram as fontes de ondulações (em fase) e os traços representavam as posições correspondendo aos intervalos dos comprimentos de onda (YOUNG, 1845).

De qualquer maneira, de posse do princípio da interferência e da ideia da fenda dupla,

84 Para onde Young foi convidado a trabalhar em 1800, dando palestras sobre os mais diversos tópicos nas ciências físicas com sua erudição habitual. Em 1802 Young declinaria do cargo sob a justificativa de que o tempo dedicado à preparação das palestras afetava sua prática médica (ROTHMAN, 2003, p. 18).

85 É curioso notar que esta imagem, que não é apresentada por Young como representando ondas luminosas, mas ondas formadas na água parada pela queda simultânea de duas pedras (YOUNG, 1845, p. 220), é muitas vezes reproduzida e creditada incorretamente como representando um desenho original de Young do experimento da fenda dupla (por exemplo em BARR, 1963, p. 642).

Young pôde estimar o comprimento de onda da luz visível para diferentes cores⁸⁶, atribuindo à luz vermelha um comprimento de “aproximadamente 1/36 milésimos de uma polegada” (algo próximo de 670 nm) e à luz violeta cerca de 1/60 milésimos (cerca de 400 nm), a média da luz visível ficando em torno de 1/45 milésimos de polegada (aproximadamente 530 nm), estimativas bastante razoáveis (YOUNG, 1845 *apud* ROTHMAN, 2003, p. 19).

3.2 As Montagens de Fresnel

A explicação ondulatória para as franjas de interferência produzidas pela filtragem da luz através de fendas a uma pequena distância uma da outra levantou questionamentos por parte dos partidários de uma visão corpuscular da luz, que buscaram atribuir o fenômeno a um efeito sistemático e simétrico das moléculas das bordas das fendas sobre as partículas luminosas, como aliás o próprio Newton havia sugerido como explicação para o fenômeno da inflexão da luz (difração) observado originalmente por Grimaldi (PRESTON, 1928, p. 167). Portanto fazia-se necessário, do ponto de vista dos advogados do modelo ondulatório, mostrar que o fenômeno poderia ser produzido sem recurso a fendas ou outros dispositivos semelhantes.

Fresnel dividiu pelo menos duas montagens neste sentido, hoje conhecidas

86 Young produziu outras aplicações práticas do princípio, em particular um aparelho para estimar a espessura de diferentes tipos de fibras, o “eriômetro”, com o qual realizou também a primeira estimativa da dimensão de uma célula do sangue (hemácia) (GEORGE e GUARINO, 1973; PEACOCK, 1855).

respectivamente como *espelho duplo de Fresnel* e *biprisma de Fresnel*. No primeiro o efeito era conseguido fazendo interferir a luz refletida por dois espelhos ligeiramente inclinados um em relação ao outro:

Quando se faz concorrer, sob um ângulo muito pequeno, dois feixes luminosos, provenientes sempre de uma fonte comum, e refletidos regularmente por dois espelhos metálicos, obtém-se ainda franjas semelhantes [às do experimento da fenda dupla de Young], e cujas cores são mesmo mais puras e mais brilhantes. Para produzi-las é preciso ter grande cuidado para que a superfície de um não ultrapasse sensivelmente a do outro no local onde os espelhos se tocam, ou ao menos numa parte das arestas em contato, a fim de que a diferença dos caminhos percorridos seja muito pequena para os raios refletidos que se reúnem sobre a porção comum dos dois campos luminosos. Eu chamaria a atenção, de passagem, para o fato de que *apenas a teoria das interferências poderia dar conta desta experiência*, e que uma tal experiência exigia precauções tão delicadas e ajustes tão longos que teria sido praticamente impossível ser conduzido a ela pelo acaso.

Se se remove um dos espelhos, ou se se intercepta a luz por ele refletida, seja antes ou depois da reflexão, faz-se desaparecer as franjas, como nos casos precedentes [quando se obstruía uma das fendas no experimento de Young ou um dos feixes laterais na difração por um obstáculo estreito]. O que ainda prova bem que as franjas são produzidas pelo concurso dos dois feixes luminosos, e não pela ação das bordas dos espelhos, é o fato de que elas são sempre perpendiculares à linha que une as duas imagens do ponto luminoso, qualquer que seja sua inclinação em relação a estas bordas, ao menos dentro da extensão do campo comum dos dois feixes refletidos regularmente (FRESNEL, 1826, pp. 359-360, grifos nossos)[iii9].

Percebe-se nitidamente na descrição de Fresnel a intenção da montagem. Retirando de cena as fendas, e produzindo franjas de interferência a partir da reflexão da luz por espelhos planos comuns, Fresnel respondia experimentalmente às críticas dos emissionistas de que o fenômeno da interferência tinha origem em alguma espécie de “efeito de borda” produzido pela atração da matéria ordinária nas bordas das fendas sobre os corpúsculos luminosos⁸⁷.

87 De fato, o reverendo irlandês Humphrey Lloyd (*ca.* 1800-1881) afirmaria em 1834 que o espelho duplo de Fresnel “alterou *de forma material* o caráter da controvérsia a respeito da natureza da luz” (LLOYD, 1837, p. 171, grifos nossos).

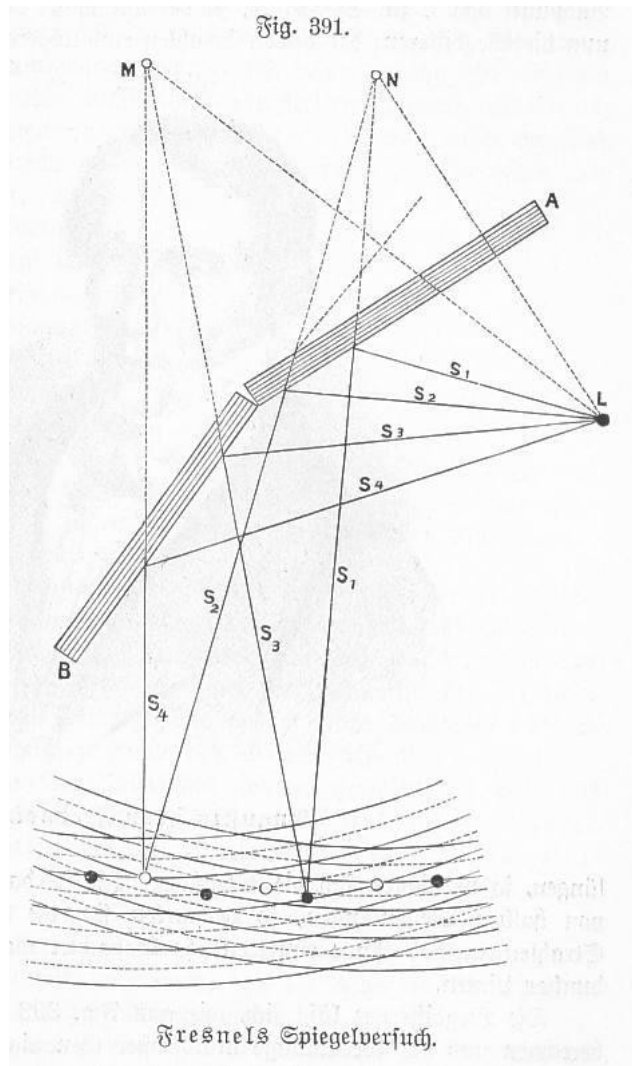


Fig. 3.3 – Espelho duplo de Fresnel. As duas imagens (M e N) produzidas pelos espelhos colocados em ângulo muito obtuso equivalem às fendas na montagem de Young, e portanto estão em condições de interferência.

Como Fresnel logo percebeu, o mesmo princípio (do espelho duplo) podia ser realizado também por refração, utilizando-se para isso um prisma com um ângulo muito obtuso (*cf.* figura 3.5 a seguir). Cada metade do prisma refratava a luz de modo a projetar uma imagem virtual da fonte localizada numa posição ligeiramente distinta (S_1 e S_2 na figura), e portanto em condições de interferir na região de superposição dos feixes (região hachurada).

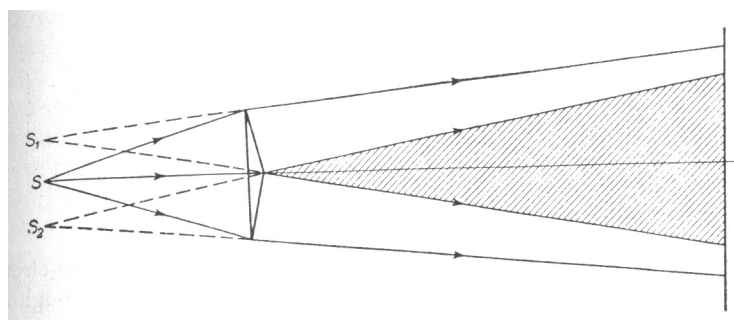


Fig. 3.4 – Biprisma de Fresnel (BORN e WOLF, 1991, p. 263). A refração de cada parte do feixe incidente no prisma com ângulo muito obtuso produz imagens que equivalem às fendas na montagem de Young, e portanto também estão em condições de interferência.

Uma outra maneira de projetar franjas de interferência por refração era a montagem desenvolvida pelo físico francês Félix Billet (1808-1882) conhecida como “meia-lentes de Billet”, na qual duas metades de uma lente eram separadas ligeiramente⁸⁸. O procedimento dava origem a duas imagens ligeiramente deslocadas (ver figura 3.5, alto) cuja separação podia ser controlada pela separação das duas metades da lente, e novamente a luz que divergia a partir destes dois pontos imagens atendia as condições de interferência (*apud* PRESTON, 1928, p. 187). Um arranjo semelhante porém separando as imagens ao longo do eixo da lente, e não na direção perpendicular a ele, foi desenvolvido muito tempo depois por G. Meslin (MESLIN, 1893 *apud* PRESTON, 1928, pp. 187-188).

⁸⁸ A separação podia ser aumentada ou diminuída convenientemente através de um parafuso micrométrico.

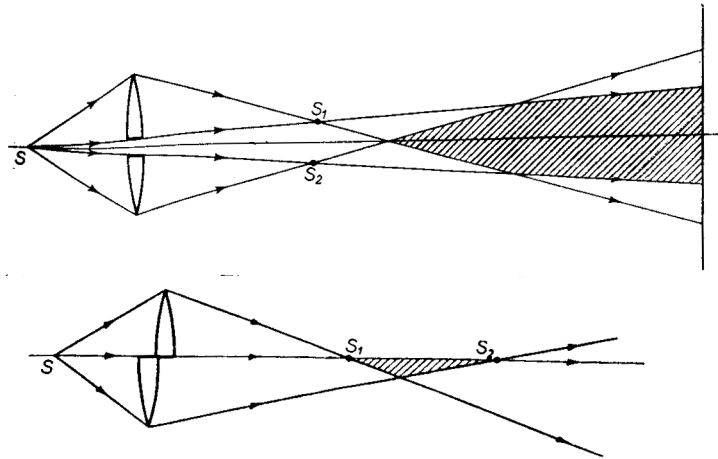


Fig. 3.5 – Meia-lentes de Billet (em cima) e montagem de Meslin (BORN e WOLF, 1991, pp. 263 e 264, respectivamente). Em cada caso cada metade da lente conjuga uma imagem ligeiramente deslocada da outra, produzindo interferência de forma análoga ao espelho duplo de Fresnel ou à fenda dupla de Young.

Embora as duas montagens de Fresnel (espelho duplo e biprisma) tenham tido um importante papel argumentativo no debate sobre a natureza da luz no início do século XIX, derrubando a explicação do fenômeno da formação de franjas de interferência num contexto corpuscular, elas também foram utilizadas por Fresnel num contexto investigativo⁸⁹, em particular na determinação do comprimento de onda da luz vermelha, para o que Fresnel utilizou um vidro vermelho como filtro (ARAGO, 1858j).

O espelho duplo de Fresnel apresentava uma característica que fazia dele um instrumento mais versátil que a fenda dupla de Young ou mesmo o biprisma de Fresnel: o ângulo entre os espelhos podia ser modificado facilmente, aproximando ou afastando uma imagem da outra, e, conseqüentemente, aumentando ou diminuindo convenientemente a largura das franjas de interferência.

Um espelho duplo de Fresnel também foi utilizado em 1833 por R. Potter, que, ao reproduzir um experimento originalmente creditado ao clérigo anglicano e matemático

⁸⁹ E, ainda possivelmente, podem tê-lo inspirado para a teoria da difração, como já vimos *en passant*.

britânico Baden Powell (1796-1860)⁹⁰, interpôs um prisma após a reflexão da luz pelos espelhos, encontrando que o centro do padrão de interferência era desviado na direção da extremidade larga do prisma mais do que o devido. Potter considerou o fenômeno inconsistente tanto com a teoria ondulatória quanto com a teoria da emissão. No entanto, prontamente Airy demonstrou que o fenômeno não apenas podia ser explicado pela teoria ondulatória, mas também era dela uma consequência direta quando se considerava corretamente a dispersão cromática da luz pelo prisma (PRESTON, 1928, pp. 191-192). Ainda veremos no capítulo 4 uma outra aplicação em que um espelho duplo de Fresnel foi utilizado para a determinação de variações no índice de refração de diversas substâncias no estado gasoso.

Uma montagem derivada dos estudos com o espelho duplo foi o que se convencionou chamar de experimento do “espelho triplo” de Fresnel (fig. 3.6). Nela os espelhos do espelho duplo eram separados de uma certa distância e um terceiro espelho introduzido por detrás, de forma que os feixes interferentes sofriam agora respectivamente uma e duas reflexões. Fresnel mostrou com esta montagem que a franja central do padrão de interferência era escura, e não brilhante, evidenciando a inversão de fase que ocorre no fenômeno da reflexão e completando de forma cabal a explicação ondulatória para os anéis de Newton (MACH, 1926, p. 166).

90 Incidentalmente pai do fundador do movimento escoteiro.

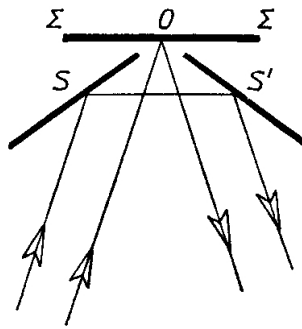


Fig. 3.6 – Espelho triplo de Fresnel. Um dos feixes interferentes (externo) sofria duas reflexões, enquanto o outro (interno) sofria apenas uma (MACH, 1926, p. 166).

Um desenvolvimento ulterior que implicava uma montagem mais simples e que ainda produzia um efeito semelhante era o “espelho de Lloyd”, desenvolvido por Humphrey Lloyd em 1834. Nela o feixe refletido em incidência rasante por um espelho interferia com um feixe oriundo diretamente da fonte luminosa, e que portanto não sofria reflexão (LLOYD, 1837). A simplificação no entanto cobrava um preço ao apresentar apenas uma metade do padrão de interferência, dificultando justamente a observação de que a franja central era escura. O problema no entanto podia ser contornado introduzindo-se um atraso no feixe oriundo diretamente da fonte⁹¹, de modo a fazer com que a franja central fosse deslocada e aparecesse claramente na imagem projetada (MACH, 1926, p. 167).

91 A maneira como este atraso podia ser controlado será mais detalhada do capítulo 4 em diante, quando analisaremos as chamadas “placas compensadoras”.

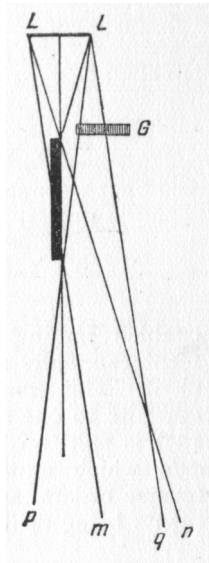


Fig. 3.7 – Espelho de Lloyd. A placa G serviria para introduzir um atraso no feixe direto com o objetivo de trazer a franja central escura para o campo de visão (MACH, 1926, p. 166).

Preston argumenta que os estudos de Fresnel e Arago com o biprisma, em que usaram uma placa fina sobre uma metade do biprisma, e depois duas placas, uma sobre cada metade, pretendendo compará-las, teria sido o germe dos refratômetros interferenciais, isto é, dos interferômetros (PRESTON, 1928, p. 187).

3.3 Um por Todos e Todos pela Teoria Ondulatória da Luz

Os trabalhos pioneiros de Young com a teoria ondulatória não tiveram uma acolhida amistosa pela parte da ortodoxia corpuscular britânica. Em particular um texto atribuído a Henry Brougham (BROUGHAM, 1803), futuro lorde chanceler do reino e um defensor ferrenho da visão corpuscular da luz, detratava o artigo de Young nas *Philosophical Transactions*

de 1802 (referente à conferência *bakeriana* do final de 1801), e pode ter contribuído para o relativo ostracismo a que foram condenadas as ideias de Young sobre a natureza da luz no Reino Unido por mais de uma década⁹².

Foi quando, do outro lado do canal, surgiu Fresnel. Formado pela prestigiosa *École des Ponts et Chaussées*, Fresnel foi mantido em prisão domiciliar durante o governo dos 100 dias⁹³ por seu apoio à monarquia. Autodidata, Fresnel fez bom uso do tempo livre estudando óptica. Em 23 de setembro de 1815, já restaurada a monarquia, escreveu para Arago uma primeira carta, procurando fazer contatos acadêmicos e se inserir na comunidade científica francesa da época, especialmente em meio às pessoas ligadas à pesquisa de vanguarda na área de óptica.

Em 26 de outubro de 1815 Fresnel encaminhou uma segunda carta para Arago, dando ciência de sua monografia sobre difração enviada através de seu tio. Depois de receber o texto

92 Tradicionalmente os motivos para o abandono relativo das ideias ondulatórias de Young no Reino Unido são creditados não apenas à campanha difamatória promovida por Brougham – segundo R. A. Weale movido por um revanchismo deflagrado por críticas civilizadas da parte de Young ao primeiro trabalho de Brougham em óptica (WEALE, 1965, p. 392) –, mas também pela inabilidade de Young em se expressar numa linguagem reconhecida como científica por seus pares, tanto do ponto de vista da retórica quanto da expressão matemática, que são consideradas em geral confusas. Todos estes argumentos são objetáveis, no entanto. Em primeiro lugar, a influência real de Brougham à época não devia ser assim tão considerável, uma vez que ele ainda era muito jovem e praticamente não tinha qualquer reconhecimento oficial, nem científico nem político. Além disso, se comparada com a ciência francesa, a ciência inglesa do período dispunha de muito menos recursos de expressão matemática, e de fato em geral não os solicitava. Assim, pode ser que a crítica ao tratamento matemático “confuso” ou pouco rigoroso de Young seja fora de contexto, ou julgado anacronicamente. Finalmente, o linguajar quacre de Young não o impediu de ser reconhecido em outras áreas para onde seu eclético intelecto o levou, ou de ser convidado a proferir palestras na *Royal Institution* ou de escrever um número tão grande de verbetes sobre os mais diversos temas para a *Encyclopaedia Britannica* que Young recorreu a pseudônimos para não se sentir mal com o fato.

93 Em abril de 1815 Napoleão fugiu da ilha de Elba e retornou à França, tomando o governo e reorganizando o exército revolucionário por um período de 100 dias, até sua derrota pelas forças aliadas sob o comando do duque de Wellington em Waterloo.

de Fresnel, Arago respondeu impressionado, porém fazendo ver a Fresnel o trabalho pioneiro de Young. Com um evidente constrangimento Fresnel escreveu a Young em 24 de maio de 1816:

Senhor,

Eu vos rogo aceitar a homenagem que vos faço de um exemplar de minha Memória sobre a difração. Quando a submeti ao Instituto eu não conhecia vossas experiências e a consequência que vós havíeis dela tirado, de sorte que apresentei como novas as explicações que vós já havíeis dado há muito tempo. Eu as suprimi da Memória impressa que tenho a honra de vos enviar, e nelas deixei apenas aquela das franjas coloridas das sombras, pois que aí adicionei algo àquilo que vós já havíeis dito sobre este fenômeno. (...)

Quando se crê ter feito uma descoberta, não se aprende sem arrependimento que se foi precedido, e eu vos confesso francamente, Senhor, que é também o sentimento que experimentei quando o Sr. Arago me fez ver que não havia senão um pequeno número de observações verdadeiramente novas na Memória que eu havia apresentado ao Instituto. Mas se algo poderia me consolar de não ter a vantagem da prioridade foi me encontrar com um sábio que tem enriquecido a física de um tão grande número de descobertas importantes, e ao mesmo tempo isto não contribuiu pouco para aumentar minha confiança na teoria que tenho adotado (FRESNEL, 1868, pp. 737-738 e 740)[iii10].

A partir daí estabeleceu-se uma correspondência profícua entre os três, e da troca de ideias surgiram vários desdobramentos da teoria ondulatória da luz, especialmente nas explicações envolvendo os diversos e complexos fenômenos relacionados à polarização da luz.

Enquanto isso, na Escócia, David Brewster (1781-1868) pesquisava avidamente diversos fenômenos ópticos, em particular aqueles ligados à polarização da luz. Em 1817, Brewster publicava sua descoberta de que duas lâminas de vidro de faces paralelas perfeitamente idênticas, colocadas uma após a outra de modo a formar um pequeno ângulo entre elas, davam origem a franjas de interferência⁹⁴ (BREWSTER, 1817 *apud* WILLIAMS,

94 A frase não é boa. Sendo um defensor da teoria corpuscular da luz, Brewster não se referiria ao efeito como

1950, p. 41).

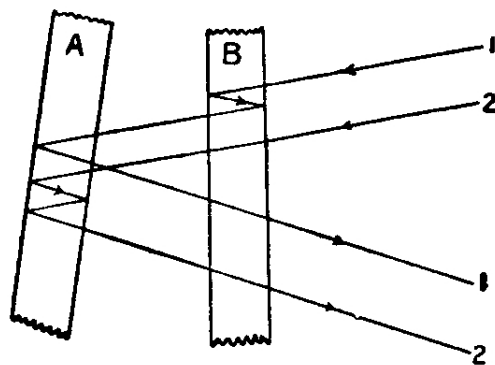


Fig. 3.8 – Franjas de Brewster. Raios que sofrem duas reflexões no interior da lâmina B (raio 1) terão uma diferença de percurso semelhante à de raios que sofrem três reflexões no interior da lâmina A (raio 2), e portanto interferirão. Não estão representadas na figura as diversas refrações em todas as interfaces, à guisa de clareza (WILLIAMS, 1950, p. 41).

3.4 A Interferência da Luz Polarizada

Foi preciso pelo menos uma geração para levar a interferometria dos trabalhos pioneiros de Young e Fresnel até o estado de técnica reconhecida em meados do século XIX. Em grande medida os desenvolvimentos experimentais e conceituais neste sentido ocorreram através da pesquisa de duas questões fundamentais: (1) a busca de exatidão na determinação dos índices de refração de substâncias transparentes, e de sua relação com variações na temperatura, densidade ou constituição das amostras, o que tinha implicações quanto à

“franjas de interferência”. É importante mencionar a descoberta, no entanto, pois as assim chamadas “franjas de Brewster” estarão na base da invenção tanto do interferômetro de Jamin, e por conseguinte do interferômetro de Mach-Zehnder (capítulo 4), quanto dos interferômetros de múltiplos feixes, como o Fabry-Perot (capítulo 9).

natureza da luz; e (2) as tentativas de explicar os efeitos observados envolvendo a polarização da luz em diferentes situações, um grande desafio para a teoria ondulatória do início do século XIX⁹⁵.

Os efeitos de polarização deixaram de ser um empecilho e passaram a ser uma corroboração da teoria ondulatória da luz na medida em que uma mudança conceitual fundamental foi adotada por Young e Fresnel a partir de uma série de experimentos realizados por Fresnel e Arago com a interferência da luz polarizada⁹⁶. Os resultados destas experiências sugeriam que a luz seria uma onda não longitudinal, como até então se havia suposto, porém *transversal*. Como lembraria mais tarde Arago, a questão da interferência da luz polarizada

foi objeto de um trabalho difícil que Fresnel desenvolveu com um de seus amigos (Arago). O exemplo que eles deram ao publicá-lo, de indicar para qual parte cada um deles contribuiu, senão à execução material das diversas experiências, ao menos à sua invenção, mereceria, acredito, ser seguido; pois as associações deste gênero frequentemente terminam mal, pois o público se obstinando, às vezes por capricho, em não tratar os interessados em pé de perfeita igualdade, põe em jogo assim o amor-próprio do autor, talvez aquela de todas as paixões humanas que exige mais gerenciamento (ARAGO, 1854, p. 135)[iii11].

Este foi isoladamente o mais importante avanço conceitual no processo que levou à derrocada da visão laplaciana para a luz e à aceitação quase que generalizada da teoria

95 Os capítulos seguintes abordarão justamente essas duas vertentes. A história das dificuldades para explicar a complexa série de descobertas relacionadas à polarização da luz em termos ondulatórios preencheria uma tese por si mesma. Para nossa sorte, isto já foi feito, e de maneira brilhante, ao longo da maior parte de “The Rise of the Wave Theory of Light”, de Jed Buchwald (BUCHWALD, 1989). As dificuldades foram duradouras, e também para que não se acredite que Fresnel, Arago e Young eram os únicos a utilizar e aperfeiçoar a teoria ondulatória no início do século XIX, vale a pena citar o físico irlandês James MacCullagh, que em 1830, ao apresentar à *Royal Irish Academy* um modelo (ondulatório) mais simples para explicar a birrefringência, ainda registrava que “as dificuldades matemáticas sob as quais a bela e interessante teoria de Fresnel vem sendo elaborada até agora são bem conhecidas, e tem sido consideradas como quase insuperáveis” (MacCULLAGH, 1830).

96 Para detalhes dos experimentos e suas implicações para a natureza do éter luminífero, aguardar o capítulo 5.

ondulatória ao longo dos anos 1820s e início dos 1830s.

3.5 A Entronização da Teoria Ondulatória da Luz

Em meados dos anos 1820s a maré já mudara e a teoria ondulatória desfrutava de um reconhecimento e aceitação acadêmicos superiores aos concedidos à teoria da emissão, graças em boa parte à engenhosidade, à dedicação e ao espírito de cooperação de Young, Arago e Fresnel. Como percebeu Young numa carta escrita a Arago em 29 de março de 1827,

(...) tenho também o orgulho e prazer de vos informar que o Conselho da Royal Society honrou-nos *a nós todos* ao outorgar a nosso amigo Fresnel a medalha Rumford, que não foi concedida senão uma vez desde a morte de Malus. Nesta determinação o mais zeloso defensor da causa foi o Sr. Herschel⁹⁷: eu fui obrigado a permanecer em silêncio, tendo muito interesse no assunto, mas de fato *não houve oposição*. (...) Pensando que esta circunstância faria nosso sistema *um pouco mais popular* que até então, determinei que se inserisse nas minhas Coleções Náuticas e Astronômicas uma tradução da monografia do Sr. Fresnel que foi publicada em “Thomson's Chemistry”, e creio que ele não irá desgostar de sua aparência (FRESNEL, 1868, p. 778, grifos nossos)[iii12].

Dos três amigos, apenas Arago sobreviveria ao final da década. Fresnel contraiu tuberculose e retirou-se para Ville d'Avray, próximo a Paris, onde convalesceu até sua morte em 14 de julho de 1827⁹⁸. Coube a Arago o elogio fúnebre do amigo:

Como poderia eu, de fato, sem a mais viva emoção, vir ocupar a esta tribuna

97 O astrônomo britânico John Herschel (1792-1871), filho de William Herschel, descobridor de Urano, era “provavelmente o advogado mais importante da teoria ondulatória na Inglaterra”. Seu artigo de 1827 foi o primeiro suporte substancial da “teoria de Fresnel” nas ilhas britânicas (WILSON, 1972, p. 57).

98 A propósito, uma data de falecimento infeliz para um monarquista como Fresnel.

o lugar que tão dignamente preencheu, durante oito anos, o geômetra ilustre cuje morte inesperada não traz menos pesar à amizade que às ciências e às letras. (...)

Fresnel já residia no campo quando a Sociedade real de Londres me incumbiu de entregar-lhe a medalha de Rumford. Suas forças, então quase exauridas, lhe permitiram apenas lançar um olhar sobre este símbolo, tão raramente outorgado, da estima da ilustre Sociedade. (...) ‘Eu vos agradeço’, disse-me ele com uma voz apagada, ‘por ter aceito esta missão; eu imagino o quanto ela vos deve ter custado, pois vós pressentistes – não é? – que a mais bela coroa é pouca coisa, quando é preciso deitá-la sobre a tumba de um amigo’ (ARAGO, 1854, pp. 107 e 184)[iii13].

Na mesma carta de apenas poucos meses depois (de 6 de agosto de 1827) em que dava ciência da homenagem que a *Académie des Sciences* prestava a Young, Arago informava também ao colega britânico o falecimento do amigo em comum:

Apresso-me em vos anunciar que a Academia de ciências, diante da proposição de uma comissão da qual eu era membro, e que me confiou a honra de desenvolver vossos títulos, acaba de vos nomear, no lugar de Volta, um de seus *oito* associados estrangeiros. (...)

Vós ficastes sabendo sem dúvida que perda cruel as ciências tiveram o mês passado. O pobre Fresnel já estava meio apagado quando lhe entreguei vossas medalhas. Sua morte mergulhou aqui na mais viva dor todos os que são dignos de apreciar o acordo de um belo talento com um belo caráter (FRESNEL, 1868, pp. 779-780)[iii14].

A resposta de Young foi escrita mais de quatro semanas depois, em 2 de setembro, no seu inconfundível estilo quacre que aliava humildade sincera a um certo desapego afetivo:

Em meu retorno de Liverpool alguns dias atrás, encontrei sobre minha mesa vossa prestativa carta anunciando a mim o sucesso de vossos gentis esforços em meu favor, e minha nomeação como um dos oito associados estrangeiros da Academia. Se algo pode adicionar ao valor de um elogio tão distinto seria a consciência de devê-lo principalmente à boa opinião de um juiz tão cândido e tão iluminado quanto vós. Devo confessar no entanto que não pude ler sem alguma confusão meu próprio nome encabeçando uma lista na qual aquele de Olbers não era senão o terceiro: mas [por isso] fico ainda mais grato à Academia por sua parcialidade a meu favor.

De fato eu lamento a fatalidade que por uma segunda vez se seguiu à adjudicação da medalha Rumford. Vós não comentais o quanto nosso pobre amigo

sentiu gratificação por ela, que era nosso desejo que ele devesse receber, nem se ele se alegrou com minha tradução de sua monografia para o inglês (FRESNEL, 1868, pp. 780)[iii15].

O próprio Young viria a falecer pouco depois, em 1829. Arago, que ao contrário de Fresnel desfrutou de uma vida longa, falecendo apenas em 1853, foi instrumental na formação e, especialmente, no fomento de uma nova geração de talentos dedicados à óptica ondulatória, dentre os quais sobressaíam os nomes de Léon Foucault (1819-1868), Hippolyte Fizeau (1819-1896) e Jules Jamin (1818-1886).

4 Medindo Índices de Refração

“It is the pitting of one's brains against bits of iron, metals and crystals and making them do what you want them to do. When you are successful that is all the reward you want”⁹⁹

A. A. Michelson

4.1 O Índice de Refração

A relação matemática que permite prever corretamente o comportamento da luz ao atravessar a interface entre dois meios transparentes, a lei da refração, parece ter sido primeiro obtida pelo sábio persa muçulmano Ibn Sahl (ca.940-1000), que a utilizou ao longo de sua análise das lentes em seu tratado, de 984, sobre espelhos e lentes “incendiários” (RASHED, 1990). A relação foi usada ainda pelo polímata árabe Ibn Al-Haytham (965-ca.1040), mais conhecido pelo seu nome latinizado, Alhazen, e a quem a descoberta da relação algumas vezes é atribuída (AL-KHALILI, 2009). Na Europa, a relação foi redescoberta pelo polímata inglês Thomas Harriot (1560-1621) em 1602 (FISHMAN, 2000), e posteriormente pelo astrônomo e matemático holandês Willebrord Snel¹⁰⁰ (1580-1626) em 1621, e por isso a conhecemos como “lei de Snel”¹⁰¹. A lei de Snel define uma grandeza de dimensão unitária característica de

99 “É o desgaste do cérebro de uma pessoa contra pedaços de ferro, metais e cristais, e conseguir que eles façam o que você deseja que façam. Quando você é bem-sucedido, isto é toda a recompensa que você quer” (MICHELSON, 1929, tradução nossa).

100 Diversas referências usam a grafia alternativa “Snell”.

101 A relação é também conhecida como “lei de Snel-Descartes”, ou mesmo simplesmente “lei de Descartes”, reconhecendo o papel do filósofo francês René Descartes (1596-1650) na sua difusão ao publicá-la em sua obra “Dióptrica”, encartada ao “Discurso do Método”, de 1637 (DESCARTES, 1668).

cada par de meios, conhecida (hoje) como *índice de refração relativo* (n_{rel}), que ajuda a descrever a possibilidade de mudança de direção experimentada por um raio luminoso ao atravessar a superfície de separação entre dois meios transparentes. Quando um raio de luz incide sobre a interface entre dois meios transparentes, formando um ângulo i com a reta normal à superfície no ponto de incidência, o raio refratado propaga-se no meio 2 a partir deste ponto numa direção que forma um ângulo r com a reta normal de acordo com a lei de Snell:

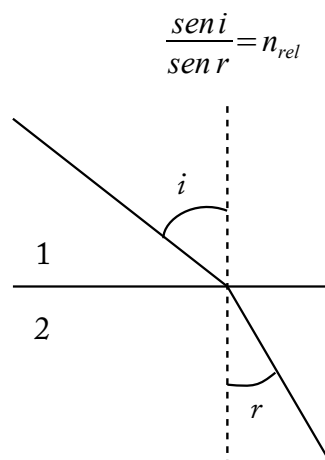


Fig. 4.1 – Refração de um raio de luz na interface entre dois meios transparentes.

Pode-se definir um *índice de refração absoluto* (n) de uma substância como o índice de refração relativo, obtido a partir da lei de Snell, quando a luz adentra a substância oriunda de um meio escolhido como referência. Estabelecido o vácuo como este meio de referência e atribuído a ele um índice de refração absoluto unitário ($n_{vácuo} \equiv 1$), vem que:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{n_i}{n_{vácuo}} = n_i \quad \text{e} \quad \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{n_1}{n_2} = n_{rel}$$

Desta maneira, a medição de índices de refração poderia se resumir à medição dos ângulos de incidência e refração. Isto era feito comumente através de um prisma colocado sobre um *círculo de reflexão* (ou *círculo de Borda*), uma plataforma circular graduada e munida de

uma mira e um espelho, que permitia estimar ângulos com grande exatidão (HEILBRON, 1993, pp. 47-61). Como o índice de refração do ar ($n_{ar} = 1,0003$) é muito próximo da unidade, para a maior parte das experiências e aplicações práticas o índice de refração absoluto de uma substância podia ser determinado em relação ao ar em vez de em relação ao vácuo. No caso de líquidos e gases um prisma oco (de vidro de faces paralelas, por exemplo) era utilizado para conter o fluido, e o efeito devido à refração no vidro devidamente considerado. O dispositivo, inventando por Jean-Charles, *chevalier* de Borda (1733-1799), foi redescoberto por Biot por acaso numa oficina óptica de Paris. Trabalhando em conjunto com Arago¹⁰², Biot utilizou-o para estimar com grande exatidão¹⁰³ os índices de refração de diversos gases.

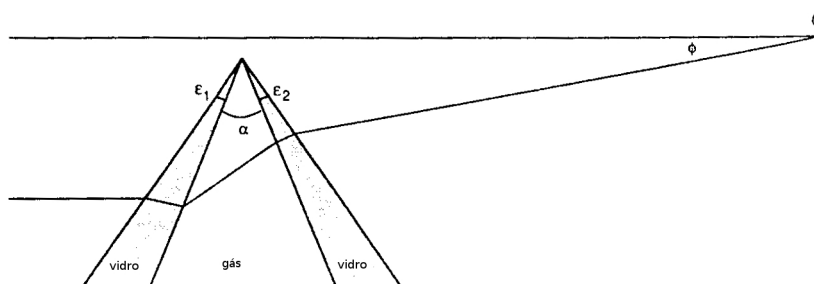


Fig. 4.2 – Método utilizado por Biot e Arago para a medição de índices de refração de gases. O ponto O representa o centro do círculo de Borda utilizado para avaliar o ângulo (ϕ) entre a luz direta e a refratada pelo prisma de gás. Conhecendo-se α , ϵ_1 , ϵ_2 e o índice de refração do vidro do prisma era possível calcular o índice de refração do gás em seu interior (HEILBRON, 1993, p. 62).

O índice de refração de uma substância não é o mesmo para diferentes cores, no entanto, de modo que um feixe de luz branca, ao ser refratado, dá origem a um pincel colorido de raios, cada cor sendo refratada em um ângulo ligeiramente distinto, um fenômeno

102 E também com o astrônomo e exímio instrumentador Nicolas Fortin (1750-1831), que não apenas construiu o círculo de reflexão utilizado mas também participou das medições (HEILBRON, 1993, p. 61).

103 Biot e Arago expressaram orgulhosamente os índices assim medidos com seis algarismos significativos, o que ajudou a estabelecer a reputação de medições acuradas com que ficou caracterizada a física laplaciana. No entanto, os valores desviavam dos mesmos índices determinados modernamente em até 2%. (HEILBRON, 1993, p. 62).

conhecido como *dispersão cromática*. Na prática isso significa que o índice de refração de uma substância é uma função do comprimento de onda da luz, sendo tanto maior quanto menor o comprimento de onda. Isto é, para a mesma incidência a luz violeta é mais desviada que a vermelha.

A refração, portanto, constituía um fenômeno fundamental, mensurável e relativamente complexo e multifacetado, e no início do século XIX era esperado de um modelo para a luz que se pretendesse minimamente bem-sucedido que o explicasse de forma simples, completa, quantitativa e consistente com outros fenômenos ópticos. O capítulo 2 mostrou como, ao longo do século anterior, diversos destes modelos buscaram dar conta do fenômeno da refração, entre outros fenômenos, e sua importância não pode ser minimizada. Conforme declararam ao *Institut de France* Arago e Alexis Petit (1791-1820) em 1815:

A teoria da refração, observada de um ponto de vista o mais geral, é uma das partes mais importantes da óptica, não somente por suas numerosas aplicações, mas ainda pelas consequências que se pode deduzir com relação à natureza da luz e às verdadeiras causas de suas propriedades (ARAGO e PETIT, 1858, pp. 123-124) [iv1].

Em particular a teoria da emissão, conforme admitida ao final do século XVIII e início do XIX, tratava a refração luminosa a partir da interação atrativa entre a matéria ordinária e os corpúsculos luminosos, de uma forma integrada não apenas a outros fenômenos ópticos importantes mas também a todo o corpo da mecânica (ou *physique générale*):

Newton, ao atribuir a refração a uma atração dos corpos pela luz, deu a este fenômeno e à lei à qual ele está submetido uma explicação tão natural e tão clara que sempre foi considerada como um dos principais argumentos a favor do sistema da emissão (ARAGO e PETIT, 1858, p. 124)[iv2].

Vale a pena lembrar neste ponto o quanto o debate sobre a natureza da luz estava em um de seus momentos mais dramáticos nesta época, e o quão envolvido Arago estava com

o assunto. Em 1815 ele realizou com Petit um estudo cujo objetivo explícito era testar algumas consequências da abordagem da teoria da emissão para o fenômeno da refração:

[S]e se percebe que, de todas as consequências gerais deduzidas da hipótese de Newton, a única que foi verificada até esta data se reduz à lei da relação constante dos senos de incidência e de refração; [e] se se percebe, além disso, que esta lei pode ser demonstrada sem que seja necessário lançar mão da ideia de uma atração, sente-se facilmente que antes de se determinar a adotar a hipótese de Newton, à exclusão de todas as outras, é indispensável examinar até que ponto as diversas conclusões que dela derivam são confirmadas pela experiência (ARAGO e PETIT, 1858, p. 124) [iv3].

Uma das consequências não testadas da teoria da emissão era a de que o *poder refringente* de uma substância, dado pela expressão¹⁰⁴

$$\frac{n^2 - 1}{d},$$

onde d era a densidade e n o índice de refração absoluto da substância, era independente da densidade da substância¹⁰⁵. Para testá-la de maneira cabal, Arago e Petit tomaram diversas substâncias em seus estados líquidos e compararam seus poderes refringentes com os dos vapores formados a partir delas, em que a densidade era significativamente distinta da fase líquida. Os resultados experimentais mostraram que o valor do poder refringente de cada substância mudava marcadamente para cada fase, e levaram os autores a afirmar que obrigavam, “admitindo a explicação newtoniana da refração, a supor, o que é no mínimo uma

104 A expressão matemática decorria de uma análise das velocidades de propagação da luz num e noutro meio a partir do princípio “das forças vivas” (conservação da energia cinética), que provava que a velocidade adquirida pela luz era independente da direção de incidência, e que a relação entre as velocidades dentro e fora da substância era igual ao índice de refração da substância (exatamente o inverso da relação prevista pela teoria ondulatória, como mostrado no capítulo 2).

105 Arago e Petit admitiam que a expressão havia sido testada para gases, porém argumentavam que nestes casos a refração era muito sutil e a expressão $\frac{n^2 - 1}{d}$ não era a única que se adequaria aos resultados obtidos (ARAGO e PETIT, 1858, pp. 125-126).

conclusão bastante singular, que a atração da luz por um mesmo corpo não se exerce proporcionalmente à densidade” (ARAGO e PETIT, 1858, p. 127).

Arago e Petit testaram também a expressão do poder refringente para gases compostos, concluindo que a análise não concordava com os resultados experimentais, e que o poder refringente de um corpo sofria variações, “seja pelo efeito da mudança de densidade, seja pelo estado de combinação no qual o corpo se encontra”.

Finalmente, havia a questão da dispersão cromática associada à refração. Uma grandeza pertinente dentro da tradição corpuscular era a chamada *força dispersiva* de um corpo, que media o poder dispersivo tomando para isso a diferença entre os poderes refringentes relativos às cores extremas do espectro. Na teoria da emissão esta diferença deveria permanecer constante para um mesmo corpo, porém as experiências feitas por Arago e Petit mostraram que ela diminuía com a densidade¹⁰⁶. Com um detalhe: a força dispersiva caía com a densidade de uma maneira *distinta* daquela pela qual o poder refringente caía com a densidade. Isso levava a um novo problema, como Arago e Petit perceberam:

[a]ssim, ainda que se a variação do poder refringente pudesse ser explicada admitindo-se que a atração da luz por um corpo varie segundo uma lei diferente daquela da razão direta das densidades, vê-se que, para dar conta da variação observada no poder dispersivo [*sic*], seria necessário supor também que a ação de um corpo sobre os raios diferentemente coloridos siga, nas mudanças de densidade, uma lei diferente para cada um destes raios. Estas diversas suposições diminuem, sem dúvida, e [*sic*] a simplicidade e a verossimilhança da teoria newtoniana (ARAGO e PETIT, 1858, pp. 130-131)[iv4].

O ponto crucial a ser destacado no trabalho de Arago e Petit é a importância da medição acurada de índices de refração ou de grandezas correlatas para a discussão de diversos

106 É bem verdade que os autores reconheciam a dificuldade de obter a força dispersiva no caso dos gases, em que a dispersão cromática era muito pequena (ARAGO e PETIT, 1858, p. 129).

aspectos relevantes do debate sobre a natureza da luz. É em grande medida nesse contexto que a engenhosidade e a erudição científica de Arago desempenharam um papel significativo nos anos seguintes.

4.2 O Duplo Tubo de Arago

A determinação da velocidade de propagação da luz em meios refringentes constituía uma questão central para Arago. A teoria da emissão previa que um raio de luz ingressando num meio refringente como o vidro, oriundo do ar, deveria ter sua velocidade *aumentada* pela atração exercida pela matéria mais densa do vidro sobre os corpúsculos de luz, enquanto a teoria ondulatória implicava justamente o contrário, isto é, que as ondas luminosas deveriam se propagar *mais lentamente* no vidro para que a lei da refração pudesse ser explicada. Portanto, no entender de Arago, se fosse possível determinar de alguma maneira a velocidade de propagação da luz em algum meio refringente e compará-la com a velocidade da luz no vácuo (ou no ar), ter-se-ia de fato um *experimentum crucis* para decidir a questão da natureza da luz de uma vez por todas. Com a visão e a saúde debilitadas, Arago viveu apenas o suficiente para testemunhar a realização dos primeiros experimentos desta natureza, realizados quase que simultaneamente no início de 1850 por dois de seus discípulos, Léon Foucault e Hippolyte Fizeau, este último trabalhando em conjunto com o inventor Louis Bréguet¹⁰⁷ (1803-1883)

107 Incidentalmente, pai do pioneiro da aviação francês de mesmo nome.

(FOUCAULT, 1853). Os resultados destes experimentos, que se basearam em uma sugestão de Arago de 1838, por sua vez inspirada nos trabalhos de Charles Wheatstone (1802-1875) de 1835, em que um espelho giratório em grande rotação era utilizado para tentar medir a velocidade da centelha elétrica, mostraram inequivocamente que a velocidade da luz num meio refringente era de fato menor que a velocidade da luz no ar, corroborando portanto o modelo ondulatório¹⁰⁸. No entanto, é pouco provável que àquela época houvesse muita dúvida quanto à natureza da luz, e apenas alguns poucos “dinossauros” ainda se agarravam à teoria corpuscular¹⁰⁹.

Graças ao fenômeno da interferência, havia fortes argumentos para se acreditar que a velocidade da luz diminuía ao ingressar, oriunda do ar, num meio refringente, mesmo no início

108 A frase que *encerra* a tese de doutorado de Foucault sobre o assunto é, de fato, “[a] última conclusão deste trabalho consiste portanto em declarar o sistema de emissão *incompatível* com a realidade dos fatos” (FOUCAULT, 1853, p. 35, grifo no original).

109 Um deles era Brougham, que, recrutado por Brewster e resgatado de um certo ostracismo científico, chegou a realizar uma série de experimentos sobre a difração da luz por um objeto opaco que representou provavelmente o canto do cisne da teoria corpuscular (POWELL, 1852). Brewster já havia mesmo produzido uma biografia de Newton em 1831 (e posteriormente faria uma segunda, lançada em 1855), e é bastante provável que um dos principais motivos por trás desta iniciativa fosse utilizar-se da autoridade de Newton para buscar reafirmar a teoria corpuscular da luz, pretensamente defendida pelo famoso filósofo natural inglês. Havia, no entanto, outros motivos, dentre os quais salvar a imagem de Newton do que Brewster considerava uma série de heresias biográficas perpetrada por ninguém menos que Biot, que havia publicado a primeira biografia oitocentista de Newton em 1822. Também em Biot o principal objetivo da obra era o de identificar o programa laplaciano como o lícito herdeiro da ciência newtoniana, em especial em defesa da teoria corpuscular, para a qual Biot lançou mão de um paralelo entre as contendas entre Newton e Hooke e suas próprias discussões com Fresnel e outros defensores da teoria ondulatória. Incidentalmente, estes estudos biográficos de Newton estão intimamente ligados ao surgimento e à evolução crítica da historiografia da ciência em meados do século XIX (HIGGITT, 2007). Após a derrocada da teoria corpuscular, Biot, seguido por Brewster, passou a declarar-se “rienista” (do francês *rien* = nada), querendo expressar um desinteresse pela natureza última da luz e uma ênfase nas propriedades mensuráveis dos fenômenos ópticos, numa saída honrosa pouco sincera e que trazia implícito um arroubo de positivismo precoce. Sobre a estratégia de Brewster e Brougham no episódio em mais detalhes, ver CHEN e BARKER, 1992.

do século, em particular os experimentos relacionados às condições de formação de franjas para além das bordas da sombra geométrica de fios finos e o efeito da introdução de lâminas de vidro finas num de seus lados¹¹⁰. Estes resultados levaram Arago a concluir que “[t]odas as circunstâncias desta experiência são explicadas muito bem dentro da teoria que o Sr. Fresnel adotou, porém para que isso ocorra é forçoso admitir que a luz se move *mais lentamente* no vidro do que no ar” (ARAGO, 1858h, p. 345, grifos nossos)¹¹¹.

A importância destes estudos não pode ser colocada de maneira mais lúcida que pelo próprio Arago, com a vantagem do distanciamento histórico:

A nota que acaba de ser lida foi reproduzida nos jornais científicos do início do ano de 1816. Ela fixa nesta época a atenção dos físicos, sobretudo por esta circunstância de que ela parecia implicar a consequência, em oposição ao sistema de emissão, de que a velocidade da luz devia ser menos rápida [*sic*] no vidro que no ar. Quanto a mim, sem estar menos chocado por este desacordo, eu me ative, guiado pela teoria de Fresnel, a deduzir de minhas observações um programa de experiências que deveriam servir a encontrar os índices de refração em circunstâncias nas quais os métodos conhecidos não poderiam ser aplicados. Foi assim, por exemplo, que indiquei a possibilidade de determinar o índice de refração de lâminas de certos metais (...). Foi assim que antevi a possibilidade de comparar os índices de refração do ar seco e do ar úmido (...)

Esta questão, na minha qualidade de astrônomo, devia me interessar particularmente. (ARAGO, 1858h, p. 315-316)[iv5].

Partindo da suposição de que a teoria das ondulações estava correta, Arago concebeu um instrumento específico para estudar o deslocamento das franjas e relacioná-lo com o atraso decorrente da diminuição da velocidade de um dos feixes interferentes em relação ao outro. O

110 Como visto no capítulo 3.

111 Vê-se que Arago ainda não estava completamente comprometido com a teoria ondulatória a esta época (1816). Como veremos a seguir, estas observações seriam usadas a seguir por Arago na concepção das “placas compensadoras” que tornariam possíveis medições de diferenças refrativas mais significativas, ou, equivalentemente, medições mais acuradas de índices de refração.

aparelho, posteriormente chamado de “duplo tubo de Arago”, era semelhante à fenda dupla sugerida por Young, porém, ao invés de atravessar as fendas e se propagar sem qualquer impedimento no ar, os feixes que deixavam cada fenda no aparelho de Arago eram obrigados a atravessar cada um um tubo de couro fechado contendo ar, de um metro de extensão, antes de interferirem. Os tubos eram paralelos e tinham janelas de vidro em suas extremidades, permitindo a passagem da luz.

A questão da refração da luz das estrelas pela atmosfera e seu efeito sobre a posição aparente dos objetos celestes era evidentemente relevante para a astronomia¹¹². Em particular Arago e Fresnel se debruçaram, em 1818, sobre o possível efeito que variações da umidade do ar teriam na propagação da luz, e se perguntaram se seria possível estimar a diferença entre os índices de refração do ar submetido a diferentes estados de umidade¹¹³.

A ideia de Arago era que, uma vez projetadas as franjas de interferência, o ar nos tubos pudesse ter sua umidade modificada e com a consequente alteração do índice de refração do ar nestes tubos ocorresse uma defasagem no tempo de percurso da onda luminosa de um tubo em relação ao outro. Caso o efeito devido aos diferentes estados de umidade fosse significativo,

112 No “Tratado sobre as Probabilidades”, obra em que Laplace introduziu seu famoso “demônio”, que inspirou o determinismo laplaciano, a variação aparente da posição dos objetos celestes era estudada, levando à introdução de uma “função de erro” (distribuição gaussiana). Mais tarde a função de erro viria a representar distribuições reais, como por exemplo a distribuição de velocidades de Maxwell-Boltzmann na mecânica estatística.

113 À parte os estudos inconclusivos realizados por Arago em colaboração com Biot em 1806, a questão havia sido abordada de forma especulativa anteriormente por Joseph Huddart (1741-1816), em 1796, e por Gaspard Monge (1746-1818) no contexto da formação de miragens, e também por William Hyde Wollaston (1766-1828) em 1801, numa observação não continuada. Mesmo Laplace havia inserido no 4º volume da “Mecânica Celeste” um cálculo relativo a isto no qual supunha (incorretamente, como visto) que o poder refringente era o mesmo para um líquido e para seu vapor, de onde pôde deduzir que o ar úmido teria um índice de refração maior que o do ar seco (ARAGO, 1858h, pp. 329-331).

isso se manifestaria como um deslocamento lateral das franjas de interferência, que Arago tinha a esperança de conseguir medir¹¹⁴:

Nós precisávamos apenas, para chegar ao resultado, determinar a localização das bandas quando o ar estava no mesmo estado dentro de cada um dos tubos, e ver se estas mesmas bandas se deslocavam quando das duas colunas horizontais de ar uma estava seca e a outra úmida (ARAGO, 1858h, p. 316)[iv6].

Arago observou que o máximo central da figura de interferência não ocorria exatamente no centro de simetria do sistema, mas era projetado deslocado para um dos lados de uma distância equivalente a cerca de um quarto de franja, porém pôde explicar o efeito pela provável pequena desigualdade nas espessuras das lâminas de vidro atravessadas por um e outro feixe. De toda maneira, bastava levar em consideração o deslocamento *relativo* das franjas.

Para a realização das medições, o ar era ressecado em um dos tubos com potassa cáustica¹¹⁵, e no tubo vizinho uma certa quantidade de água era deixada para garantir que o ar ali estivesse saturado de umidade. Disto resultava um deslocamento relativo das franjas equivalente à largura de uma franja e um quarto na direção do tubo ressecado, o que mostrava que o ar seco refratava um pouco menos que o ar úmido. A partir dos deslocamentos das franjas podia-se determinar a diferença de velocidades de propagação da luz em um e outro caso.

114 A originalidade do experimento proposto por Arago é evidenciada pelo seguinte comentário feito por Laplace: “não sei por que fala-se tão pouco da experiência tão curiosa do Sr. Arago, na qual se determina o índice de refração dos corpos *com o auxílio de raios que não foram refratados*” (grifo nosso). Posteriormente, quando do lançamento da 5ª edição de sua obra “Exposition du Système du Monde”, Laplace incluiria no texto ainda outro comentário a respeito do experimento: “enfim, o Sr. Arago, através de um meio tão preciso quanto engenhoso, se assegurou que a influência da umidade do ar sobre sua refração é insensível” (ARAGO, 1858h, p. 320).

115 Hidróxido de potássio (KOH).

Arago percebeu no entanto que o deslocamento das franjas poderia se dever à deposição de uma camada de orvalho sobre a superfície interna das placas de vidro nas extremidades do tubo úmido, prejudicando assim a possibilidade de determinação quantitativa do atraso através da medição do deslocamento das franjas, e levando à conclusão de que o sistema só poderia prover uma análise qualitativa do fenômeno, *i. e.*, de que o ar úmido refratava menos a luz que o ar seco. Fresnel, cuja mente já pensava interferometricamente, veio em seu socorro:

Eu [Arago] mantinha que para além desta conclusão a experiência era sem valor. Fresnel, meu colaborador e amigo, não compartilhava de minha opinião: ele acreditara, aliás, ter reconhecido, pela ausência de nuances coloridos nas superfícies do vidro correspondentes ao tubo úmido, que nenhuma camada líquida havia sido ali depositada. Eu fui atingido pelo valor destas considerações, sobretudo porque elas se fundamentavam em observações feitas por um olho ao qual nada escapava (ARAGO, 1858h, pp. 317-318)[iv7].

Arago engendrou então um teste. Fez construir um sistema em tudo semelhante, porém com tubos de apenas 3 cm de comprimento:

Ora, repetindo a experiência um grande número de vezes não encontrei mais nenhum traço do deslocamento de uma banda e um quarto que se observava invariavelmente operando nos tubos de um metro de comprimento. Este deslocamento de uma banda e um quarto dependia portanto totalmente da ação do ar úmido, e em nada de uma leve camada de água que seria depositada sobre as paredes internas do vidro que fechava este tubo (ARAGO, 1858h, p. 318)[iv8].

No ano seguinte (1819) Arago deu continuidade à pesquisa, o que, escrevendo na década de 1850, ele justificava da seguinte maneira:

Àquela época, poucos físicos dispensavam qualquer confiança à teoria das ondulações: para levá-los a admitir que o deslocamento de uma banda e um quarto, assinalado na experiência supracitada, provava que o ar úmido refratava um tanto pouco menos que o ar seco, eu acreditei dever me dedicar a experiências diretas (ARAGO, 1858h, p. 319)[iv9].

Tendo mandado construir novos tubos, aos quais agora estavam acoplados tubos barométricos que permitiam conhecer a densidade do ar contido em cada tubo, Arago dedicou-se a determinar as diferenças operadas sobre o índice de refração do ar por modificações em sua pressão, ou, equivalentemente, em sua densidade. Os resultados numéricos (obtidos supondo-se correto o modelo ondulatório) mostraram um grande acordo com o que se podia deduzir da teoria corpuscular, e, em particular, que “bastava uma diferença de 1 milímetro sobre 50 para que as bandas fossem deslocadas de uma banda e um quarto” (ARAGO, 1858h, p. 319), isto é, a diferença na refração devida à umidade do ar, em relação ao ar seco, equivalia a uma diferença “quase que insensível” em sua densidade¹¹⁶.

Mas não apenas o vapor d'água presente na atmosfera (sua umidade relativa) poderia interferir nas observações astronômicas. De maneira mais evidente, é quando esta umidade condensa na forma de névoa ou bruma que se imaginava que a qualidade e a exatidão das observações poderia ser mais afetada¹¹⁷.

Para este estudo foi então consignada aos fabricantes de instrumentos ópticos de precisão Jules Duboscq (1817-1886) e Henri Soleil (?-1879) a construção de um novo aparelho (JAMIN, 1856b, p. 345)¹¹⁸, semelhante aos equipamentos inicialmente utilizados por

116 E no entanto Arago ainda se surpreenderia com a afirmativa, presente na edição de 1849 do “Tratado de Astronomia” de John Herschel, e, portanto, bastante tardia, levando-se em conta o fato de que as observações provando o contrário realizadas por Arago e Fresnel foram publicadas em 1822, de que “o poder refringente do ar é sensivelmente afetado por sua umidade” (ARAGO, 1858h, p. 329).

117 Havia, inclusive, estranhas elocubrações a respeito da trajetória em zigue-zague observada nos relâmpagos não passar de um efeito aparente devido à refração “prismática” da luz através das nuvens (ARAGO, 1858h, p. 333).

118 Aqui é preciso um cuidado para não confundir pai e filho: no início de 1850 o fabricante de peças e instrumentos ópticos Jean Baptiste Soleil passou a firma para seu filho (Henri) e seu genro (Duboscq), dividindo-a em duas oficinas distintas: enquanto a Henri coube a gerência da oficina de preparo de vidros

Arago, porém com a possibilidade de produzir bruma em um dos tubos¹¹⁹.

É importante notar que a demanda por peças e instrumentos ópticos de alta qualidade a partir do início do século XIX levou a uma progressiva sofisticação dos serviços prestados por oficinas e fabricantes de instrumentos, que por sua vez precisavam não mais apenas ser construtores hábeis mas também ter uma formação científica que lhes permitisse interagir com seus clientes e efetivamente contribuir no desenvolvimento de novas tecnologias e instrumentos. Em particular no domínio da óptica, esta geração híbrida de inventores-fabricantes de instrumentos, herdeira do legado de Fortin e tendo em seus quadros nomes como Gustave Froment (1815-1865), Heinrich Ruhmkorff (1803-1877), Bréguet, Duboscq e Jean Baptiste Soleil, entre outros, foi fundamental para o avanço científico, com a invenção e desenvolvimento de um grande número de instrumentos ópticos, de modo que “no início dos anos 1870s (...) uma visita à firma de Duboscq era obrigatória para qualquer cientista viajando a Paris”¹²⁰ (BRENNI, 1996).

ópticos e cristais, a oficina de construção de instrumentos científicos ficou a cargo de Duboscq (BRENNI, 1996, p. 9). É certo, portanto, que a referência à construção do duplo tubo de Arago para o estudo do ar brumoso aponta para Duboscq, que em 1834 ingressara na oficina, com 17 anos, e Jean Baptiste Soleil (pai), e não Henri Soleil (filho). Isso está confirmado numa memória tardia de Arago (ARAGO, 1858h, p. 320).

119 De fato, como a intenção do equipamento era comparar o índice de refração do ar brumoso com o ar normal, o aparelho podia ser operado com apenas um tubo, para o ar brumoso, enquanto o outro feixe interferente atravessava o espaço desimpedido do ar do laboratório. Para que os caminhos ópticos divergissem apenas no que dizia respeito à presença da bruma no ar, Duboscq e Soleil fizeram com que as placas de vidro que fechavam as extremidades do tubo se prolongassem em direção ao espaço percorrido pela luz que atravessava o ar lateral ao tubo. Assim, o atraso devido à passagem pelas placas de vidro acontecia igualmente para os dois feixes interferentes (*cf.* figura 4.2 a seguir).

120 Incidentalmente, a firma teve continuidade até os dias de hoje, evidentemente passando por diversas fases e reestruturações. Hoje está incorporada à HORIBA-Jobin Yvon, e ainda produz equipamento óptico de alta precisão.

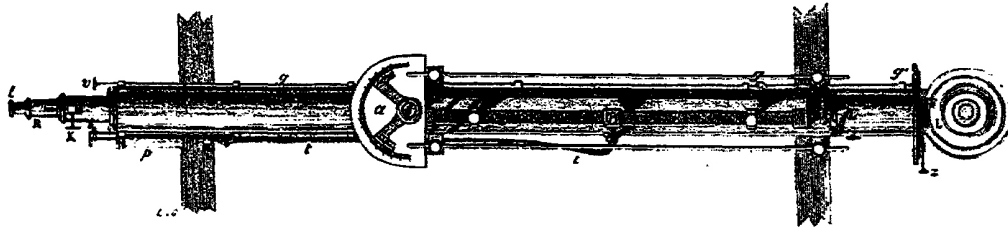
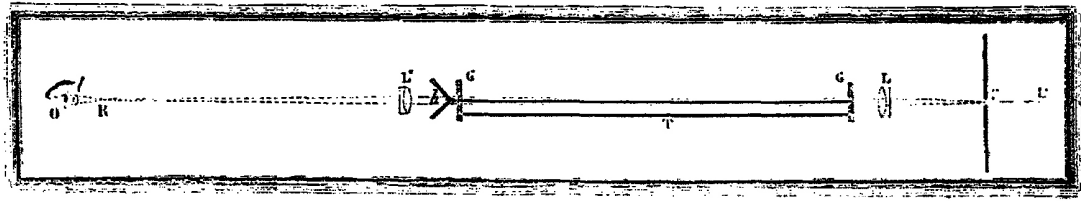


Fig. 4.3 – Tubo (ou “refratômetro diferencial”) de Arago para a medição da refração em ar brumoso – diagrama esquemático (em cima) e desenho técnico detalhado (em baixo). Note-se que as placas G que encerram o tubo estendem-se para o lado de maneira a compensar naturalmente o feixe interferente que atravessa o ar do laboratório (ARAGO, 1858h, p. 322).

O aparelho consistia num tubo de seção retangular, no meio do qual se podia introduzir vapor por aspiração. Uma fenda regulável determinava a admissão da luz de uma lâmpada, a seguir colimada por uma lente posicionada antes do tubo. Placas compensadoras de angulação variável aguardavam à saída do tubo, e o padrão de interferência era finalmente projetado por uma luneta que coletava tanto a luz oriunda do tubo quanto os feixes, paralelos àquela, que venceram o mesmo comprimento na região externa ao tubo, pelo lado direito.

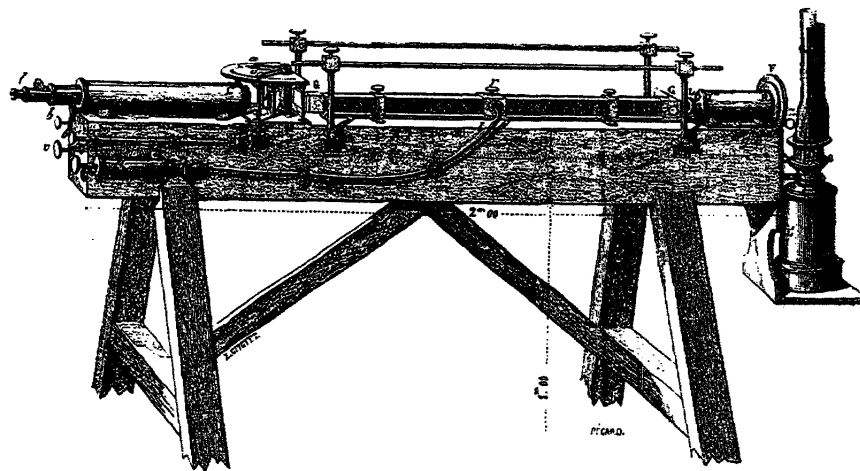


Fig. 4.4 – Tubo de Arago para a medição da refração em ar brumoso – vista em perspectiva. Percebe-se melhor aqui a estrutura das placas compensadoras na saída do tubo e o semicírculo graduado que permitia a medição de suas inclinações (ARAGO, 1858h, p. 323).

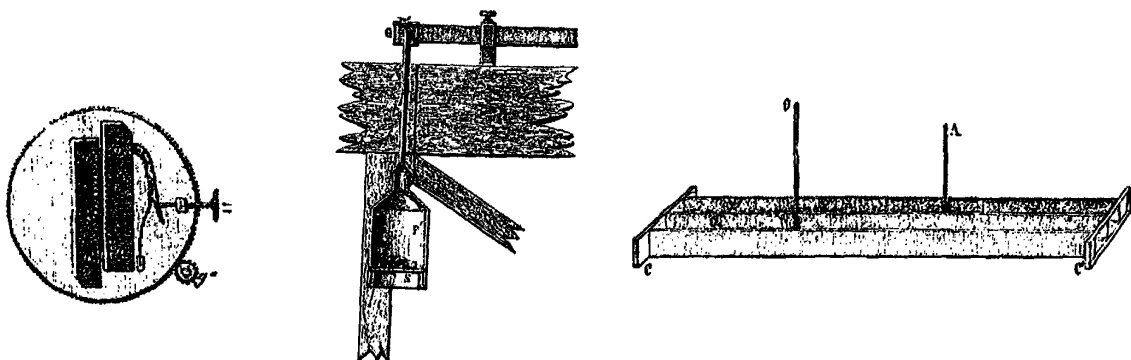


Fig. 4.5 – Detalhes da montagem do tubo de Arago para a medição da refração em ar brumoso: fenda regulável para admissão da luz (esq.); maneira de introduzir o vapor no tubo (centro); tubos acessórios que podiam ser encaixados no tubo de Arago para a determinação do índice de refração de líquidos (dir.) (ARAGO, 1858h, pp. 324-325).

A história da tentativa de medição da diferença entre os índices de refração do ar seco e do ar úmido constitui um marco crucial para a evolução da óptica nos períodos iniciais do século XIX por um outro motivo ainda: foi para resolver esta questão que Arago convidou Fresnel a trabalhar em conjunto com ele: “propus a meu ilustre amigo Fresnel de se juntar a mim para solucioná-la; minha oferta foi aceita prontamente, e fiz construir sem demora o aparelho necessário” (ARAGO, 1858h, p. 316). Esta parceria, posteriormente enriquecida pela

correspondência com Young, se estenderia para outros projetos e acabaria tendo, como já visto, um papel fundamental no estabelecimento da teoria ondulatória da luz como paradigma, por volta do final dos anos 1820s e início da década de 1830¹²¹.

O duplo tubo de Arago, no entanto, embutia diversas dificuldades de operação, o que levou cientistas como o francês Pierre Louis Dulong (1785-1838) a preferir o prisma de gás, muito mais cômodo de operar, mesmo reconhecendo a superioridade marcada do sistema interferencial para estas medições específicas.

As placas de compensação introduzidas por Arago, mais do que um acessório desejável, estavam no coração da operação do aparelho, pois, como vimos, com as fontes de luz pouco coerentes de que se dispunha na época, apenas umas poucas ordens de interferência eram visíveis no padrão projetado, e para medições verdadeiramente acuradas dos índices de refração era necessário proceder a variações grandes na refração da luz de um tubo em comparação com o outro, e portanto era preciso “trazer” o padrão de interferência de volta à sua posição original para poder realizar qualquer medição (MACH, 1926, pp. 165-166). Como explicava Fresnel já em 1822, isto era feito inclinando-se mais a placa compensadora, de maneira a fazer com que a

121 Que sábios franceses e ingleses pudessem se corresponder e cooperar tão afavelmente a despeito da proximidade de anos de beligerância entre seus países durante o período napoleônico diz muito sobre como a etiqueta científica da época colocava a ciência e o conhecimento acima de mundanidades. A despeito da ciência francesa já estar estruturada de uma maneira mais “profissional” que a inglesa na mesma época, a imagem do sábio cortês e do *gentleman* ainda prevalecia sobre impulsos nacionalistas e visões políticas. Nos anos 1820s, tanto Young viria a ser homenageado como membro estrangeiro da *Académie des Sciences* quanto Fresnel viria a ser reconhecido pela academia inglesa com a medalha Rumford de 1824, outorgada a trabalhos de destaque no campo das propriedades ópticas e térmicas da matéria, “por seu desenvolvimento da teoria ondulatória aplicada ao fenômeno da luz polarizada, e por suas diversas descobertas importantes em óptica física” (ROYAL SOCIETY, 2010). Como vimos, o próprio Arago foi entregar o prêmio ao amigo já prestes a falecer precocemente.

luz tivesse ali um retardo maior do que na outra placa, compensando assim o atraso sofrido pelo outro feixe por conta da variação do índice de refração no tubo. Uma vez trazido à condição inicial o padrão de franjas, a medição da inclinação da placa compensadora e o conhecimento da espessura e do índice de refração do vidro da placa permitia calcular a variação do índice de refração no interior do tubo (ARAGO, 1858m, p. 587).

A ideia de compensação é tão fundamental para a técnica interferométrica que ainda em 1967 a vemos ser colocada nos seguintes termos:

A técnica da interferometria trata de projetar experimentos, e os equipamentos para realizá-los, nos quais efeitos indesejados sejam eliminados tanto quanto possível ou sejam de magnitude conhecida. (...) O desenho de um interferômetro para ser insensível a efeitos indesejados se chama *compensação do interferômetro*” (STEEL, 1967, p. 63) [iv10].

Nos primórdios da interferometria, no entanto, com as fontes pouco coerentes com que os pioneiros da técnica ainda a tateavam, estes “efeitos indesejados” eram a diferença entre conseguir observar e não observar efeitos de interferência num sistema.

4.3 O Interferômetro de Jamin

O francês Jules Jamin foi não apenas um físico notável, que deixou contribuições em campos tão diversos quanto higrometria, iluminação elétrica, magnetismo, calorimetria, estudo dos gases e óptica, mas também um homem reconhecido por seus talentos literários e artísticos, e que portanto transpunha com facilidade o fosso que já então progredia entre as

ciências ditas exatas e as humanidades, e contra o qual cem anos mais tarde o físico e romancista britânico C. P. Snow (1905-1980) escreveria seu famoso “As Duas Culturas” (SNOW, 1997). No que diz respeito a seu trabalho especificamente em óptica, primeiro interesse científico de Jamin, embora tenha cabido a ele a descoberta da polarização elíptica da luz refletida por substâncias vítreas sob iluminação rasante, bem como da polarização elíptica negativa do flúor, foram mesmo sua invenção de um novo dispositivo interferométrico e os estudos que pôde com ele desenvolver sobre os índices de refração de gases e líquidos em diferentes temperaturas e pressões que lhe renderam reconhecimento histórico (POPULAR SCIENCE MONTHLY, 1887).

Em sua comunicação do novo aparelho à *Académie des Sciences*, em 1856, Jamin explicitava que

o instrumento que irei descrever é uma aplicação do fenômeno dos anéis desenvolvidos em lâminas espessas¹²². (...) [E]ste aparelho não exige nem fendas estreitas bem orientadas, nem espelhos inclinados bem regulados, nem lupa para visualizar as franjas, nem qualquer das precauções minuciosas ordinariamente exigidas pelas experiências de interferência. (...) [P]oderá portanto substituir o refratômetro diferencial de Arago¹²³ com grandes vantagens de comodidade, de fixação e de sensibilidade (JAMIN, 1856, pp. 482-483)[iv11].

O interferômetro de Jamin é extremamente importante na história da interferometria, por ser o primeiro interferômetro a utilizar um mecanismo de divisão de amplitude¹²⁴, ao invés

122 Ainda que não diga isso diretamente, Jamin se refere aos anéis coloridos descobertos por Brewster e mencionados no capítulo 3.

123 O duplo tubo de Arago, mostrado na seção 4.2.

124 Na prática isto não é de todo verdade, uma vez que ao estudar a interferência da luz polarizada Arago e Fresnel chegaram a dividir a amplitude de um feixe por polarização, sem, no entanto, atentar para as possibilidades abertas pelo método, que somente seria desenvolvido posteriormente. W. H. Steel enumera diferentes soluções para o problema de dividir a amplitude de um feixe para propósitos interferométricos usando tanto a reflexão parcial quanto a polarização da luz (STEEL, 1967, pp. 95-98).

da até então costumeira divisão da frente de onda, e, como se pode ver, Jamin percebeu prontamente as vantagens aí implicadas, em particular o ganho operacional diante da menor dificuldade de alinhamento do sistema e da maior facilidade de separação dos feixes, mas, principalmente, o ganho em visibilidade das franjas, tanto em tamanho, permitindo o uso de uma lupa de pequena magnificação, ou podendo eventualmente mesmo dispensar o uso da luneta de observação, quanto em intensidade, pela disponibilidade de toda a extensão da frente de onda que incide sobre as placas. A imensa maioria dos interferômetros desenvolvidos a partir daí se utilizaria das vantagens obtidas com a ideia da divisão de amplitude, e há mesmo na literatura uma divisão didática entre os interferômetros “de divisão de amplitude”, como o interferômetro de Jamin, e os “de divisão de frente de onda”, como quase todas as montagens apresentadas anteriormente: a fenda dupla de Young, o espelho duplo e o biprisma de Fresnel, o espelho de Lloyd, o duplo tubo de Arago, etc. (STEEL, 1967; HECHT, 1990; HARIHARAN, 1985; JENKINS e WHITE, 1976)¹²⁵.

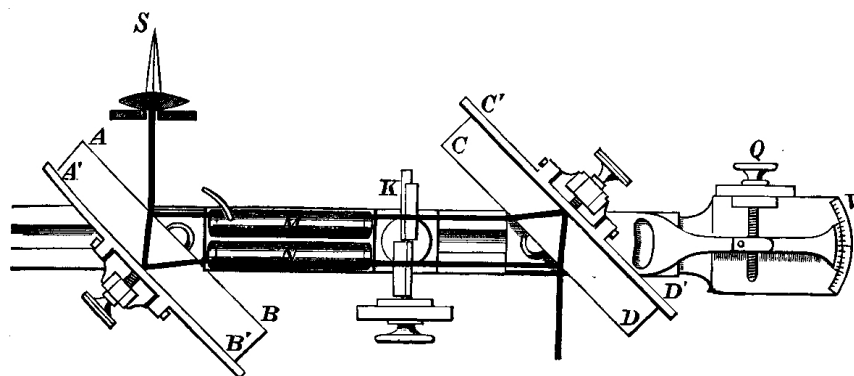


Fig. 4.6 – Interferômetro de Jamin (PRESTON, 1928, p. 227).

Jamin relatava também a grande sensibilidade da montagem: “[r]educido a esta simplicidade, o aparelho acusa toda variação de temperatura, toda mudança de densidade e

¹²⁵ Há, é claro, outras divisões possíveis ou alternativas, por exemplo aquela que distingue interferômetros “de dois feixes” daqueles de “feixes múltiplos”, como o interferômetro de Fabry-Perot (*cf.* capítulo 9).

toda ação química produzidas pelo contato” (JAMIN, 1856, p. 484), que Ernst Mach atribuiu à grande separação dos raios produzida pela razoavelmente grande espessura das placas¹²⁶, fazendo com que “a mera aproximação da mão na direção de *um* dos feixes interferentes, ao aquecer o ar que o feixe atravessa, desloque as franjas instantaneamente e dê a elas um movimento trêmulo” (MACH, 1926, p. 169).

Eis o princípio de funcionamento do interferômetro de Jamin, nas palavras de seu autor (*cf.* figura 4.7 a seguir):

Eu tomo uma placa de vidro de faces paralelas que deve ser talhada de um material muito puro e perfeitamente arrumada; eu a corto em duas partes, e fixo verticalmente a primeira sobre um suporte sólido e recebo sobre ela a luz vinda de uma lâmpada ou do céu. Cada um dos raios incidentes se resolve, por reflexões e refrações sucessivas, em uma infinidade de outros¹²⁷, e faz surgir, em particular, raios refletidos, um na superfície anterior do vidro, outro na superfície posterior: um terceiro que sofreu três reflexões interiores, um quarto que sofreu cinco, etc. Mas como as intensidades diminuem rapidamente quando as reflexões se multiplicam, pode-se examinar apenas o efeito dos dois primeiros, que dissimula o de todos os outros¹²⁸. A separação entre estes dois raios atinge um máximo para uma incidência conveniente, e é proporcional à espessura do vidro, podendo conseqüentemente ser tão grande ou tão pequena quanto se desejar. Estes dois raios se propagam paralelamente pelo ar até uma distância que pode ser aumentada ou diminuída à vontade; eles são finalmente recebidos pelo segundo fragmento de vidro, que se orienta paralelamente ao primeiro; cada um dos raios é refletido na primeira e na segunda superfícies, e o feixe primitivo se encontra então dividido em quatro raios paralelos. Nesta ação dois entre eles são evidentemente superpostos, quais sejam: 1º o raio refletido nas seguintes superfícies: anterior da primeira placa e posterior da

126 Tipicamente as placas se originavam de um único bloco de vidro de cerca de 2 a 5 cm de espessura, cortado precisamente ao meio. Posteriormente eram espelhadas em um dos lados (WILLIAMS, 1950, p. 42).

127 Aqui é difícil não se perguntar o quão próximo Jamin teria passado de antecipar Lummer, Gehrcke, Fabry e Perot no desenvolvimento de um interferômetro de feixes múltiplos (*cf.* capítulo 9).

128 Não apenas isto, mas a relação entre a área da face das placas e sua espessura podia ser feita tal que reflexões internas de ordens superiores fossem geometricamente eliminadas, de modo que o interferômetro constituísse de fato um interferômetro de dois feixes apenas, e sem a necessidade de aberturas adicionais (WILLIAMS, 1950, p. 44).

segunda; 2º o raio refletido nas seguintes superfícies: posterior da primeira placa e anterior da segunda, e não somente eles se superpõem em direção, mas eles são equivalentes em intensidade, e eles percorrem as mesmas espessuras de ar e de vidro: eles são concordantes.

Quando as duas placas, em vez de estarem perfeitamente paralelas, se inclinam entre si de uma quantidade crescente, os dois raios interferentes deixam de se superpor exatamente; eles ganham diferenças de percurso crescentes, e se se recebe no olho o conjunto dos raios refletidos é possível distinguir franjas alternadamente brilhantes e escuras (JAMIN, 1856, pp. 482-483)[iv12].

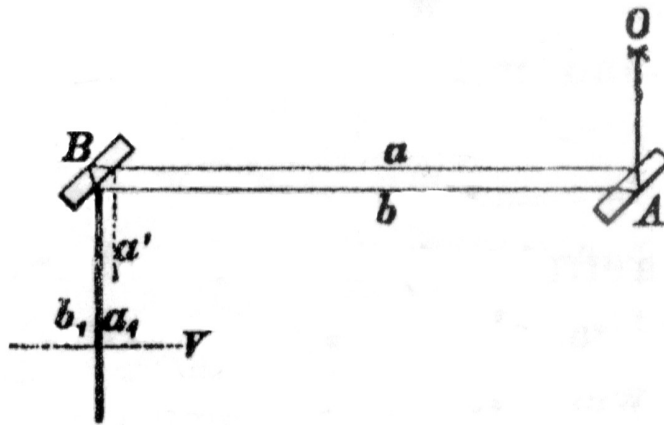


Fig. 4.7 – Interferômetro de Jamin (ZEHNDER, 1891, p. 275). A luz oriunda de O dá origem, na placa A, de fundo espelhado, aos raios a e b , que, recombinados (a_1 e b_1) após a reflexão na placa (gêmea) B, projetam no anteparo V um padrão de interferência.

O truque usado com sucesso por Jamin foi perceber que não importava que a reflexão nas superfícies das placas não dividisse a intensidade exatamente ao meio. Como os raios sofriam processos simétricos, de qualquer maneira as intensidades finais de um e de outro eram equilibradas automaticamente, desde que as placas fossem efetivamente idênticas, ou o mais próximo possível disso.

Jamin apresentou ainda os resultados de cinco experimentos preliminares realizados por ele com o interferômetro, a maior parte relacionada com processos envolvendo a passagem de corrente elétrica por uma amostra de água ou de soluções salinas, e seus efeitos sobre a temperatura ou sobre a densidade da substância.

A partir daí Jamin, seguindo o caminho aberto por Arago, concebeu diversas montagens interferométricas para o estudo da refração e dos efeitos das variações de pressão ou temperatura sobre o índice de refração em meios fluidos. Em primeiro lugar, Jamin debruçou-se sobre a difícil questão da determinação experimental do índice de refração de diversos gases. Para tanto, resgatou o sistema de compensação inventado por Duboscq e Soleil no duplo-tubo de Arago, composto de duas placas de vidro giratórias posicionadas inicialmente paralelas no caminho de cada um dos feixes interferentes, e que podiam ser inclinadas uma em relação à outra até que o sistema de franjas retornasse à sua posição inicial, anterior ao deslocamento empreendido pelo experimento. Jamin percebeu que o uso das lâminas compensadoras era comprometido no duplo-tubo de Arago pela necessidade de proximidade dos dois tubos¹²⁹. Uma vez afastados os feixes, estas dificuldades desapareceriam, e o sistema de compensação ganharia espaço para ser usado efetivamente como um sistema de *medição*, no qual os ângulos de inclinação relativa das lâminas poderia ser utilizado para determinar a diferença de caminho óptico, e, portanto, variações no índice de refração nos gases atravessados pelos feixes¹³⁰:

(...) era preciso alargá-las [as franjas] à vontade; era preciso que o compensador de que se fez uso, em vez de ser uma maneira empírica de destruir o

129 Dois outros problemas graves que decorriam da pequena separação inevitável entre os tubos, e que tornaram o duplo tubo de Arago inútil para estudos sobre os efeitos da temperatura na refração de gases, eram que (1) a parede de separação entre os tubos tinha que ser tão fina que era muito difícil vedá-la para conter o fluido; e (2) qualquer variação de temperatura num dos tubos afetava inevitavelmente o outro tubo (JAMIN, 1857, p. 283).

130 Jamin reconhece que Billet também já havia alcançado pouco tempo antes uma maneira de afastar os feixes interferentes um do outro, no entanto, no sistema de Billet as franjas eram serrilhadas e muito delicadas, de forma que embora fosse possível observar seu deslocamento não era tão simples assim mensurá-lo (JAMIN, 1857, p. 283).

deslocamento das franjas, se tornasse um aparelho de medição cuja ação podia ser calculada por uma fórmula e verificada pela experiência; era preciso, enfim, por alguns exemplos, mostrar o partido que se pode tirar das interferências como meio de investigação. Estas foram as questões com as quais me ocupei. Vou descrever as modificações que fiz no sistema, expressar teoricamente o efeito do compensador e verificá-lo pela experiência, [e] depois como aplicação medir o índice de alguns gases (JAMIN, 1857, p. 283)[iv13].

Nesta investigação Jamin não fez uso de seu novo aparelho, mas de um espelho duplo de Fresnel associado a um espelho côncavo¹³¹. Os feixes oriundos dos tubos eram trazidos ao foco do espelho côncavo após atravessarem cada qual um de dois tubos contendo gás, e a partir daí incidiam sobre um espelho duplo de Fresnel, que os trazia à condição de interferência (cf. figura 4.8). A separação entre os tubos podia ser feita relativamente grande arbitrando-se as características, posição e orientação dos espelhos, assim como o controle do ângulo entre os espelhos de Fresnel permitia controlar a largura das franjas¹³² (JAMIN, 1857, p. 286).

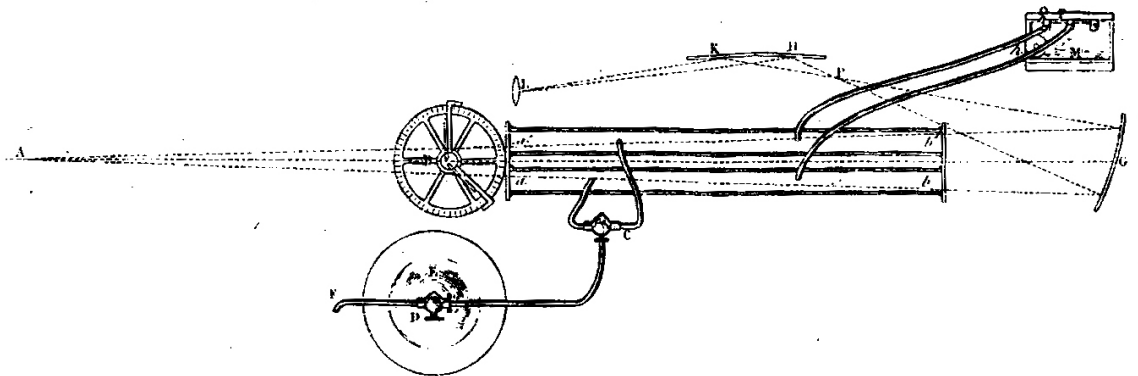


Fig. 4.8 – Montagem de Jamin para determinação do índice de refração de gases. A luz oriunda de uma fenda colimadora em A (à esq. na figura) era separada em dois feixes, que atravessavam os tubos de 1 m de comprimento contendo os gases antes de serem direcionadas pelo espelho côncavo G para um espelho duplo de Fresnel. As franjas de interferência eram observada através da lupa L

131 O espelho usado por Jamin tinha distância focal de um metro e 15 cm de diâmetro.

132 Jamin chegou a conseguir separar os feixes “sem inconvenientes” em até 12 cm, e obteve franjas com até 2 mm de largura quando a separação entre os feixes era de 10 cm, observando no entanto que este era um caso limite, e que era “melhor não atingi-lo”, pois nestas condições “o menor movimento que se faz no laboratório ou nas salas vizinhas, [e] as trepidações ocasionadas pela passagem de veículos, mesmo a grandes distâncias, constringem o experimentador a se ater” (JAMIN, 1857, p. 288).

munida de uma mira de fio, e as placas de compensação estavam montadas à entrada dos tubos, sobre um goniômetro que permitia medir com exatidão sua inclinação (JAMIN, 1857, prancha III).

A principal característica do sistema montado por Jamin era o uso das duas placas compensadoras nas entradas dos tubos, cujas inclinações podiam ser medidas com exatidão através de um círculo graduado (goniômetro) subjacente a elas. Com isso era possível determinar a diferença de caminho óptico de um feixe em relação ao outro em função da espessura da placa e da inclinação necessária para trazer as franjas de volta à posição inicial¹³³.

A luz solar utilizada por Jamin¹³⁴ podia ser filtrada através de um vidro vermelho, por exemplo, tornando as franjas “homogêneas, e as observações se fazendo com toda a precisão desejável” (JAMIN, 1857, p. 292).

Para a medição do índice de refração absoluto de um gás qualquer, procedia-se da seguinte maneira: os tubos eram inicialmente evacuados e a seguir preenchidos, ambos, com o gás a ser estudado, à pressão atmosférica. A mira de fio da lupa era então colocada sobre o máximo central da figura de interferência, e a pressão do gás em *um* dos tubos era então diminuída ligeiramente. As franjas se deslocavam, e a seguir eram trazidas de volta por uma inclinação adequada das lâminas compensadoras. Medindo-se a temperatura ambiente, as pressões do gás nos dois tubos e a inclinação da lâmina compensadora era possível computar o índice de refração do gás e reduzi-lo ao seu valor à pressão atmosférica e à temperatura de 0°C

133 Evidentemente isso implicava conhecer o valor do índice de refração do vidro das placas (1,5280) e sua espessura (1,952 cm). O processo na verdade era um pouco mais complexo devido a dificuldades operacionais, no entanto o procedimento era equivalente. Para se ter uma ideia, uma inclinação de 38,15 graus numa das placas ocasionava um deslocamento de 258 franjas (*cf.* JAMIN, 1857, pp. 291 e 293).

134 Na impossibilidade do uso de luz solar, a fonte luminosa podia ser também uma lâmpada Carcel (lâmparina à queima de óleo de colza bombeado por um mecanismo de relógio inventada pelo relojoeiro francês Bertrand Guillaume Carcel (1750-1812) em 1800).

(JAMIN, 1857, p. 295-298)¹³⁵.

A exatidão dos resultados obtidos foi, segundo Jamin, no melhor dos casos comparável à obtida com os métodos prismáticos tradicionais. Para o índice de refração do ar, por exemplo, Jamin obteve como média de uma série de 30 medidas realizadas com diferentes variações de pressão o valor de 1,000294, o que batia exatamente com os valores encontrados previamente por Biot e Arago. Utilizando o mesmo método, Jamin encontrou resultados compatíveis também para outros gases (ver tabela 4.1 a seguir).

	índice de refração à pressão atmosférica e T = 0°C		
	Jamin	Biot e Arago	Dulong
Ar atmosférico	1,000294	1,000294	„
Oxigênio	1,000275	1,000280	1,000272
Hidrogênio	1,000143	1,000142	1,000138
Ácido carbônico ¹³⁶	1,000450	1,000449	1,000449
Protóxido de azoto ¹³⁷	1,000507	„	1,000503

Tabela 4.1 – Comparação entre os índices de refração de gases encontrados por Jamin e os obtidos previamente por Biot e Arago e por Dulong (JAMIN, 1857, p. 301).

Esta conclusão contrasta com o otimismo manifestado anteriormente por Arago quanto às possibilidades de alcançar exatidões inéditas com um sistema interferencial (ARAGO, 1858h, p. 319). No sistema utilizado por Jamin com o espelho duplo de Fresnel uma diferença de pressão nos tubos correspondendo a 1 mmHg deveria produzir um deslocamento das franjas equivalente a 0,604 da largura de uma franja. Mas “em razão das

135 Outro procedimento válido consistia em comparar o gás num dos tubos com a refração pelo ar no outro tubo, e diminuir a pressão do mais refringente até trazer as franjas a seu estado inicial.

136 Dióxido de carbono (CO₂).

137 Óxido nitroso, o gás hilariante (N₂O).

dificuldades de toda natureza que se encontra nessas pesquisas, por causa sobretudo das trepidações das franjas” (JAMIN, 1857, p. 302), a resolução do aparelho ficava limitada a deslocamentos de meia franja¹³⁸. Portanto para estas aplicações o método prismático de Dulong, que admitidamente permitia detectar variações de 0,1 mmHg, parecia oferecer melhor resolução.

Jamin retomou seu interferômetro original para realizar estudos sobre as variações dos índices de refração do vapor d'água e também de líquidos a diferentes pressões. Os dois relatos foram publicados consecutivamente no mesmo número do volume 52 dos *Annales de Chimie et Physique* de 1858 (JAMIN, 1858a e 1858b). No primeiro deles um interferômetro de Jamin é montado de maneira a que no espaço entre as duas placas espessas os feixes pudessem atravessar cada qual um tubo de 1 m de comprimento nos quais um líquido podia ser encerrado e (num dos tubos) ter sua pressão modificada de maneira controlada (ver figura 4.9 a seguir).

138 Não obstante, o próprio Jamin considerava que o sistema, em tudo análogo, utilizado por ele num estudo posterior permitia a observação de deslocamentos de um centésimo da largura de uma franja, o que corresponderia a uma rotação de um minuto de grau na placa compensadora (JAMIN, 1858b, p. 178). A avaliação de que o limite de resolução para uma observação interferométrica com franjas estáveis é da ordem do centésimo da largura da franja coincidia com a opinião de Michelson décadas depois.

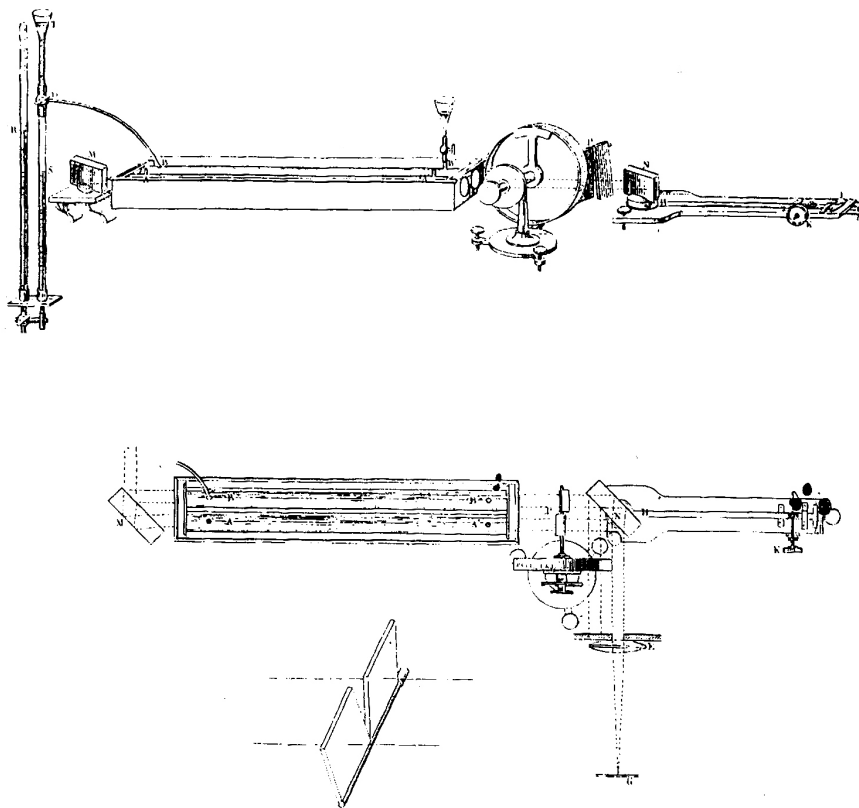


Fig. 4.9 – Montagem de Jamin para o estudo da variação do índice de refração da água a diferentes pressões. A pressão da água em um dos tubos podia ser modificada adicionando-se ou retirando-se mercúrio do tubo manométrico a ele conectado. Em detalhe (em baixo) o sistema das placas compensadoras (JAMIN, 1858a, prancha I, à direita).

As placas compensadoras podiam ser inclinadas uma em relação a outra, deslocando as franjas de uma maneira conhecida previamente¹³⁹. O aparelho apresentava sensibilidade suficiente para detectar sem dificuldades variações menores que 1 mmHg na pressão do líquido, porém não sem efeitos colaterais:

Por causa desta sensibilidade, justamente, as mais fracas ações perturbadoras vêm complicar as experiências. Por exemplo, a compressão aumenta a temperatura do líquido, e, enquanto ele se resfria a seguir, formam-se correntes em sua massa que deformam as franjas ao ponto de tornar as observações impossíveis; porém evita-se estes efeitos envolvendo-se os tubos de uma gamela cheia de água que se agita constantemente e aguardando-se dez minutos antes de fazer a observação: este

¹³⁹ De fato, Jamin dedica um bom trecho do artigo para explicar os procedimentos para a calibração das placas compensadoras e a relação entre suas inclinações relativas e o deslocamento das franjas (JAMIN, 1858a, pp. 166-167).

tempo é suficiente para trazer as franjas à sua forma e estabilidade originais (JAMIN, 1858a, p. 165)[iv14].

Jamin também considerou a dilatação do tubo causada pelo aumento da pressão interna, concluindo que ela podia ser desprezada em função da correspondente diminuição do espaço ocupado pela água na gamela em frente ao mesmo tubo.

Foram feitas sete séries de medições, cada uma correspondendo a oito ou nove valores diferentes de acréscimo de pressão. As três primeiras séries corresponderam à água destilada comum, enquanto as quatro últimas foram realizadas com água destilada “privada de ar” (desgaseificada). Os procedimentos experimentais para a medição partiam de uma pressão inicial considerada nula e para a qual as franjas eram reguladas. Posteriormente a pressão era aumentada, o que fazia com que as franjas se deslocassem. Girando-se a placa compensadora as franjas eram trazidas de volta à sua posição original, e pela curva de calibração das placas obtinha-se o número ou fração de franjas deslocadas que correspondia a esta rotação.

Jamin de fato não apresentou como resultados valores para os índices de refração da água a diferentes pressões, preferindo obter o *coeficiente de compressibilidade* (μ)¹⁴⁰ da água a partir da “lei das potências refrativas”¹⁴¹ e do deslocamento das franjas por unidade de pressão, e depois comparando-o com um valor conhecido previamente. O excelente acordo entre estes valores¹⁴² permitiu a Jamin concluir primeiramente que, “de forma inesperada” (JAMIN, 1858a, p. 171), a lei das potências refrativas poderia ser aplicada à água sob compressão, e, em

140 Definido a partir da variação da densidade para um aumento de pressão P como: $d' = d(1 + \mu P)$.

141 Esta lei relacionava o índice de refração de uma substância à sua densidade na forma: $\frac{n^2 - 1}{d} = cte.$.

142 Não obstante, o físico francês Éleuthère Mascart (1837-1908) mostraria alguns anos mais tarde que os dados experimentais obtidos por Jamin verificavam de forma ainda melhor a relação $\frac{n - 1}{d} = cte.$

segundo lugar, que o método óptico poderia ser empregado, facilitando o processo de determinação da compressibilidade na medida em que dispensava a necessidade de levar em consideração o volume dos vasos que continham os líquidos.

O segundo trabalho de Jamin dizia respeito à medição do índice de refração do vapor d'água, retomando a questão do quanto a presença de vapor d'água afetava a refração atmosférica. O estudo se justificava, pois (1) nas análises de Laplace sobre a refração atmosférica a influência do vapor d'água havia sido considerada a partir da suposição de que o poder refringente de uma substância era independente de seu estado físico, *i. e.*, de que o poder refringente do vapor d'água podia ser igualado ao da água líquida; (2) os trabalhos de Arago e Petit de 1815 sobre a possibilidade de verificar experimentalmente esta suposição não haviam sido publicados ou mesmo concluídos em todos os seus objetivos¹⁴³; e, finalmente, (3) as medições de índices de refrações de gases realizadas por Dulong neste ínterim com o método do prisma não haviam abarcado o vapor d'água. Assim, para todos os efeitos, a questão de como exatamente a presença de vapor d'água afetava a refração da luz das estrelas ao atravessar a atmosfera ainda não estava de todo resolvida, ou seja, não se sabia em última instância se o vapor d'água obedecia a lei de potências refrativas. Assim,

por um lado admite-se que o índice de refração do vapor d'água pode ser deduzido com exatidão de uma lei que se reconheceu pouco precisa, [porém] por outro lado não se pôde encontrar seu valor experimentalmente: não se sabe portanto nada de preciso sobre este assunto (JAMIN, 1858b, p. 172)[iv15].

O procedimento experimental de Jamin foi um pouco mais sofisticado que o reportado por Arago, e a montagem óptica envolveu o mesmo sistema interferencial (o interferômetro de

143 Vale lembrar que o próprio Arago só se reportou à comunicação que ele e Petit prestaram à *Académie des Sciences* ao escrever em 1858 – mesmo ano dos estudos de Jamin, a quem possivelmente sugeriu realizar os experimentos.

Jamin) utilizado no estudo da variação da refração da água líquida sob compressão. Inicialmente fazia-se circular ar nos tubos, independentemente, de modo a que num tubo o ar fosse ressecado enquanto no outro ele era saturado com vapor d'água. Interrompia-se a corrente de ar e trazia-se as franjas para o centro da mira. Depois invertia-se o sentido da corrente de ar, fazendo com que o ar no tubo anteriormente seco passasse a úmido, e vice-versa, e marcava-se a rotação necessária na placa compensadora para trazer as franjas para a posição original. Repetia-se o procedimento diversas vezes¹⁴⁴.

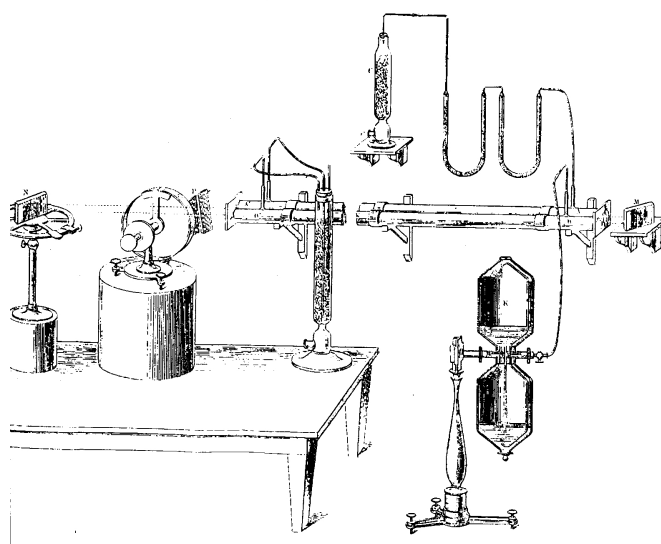


Fig. 4.10 – Montagem de Jamin para o estudo da refração da luz pelo vapor d'água. Note-se o mesmo sistema interferométrico da figura 4.7, com as placas espessas e as placas compensadoras. Um sistema específico munido de um aspirador K permitia fazer circular o ar através de um sistema de ressecamento, e daí através de um dos tubos, a seguir por uma proveta grande preenchida por pedra pome calcinada e encharcada de água destilada, e finalmente pelo segundo tubo. O sistema podia ser invertido, duplicando o deslocamento das franjas, e a umidade do ar controlada quimicamente com diferentes soluções de ácido sulfúrico a temperaturas específicas (JAMIN, 1858a, pp. 178-179)

144 Jamin observava que devido provavelmente ao aquecimento desigual dos tubos, causado por uma desatenção ao local de fixação do suporte dos tubos à parede, que aquecia com o sol, as franjas se deslocavam continuamente, fazendo com que a cada repetição os valores crescessem. Este efeito sistemático foi eliminado comparando-se o valor da posição da placa compensadora numa determinada situação não apenas com o valor imediatamente anterior mas também com o valor imediatamente posterior, amenizando portanto o erro. Incidentalmente, Jamin credita a ideia ao engenheiro e pesquisador francês Charles Coulomb (1736-1806), que teria sentido a necessidade do expediente em seus estudos elétricos (JAMIN, 1858b, pp. 179-180).

e prancha I, à esquerda).

A experiência mostrou claramente que o ar saturado de vapor d'água refratava menos que o ar seco, concordando com a avaliação de Arago e Petit de 1815, porém Jamin foi capaz de efetivamente medir o índice de refração do ar saturado de umidade, chegando ao valor de $n_u = 1,000261$. Novamente Jamin concluiu que as diferenças entre o índice de refração do ar seco e do ar saturado eram indetectáveis no que dizia respeito à refração atmosférica.

Porém o mais importante foi que a partir dos valores medidos Jamin pôde calcular o poder refringente do vapor d'água (0,000521) e mostrou que ele *não era o mesmo* que o da água líquida (0,000625)¹⁴⁵; concluindo que “não se pode admitir portanto que o poder refringente se mantenha constante quando a água passa do estado líquido ao estado gasoso” (JAMIN, 1858b, p. 186). O fato da potência refrativa real ser então menor do que a calculada ajudou a pôr em xeque a utilidade do conceito, remanescente de uma visão laplaciana, e que aos poucos veio a cair em desuso.

A relação entre o índice de refração de uma substância e sua natureza seria novamente esmiuçada a partir do advento do eletromagnetismo e da descrição da luz como uma onda eletromagnética, a partir de 1865, mas a determinação dos índices de refração de diferentes substâncias com alto grau de exatidão para diferentes comprimentos de onda, possibilitada pelos avanços na técnica interferométrica de Jamin em diante, foi essencial ainda em um outro aspecto. Ela tornaria possível uma análise quantitativa do fenômeno conhecido como *dispersão anômala* da luz, descoberto independentemente pelo físico dinamarquês Christian Christiansen (1843-1917) em 1870 e pelo físico alemão August Kundt (1839-1894), que

¹⁴⁵ Tampouco igual ao poder refringente calculado a partir de um valor ponderado dos poderes refringentes dos gases formados pelos constituintes da água, oxigênio e hidrogênio (0,000549) (JAMIN, 1858b, pp. 186-187).

estudou o efeito no período 1871-1872¹⁴⁶. Este fenômeno, qualificado pelo cientista irlandês Thomas Preston (1860-1900) como “dentre as mais singulares descobertas dos tempos modernos”, consistia em que em determinadas substâncias e circunstâncias o espectro luminoso parecia se inverter: isto é, comprimentos de onda maiores passavam a ser mais refratados, e comprimentos menores menos refratados. Para explicar estes padrões anômalos de dispersão óptica, fez-se necessário hipotetizar o comportamento molecular em sua interação com a luz. Para isso Wolfgang Sellmeier desenvolveu a ideia de *Mitschwingungen*, termo talvez melhor traduzido como “co-vibrações”, segundo a qual a dispersão da luz se dava a partir da interação entre a luz (vibrações do éter) e as partículas da matéria ordinária, que poderiam vibrar em frequências de ressonância específicas do sistema (TALTAVULL, 2011).

O advento do eletromagnetismo e a “descoberta” do elétron em 1897 levaram os físicos teóricos como o holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) e o alemão Paul Drude (1863-1906) a relacionar as *Mitschwingungen* com propriedades químicas e físicas das substâncias, em particular com a valência atômica. Desta maneira, fenômenos ópticos como a dispersão anômala e as linhas espectrais de emissão e absorção (*cf.* capítulo 9 a este respeito) eram tidos como importantes ferramentas para explorar a microestrutura da matéria. As tentativas de conciliar as *Mitschwingungen* com o modelo atômico de Niels Bohr (1885-1962), em particular através das ideias de “órbitas vibrantes” (em vez de elétrons vibrantes) do físico alemão Arnold Sommerfeld (1868-1951) e do físico estadunidense de origem holandesa Petrus (Peter) Debye (1884-1966) e da ideia de “osciladores virtuais” correspondendo aos

146 Segundo o físico escocês Peter Guthrie Tait (1831-1901), o inventor britânico William Henry Fox Talbot (1800-1877) parece ter tropeçado no fenômeno trinta anos antes, porém sem dar continuidade ou divulgar seus estudos a este respeito (PRESTON, 1928, p. 514).

saltos quânticos de Bohr imaginados pelo físico alemão Rudolf Ladenburg (1882-1952), deram origem a concepções que parecem ter atuado como passos intermediários importantes em direção à teoria quântica dos anos 1920s¹⁴⁷ (TALTAVULL, 2011).

Uma outra questão fundamental para a óptica ondulatória e ainda não resolvida nos anos 1860s era a da real direção de vibração do éter no caso da luz polarizada¹⁴⁸. Uma opinião que sustentava que o éter deveria vibrar numa direção transversal à direção de polarização da luz era defendida, por exemplo, pelo influente matemático francês Augustin-Louis Cauchy (1789-1857), através de uma análise teórica da relação entre reflexão e refração no caso de luz polarizada atingindo a superfície de separação entre dois meios refringentes (VERDET, 1863, p. 224). No entanto, não havia um consenso a respeito na comunidade científica. Utilizando um interferômetro de Jamin, o físico alemão Georg Hermann Quincke (1834-1924) realizou um experimento cujo resultado levou-o a concluir justamente o contrário, *i. e.*, que as vibrações do éter se davam *na mesma direção* da polarização da luz. A experiência envolvia espelhar apenas a metade inferior de uma das placas espessas do interferômetro, de maneira a introduzir uma diferença de fase entre as metades superior e inferior do padrão de franjas, devida à suposição de que a diferença de fase pela reflexão seria a mesma para todos os ângulos de incidência e todos os materiais para a componente do raio polarizada

147 De fato, o próprio físico alemão Werner Heisenberg (1901-1976), principal responsável pelo desenvolvimento da mecânica matricial, teria declarado a busca de uma explicação para o fenômeno da dispersão óptica “um dos mais importantes passos em direção à mecânica quântica teórica”, tendo sido o tema principal do artigo de sua autoria (o famoso *Umdeutung*, de 1925) que reinterpreto a mecânica quântica em termos matriciais.

148 Curiosamente, esta questão reaparecerá de uma forma inusitada no início do capítulo 8, quando tratarmos dos primórdios da interferometria estelar. Ela só seria satisfatoriamente endereçada por um modelo teórico a partir do eletromagnetismo.

perpendicularmente ao plano de incidência, enquanto que para a componente do raio polarizada paralelamente ao plano de incidência isto não ocorreria, e portanto seria possível medir uma defasagem entre os dois sistemas de franjas formados pelas duas metades do interferômetro analisando-se a imagem das franjas com um prisma de Nicol. Quincke também fazia refratar por um prisma equilátero de dissulfeto de carbono¹⁴⁹ (CS₂) o feixe que deixava o interferômetro, de maneira a poder se observar, olhando diretamente o espectro, não apenas as bandas de interferência mas também as raias de Fraunhofer.

Os resultados do experimento mostraram que quando a luz era polarizada perpendicularmente ao plano de incidência, as franjas da metade inferior do espectro ficavam perfeitamente alinhadas com as franjas da metade superior, porém quando a luz era polarizada ao longo do plano de incidência, as franjas da parte inferior eram deslocadas em relação às da parte superior em até quatro décimos do intervalo entre duas franjas consecutivas. Ou seja, as vibrações do éter que constituíam a luz, concluiu Quincke, deviam ser consideradas paralelas ao seu plano de polarização (VERDET, 1863).

O interferômetro de Jamin ainda era utilizado em 1893 quando o físico alemão August Raps (1865-1920) utilizou-o para fotografar a compressão do ar em ondas sonoras estacionárias no interior de um diapasão de tubo, inserido no interferômetro de modo que um dos feixes o atravessava longitudinalmente (RAPS, 1893; ver também BARUS, 1921, p. 46)¹⁵⁰.

149 $n = 1,628$ para $\lambda = 589,29$ (padrão do dubleto do sódio), a 20°C e pressão atmosférica (líquido).

150 Pesquisa semelhante já havia sido publicada conjuntamente em 1870 pelo físico austro-húngaro Ludwig Boltzmann (1844-1906) e por seu colega alemão A. Töpler (1836-1912) utilizando um “interferômetro de Fresnel” [espelho duplo?] (BOLTZMANN e TÖPLER, 1870).

4.4 O Interferômetro de Mach-Zehnder

Trinta e cinco anos após a comunicação de Jamin sobre seu novo refrator interferencial, as demandas de versatilidade e operacionalidade de um interferômetro haviam crescido tanto que o que havia sido considerado uma das grandes vantagens do interferômetro de Jamin, qual seja, sua capacidade de separar os feixes de uma distância controlável e razoavelmente grande¹⁵¹, e de portanto conseguir projetar um campo de franjas relativamente largo, passou a ser criticado como um dos pontos fracos da montagem. Isto é, no início da década de 1890 as separações e campos de franjas obtidos com um interferômetro de Jamin já eram considerados pequenos para as necessidades práticas.

O interferômetro de Jamin foi aperfeiçoado em 1891 pelo físico suíço Ludwig Zehnder (1854-1949), que assim manifestou seu apreço pelo trabalho de Jamin e de outros:

A descoberta de Brewster das cores em placas planas espessas foi utilizada de forma inspirada pelo Sr. Jamin na construção de seu refrator interferencial, com o qual já foram realizadas diversas belas pesquisas sobre a modificação do expoente de refração de corpos em vários estados agregados (ZEHNDER, 1891, p. 275)[iv16].

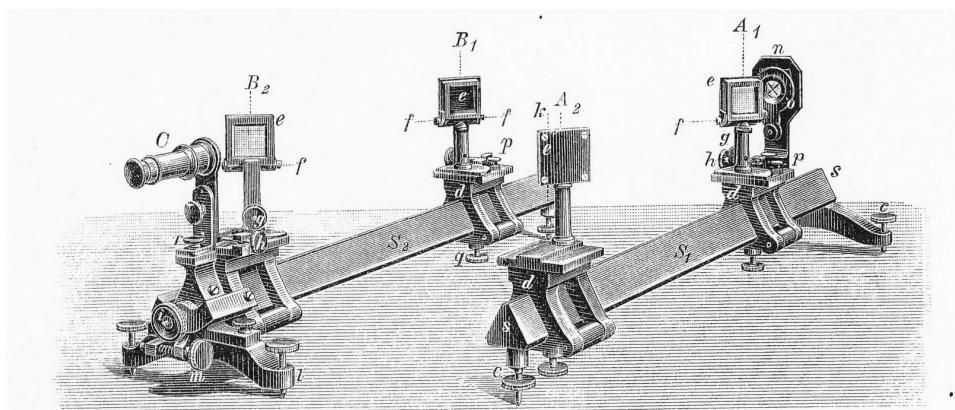


Fig. 4.11 – Refrator interferencial de Zehnder. A_1 e B_2 são placas finas de vidro, de faces paralelas, enquanto A_2 e B_1 correspondem a espelhos planos. Os quatro elementos são paralelos entre si. A luneta C permite a visualização das franjas (ZEHNDER, 1891, p. 278).

151 Determinada, em última instância, pela espessura da placa e o ângulo de incidência do feixe original.

No ano seguinte, na mesma revista em que Zehnder publicou sua ideia, foi publicado um artigo de autoria do físico austro-húngaro Ludwig Mach (1868-1951), filho do famoso cientista e filósofo Ernst Mach (1838-1916), no qual era apresentada uma descrição excelente de um dispositivo muito semelhante, em que Ludwig Mach também já vinha trabalhando:

Em sua montagem habitual, o refrator interferencial de Jamin preenche um campo de interferência relativamente pequeno, o que em várias investigações mostrava-se insuficiente. Um aumento do campo só é possível graças a um correspondente aumento das dimensões das placas, o que está associado a dificuldades técnicas e materiais consideráveis. Estas circunstâncias nos levam à montagem de um novo aparato, que se baseia no seguinte princípio. Imagine a face anterior e a face espelhada posterior de uma placa de Jamin substituídas por uma lâmina de faces paralelas e um espelho de vidro prateado, e estes montados em hastes que podem girar e se deslocar para frente e para trás de forma independente, de tal modo que se tenha uma placa de Jamin de espessura variável e se possa, através da combinação deste dispositivo com um segundo dispositivo precisamente idêntico, produzir bandas de Jamin cuja largura pode ser feita qualquer deslizando-se as placas umas contra as outras (MACH, 1892, p. 89)[iv17].

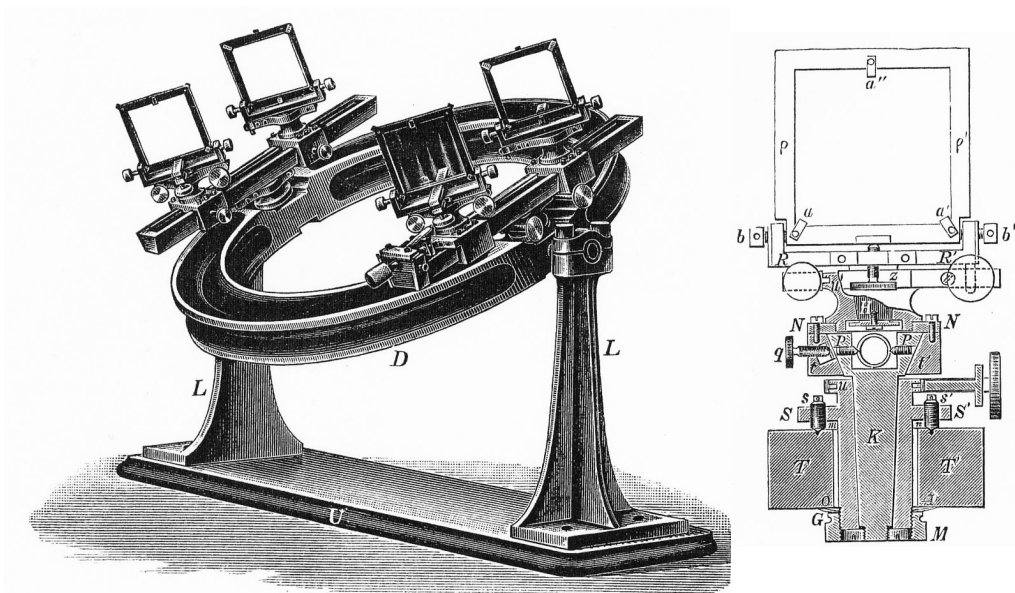


Fig. 4.12 – Refrator interferencial de Ludwig Mach (esq.). O anel basculante D permitia uma flexibilidade na orientação do feixe incidente. À direita, detalhe da mecânica fina do suporte das superfícies refletoras no refrator interferencial de Ludwig Mach, necessária para o alinhamento preciso do interferômetro (MACH, 1892, p. 90).

Em função da quase simultaneidade dos trabalhos, o “novo aparato” passou à posteridade como o interferômetro de Mach-Zehnder¹⁵².

Embora demande um trabalho relativamente maior para o alinhamento de seus elementos, o interferômetro de Mach-Zehnder produz não apenas uma mas duas imagens dos padrões de interferência, e permite uma enorme flexibilidade no arranjo de suas aplicações, motivo pelo qual foi adotado por um grande número de pesquisadores ao longo do século XX e ainda hoje em dia para os mais diversos temas de pesquisa, de diagnóstico de plasmas a medições acuradas da velocidade da luz (STEEL, 1967, pp. 149 e 153-154), dos estudos aerodinâmicos em tubos de vento, onde é necessário um campo de visão extenso (STEEL, 1967, p. 176), às mais recentes pesquisas nos fundamentos da mecânica quântica (por exemplo, LUNDEEN e STEINBERG, 2009)¹⁵³.

O interferômetro de Mach-Zehnder foi utilizado em 1901 pelo astrofísico estadunidense Henry G. Gale (1874-1942), num experimento sugerido por Michelson¹⁵⁴, para estudar o problema ainda não resolvido da determinação da relação entre a densidade de uma substância e seu índice de refração. Além da clássica relação da potência refrativa derivada da

152 Embora “interferômetro de Zehnder-Mach” talvez fizesse mais justiça à precedência de Zehnder em publicar. Ernst Mach, o pai, pode ter tido um papel na cristalização do nome ao insistir, em seu influente livro sobre óptica (MACH, 1926, p. 170), tanto na simultaneidade da invenção quanto na relevância dos aperfeiçoamentos feitos por Ludwig Mach em relação à montagem original de Zehnder. De outra maneira talvez o conhecêssemos hoje apenas como “interferômetro de Zehnder”.

153 De fato, o interferômetro de Mach-Zehnder ficou tão popular que gerou inversões da relação de causa e efeito, como a que W. H. Steel perpetra em seu livro de interferometria, apresentando o interferômetro de Jamin como “equivalente a um interferômetro de Mach-Zehnder” (STEEL, 1967, p. 149).

154 Michelson parece ter desempenhado também um papel de consultor no experimento, sugerindo a disposição dos espelhos no interferômetro. Curiosamente Gale menciona a montagem apenas como “essencialmente uma modificação da forma de Jamin”, não fazendo nenhuma menção a Zehnder ou a Mach.

teoria da emissão, pesquisada por Jamin em 1858, outras relações haviam sido consideradas por diferentes autores ao longo do tempo (*cf.* tabela 4.2 a seguir).

proponente	relação
Gladstone e Dale (1858) ¹⁵⁵	$\frac{n-1}{d} = cte.$
Jamin (1858) ¹⁵⁶	$\frac{n^2-1}{d} = cte.$
Lorentz	$\frac{n^2-1}{(n^2+2)d} = cte.$
Ketteler ¹⁵⁷	$\frac{n^2-1}{(n^2+x)d} = cte.$, com $2 < x < 8,4$

Tabela 4.2 – Relações propostas entre a densidade de uma substância e seu índice de refração (GALE, 1902).

Gale estudou a variação do índice de refração do ar com sua densidade minuciosamente, indo de zero a vinte atmosferas de pressão. Admitindo um erro experimental da ordem do décimo da largura da franja (bastante pequeno, considerando-se que os deslocamentos de franjas se contavam nas centenas ou milhares), Gale concluiu que “se há qualquer desvio da lei de Gladstone e Dale até 20 atm, no caso do ar este desvio não chega a mais de 0,1%”; além disso, “a razão entre a equação de Lorentz e a de Gladstone e Dale é tão aproximadamente igual à constante 2/3 que uma tentativa de comparar as duas seria inútil” (GALE, 1902, pp. 15-16).

¹⁵⁵ *Apud* PRESTON, 1928, p. 155.

¹⁵⁶ Para os gases aproximações permitem mostrar que esta relação é basicamente a mesma que a de Gladstone e Dale.

¹⁵⁷ Os valores de x eram computados a partir de tabelas obtidas por Knops e Weegmann para diferentes substâncias.

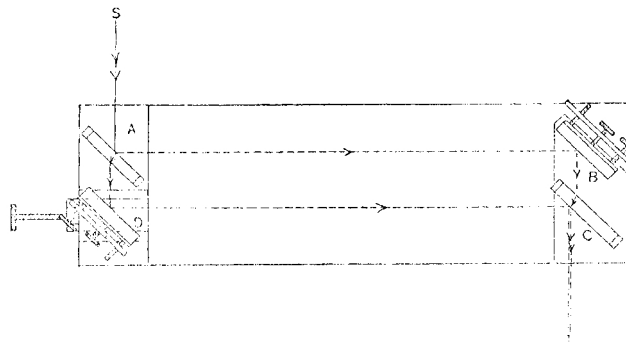


Fig. 4.13 – Interferômetro de Mach-Zehnder utilizado por Gale para a medição do índice de refração do ar entre 0 e 20 atm. Os tubos paralelos contendo o ar eram colocados ao longo dos feixes na horizontal da figura (GALE, 1902, p. 12).

Algumas outras aplicações interessantes do interferômetro de Mach-Zehnder foram realizadas pelo físico estadunidense Carl Barus (1856-1928) entre os anos 1917 e 1921¹⁵⁸. Embora os relatos sejam um pouco confusos, incompletos e muitas vezes inconclusivos, certamente é interessante notar a diversidade de usos proposta para o instrumento.

Num primeiro caso (*cf.* figura 4.14), Barus usou-o para a leitura interferométrica de uma balança de pressão manométrica de mercúrio (BARUS, 1921, pp. 1-4). O mesmo sistema podia ser utilizado para a medição de variações de pressão em montagens acústicas (BARUS, 1921, pp. 14-28) ou, conjugado com um eletrômetro, para a medição de cargas elétricas (BARUS, 1921, pp. 5-13).

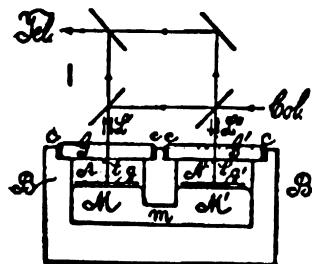


Fig. 4.14 – Adaptação de um interferômetro de Mach-Zehnder para a leitura interferométrica de pequenas variações de pressão. M e M' são espelhos sobre a superfície livre do mercúrio na balança

¹⁵⁸ Barus não pleiteia ter inventado a montagem, porém tampouco dá qualquer crédito a quem quer que seja, chamando sua montagem tão-somente de “interferômetro quadrático”. Reencontraremos os estudos de Barus no capítulo 6.

de pressão (BARUS, 1921, p. 3).

Uma outra aplicação foi o estudo da compressão de ondas sonoras em tubos de diapasão de diferentes configurações (BARUS, 1921, pp. 46-54)¹⁵⁹, como mostrado na figura 4.15 abaixo.

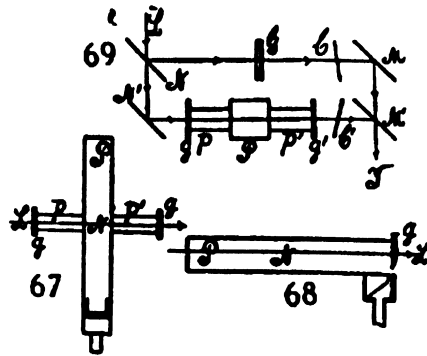


Fig. 4.15 – Diagrama esquemático da montagem de Barus com um diapasão (P-P') inserido num dos braços de um interferômetro de Mach-Zehnder para o estudo da compressão do ar em ondas sonoras (figura 69 no original). Abaixo, dois tipos diferentes de diapasão usados no estudo (67 e 68). Também foram utilizados tubos simples fechados em uma das extremidades, ou abertos em ambos os lados (BARUS, 1921, p. 47).

Num terceiro estudo, Barus acoplou um espelho leve (um dos espelhos do interferômetro) a uma “placa telefônica”, isto é, a um alto-falante, e com isso pôde estudar as vibrações induzidas na superfície do espelho quando se produziam diferentes sons no alto-falante (BARUS, 1921, pp. 55-64) – ver figura 4.16.

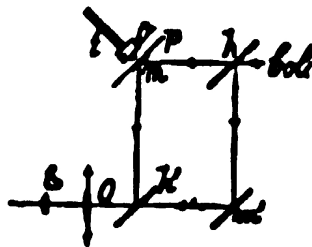


Fig. 4.16 – Montagem de Barus para o estudo das vibrações na “placa telefônica” (alto-falante, *p* na figura) acoplado ao espelho *m* do interferômetro de Mach-Zehnder (BARUS, 1921, p. 55).

¹⁵⁹ O estudo foi admitidamente precedido pelo já citado trabalho de Raps com um interferômetro de Jamin (BARUS, 1921, p. 46).

Uma outra tentativa de Barus foi a de conjugar o espelho giratório comumente utilizado na determinação da velocidade da luz com o interferômetro de Mach-Zehnder, de modo a ampliar a exatidão da determinação do valor da constante. As dificuldades de montagem e operação foram impeditivas, porém a montagem sugerida é ilustrada na figura 4.17 abaixo.

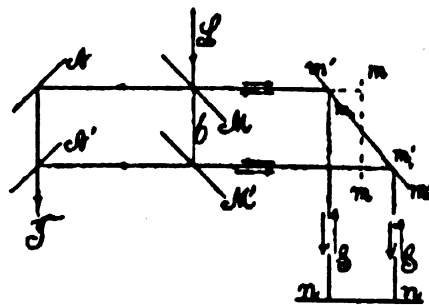


Fig. 4.17 – Conjugação da montagem para determinação da velocidade da luz através do espelho giratório com um interferômetro de Mach-Zehnder. O espelho rotatório mm , quando girado do ângulo adequado, em $m'm'$, reflete a luz para um espelho auxiliar nn , produzindo dois sistemas de franjas distintos (BARUS, 1921, p. 66).

Finalmente, Barus propôs ainda medir pequenas variações na aceleração da gravidade com uma balança de torsão lida interferometricamente através de um interferômetro de Mach-Zehnder (cf. figura 4.18 a seguir). Métodos semelhantes permitiram a Barus também estudar a possibilidade de medir com exatidão a carga elétrica numa balança de torsão.

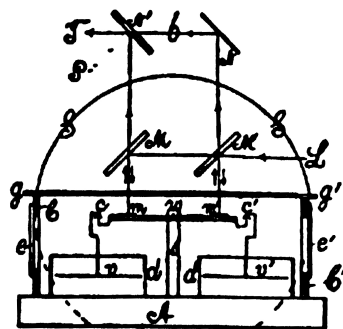


Fig. 4.18 – Conjugação de uma balança de torsão gravimétrica (parte inferior), na qual são instalados dois espelhos m e m' , com um interferômetro de Mach-Zehnder (parte superior) (BARUS, 1921, p. 75).

4.5 O Refratômetro de Rayleigh

Um “novo” interferômetro projetado especificamente para a determinação dos índices de refração de fluidos foi apresentado por lord Rayleigh em janeiro de 1896 (RAYLEIGH, 1896), e aperfeiçoado em 1910 pelo físico-químico alemão Fritz Haber (1868-1934) e seu conterrâneo, o físico Fritz Löwe (1874-1955), que trabalhava em Jena na fábrica da Zeiss (HABER e LÖWE, 1910). Seu primeiro uso, por Rayleigh, foi na determinação dos índices de refração dos gases recém-descobertos argônio e hélio (RAYLEIGH, 1896). Para todos os aspectos práticos, no entanto, o novo instrumento era um retorno aos princípios do duplo tubo de Arago. A luz era colimada por uma lente antes da entrada nos tubos, de modo que a fonte efetiva estava localizada no infinito. Novamente as franjas eram muito próximas, devido ao uso de fendas relativamente distantes como fontes, de maneira a requerer a sua observação através de um sistema de grande magnificação¹⁶⁰, e placas compensadoras eram utilizadas à frente de ambos os tubos, facilitando sua operação.

A grande inovação, devida a Haber e Löwe, era mesmo a projeção de um sistema fiduciário de franjas como referência logo abaixo do sistema principal, que tornava mais exata a avaliação da fração da largura das franjas da qual era deslocado o sistema de franjas em relação ao sistema original, mantido como referência em baixo¹⁶¹ (ver figuras 4.19 e 4.20).

160 Por causa das fendas, a grande magnificação só era necessária no plano horizontal, e portanto uma lente cilíndrica de pequena distância focal (ou simplesmente um cilindro de vidro, de algo como 2 mm de diâmetro) permitia aproveitar melhor a intensidade luminosa e produzir padrões de interferência mais luminosos (WILLIAMS, 1950, p. 11).

161 Teria sido esta a razão da grande popularidade alcançada pelo interferômetro de Rayleigh para a determinação de índices de refração de gases ou de misturas de gases. A contraposição de dois sistemas de franjas introduzida por Haber e Löwe aparentemente permitiu uma estimativa muito mais acurada do

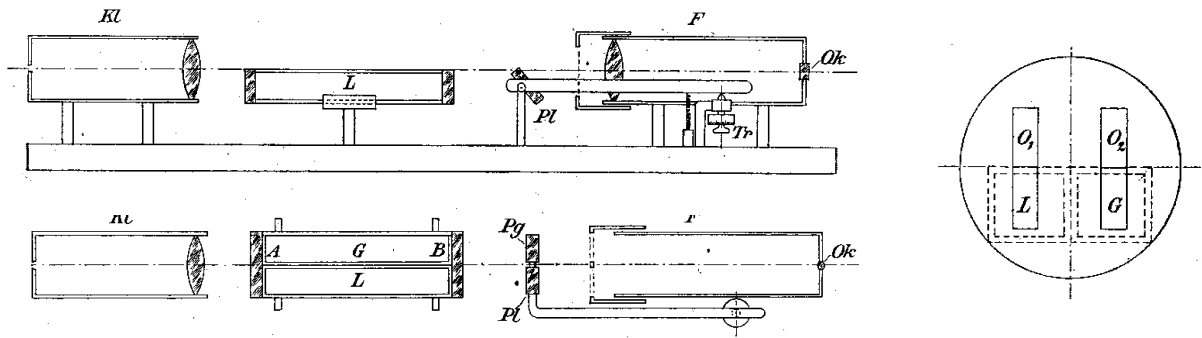


Fig. 4.19 – Interferômetro de Haber e Löwe em visão lateral (acima) e superior (abaixo). À direita, visão frontal evidenciando a região inferior do campo de interferência das fendas ocupado pelos tubos L e G e pelas placas compensadoras (região tracejada) (HABER e LÖWE, 1910, p. 1394).

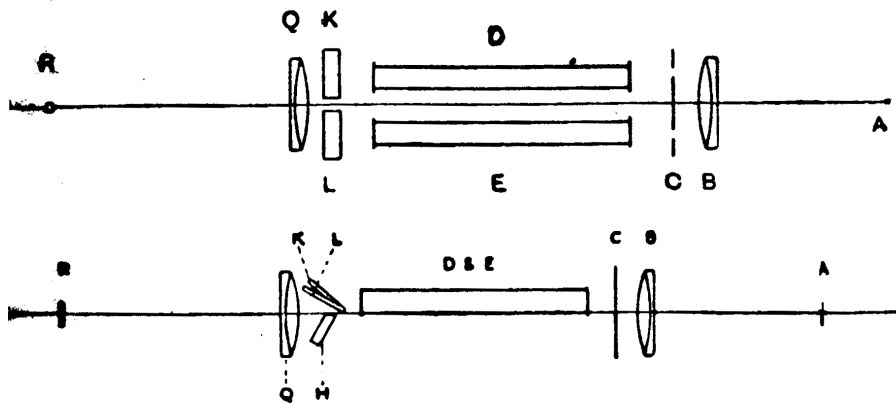


Fig. 4.20 – Interferômetro de Rayleigh em visão superior (em cima) e lateral (em baixo). A representa a fenda simples de entrada da luz no sistema, e C o sistema de fenda dupla. K e L são as placas compensadoras. A placa H na parte inferior da montagem, que se estendia à frente dos dois tubos, permitia ajustar a projeção do sistema de franjas auxiliar para que tangenciasse perfeitamente o sistema principal logo acima, vistos através da lente em R (WILLIAMS, 1950, p. 11).

Teoricamente, variações progressivamente menores no índice de refração poderiam ser medidas fazendo-se o comprimento dos tubos progressivamente maior, porém a partir de um

deslocamento das franjas que uma mira de fio colocada no meio do máximo central de interferência: erros da ordem de 1/40 da largura das franjas no primeiro caso contra aproximadamente 1/10 no segundo (WILLIAMS, 1950, pp. 13-14). Curiosamente, W. H. Steel, citando H. Kuhn, avalia que o sucesso do interferômetro de Rayleigh, que considera intrinsecamente inferior ao de Jamin, em teoria, se deveu possivelmente a falhas nos projetos de alguns interferômetros de Jamin (STEEL, 1967, p. 149), porém o argumento de Kuhn é o de que o interferômetro de Jamin era caro por requerer placas espessas e opticamente idênticas. Além disso, variações de temperatura das placas podiam causar deriva das franjas ao longo do tempo (KUHN, 1951, pp. 88-89).

certo ponto variações de temperatura ao longo dos tubos passavam a ser mais significativas que o efeito a ser medido propriamente, e um limite prático era alcançado.

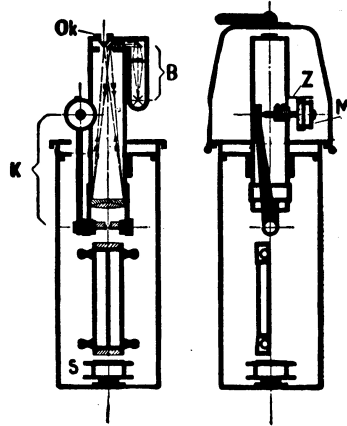


Fig. 4.21 – Interferômetro de Rayleigh portátil Zeiss em visão superior (à esquerda) e lateral (à direita). O nicho B abrigava um conjunto constituído de lâmpada, lente colimadora e prisma redirecionador que inseria a luz lateralmente no sistema óptico. S representa o espelho ao final dos tubos. A observação era feita através da lupa em Ok (WILLIAMS, 1950, p. 13).

Um modelo portátil de interferômetro de Rayleigh, lançado pela fábrica alemã Zeiss (ver figura 4.21), conseguia a mesma sensibilidade de um interferômetro de Rayleigh convencional utilizando tubos com a metade do comprimento. O ganho era conseguido fazendo-se refletir a luz de volta para os tubos e observando-se as franjas pelo mesmo lado das fendas. Assim, a luz era obrigada a atravessar duas vezes os tubos, duplicando portanto qualquer efeito decorrente da variação da refração em qualquer dos tubos¹⁶².

162 No entanto, essa não era uma ideia original à época, tendo sido usada previamente por Fizeau, num experimento em que este “truque” experimental é apenas um de diversos expedientes engenhosos (FIZEAU, 1851 e 1859), que o historiador da ciência alemão Jan Frercks eventualmente chamaria de “dispositivos imateriais” (FRERCKS, 2001). O experimento de Fizeau é relatado em grande detalhe no capítulo 6.

5 O Problema do Éter

“Oh! franchir l'éther! songe épouvantable et beau!”¹⁶³

Victor Hugo

5.1 Como o Vento entre Árvores

A teoria ondulatória da luz implicava a existência de um meio do qual a onda luminosa era uma perturbação, e portanto a natureza e as características deste meio, chamado de *éter luminífero*, bem como sua relação com a “matéria ponderável”, isto é, a matéria ordinária, foram um tema tão recorrente quanto fundamental da pesquisa em física ao longo do século XIX. Porém, como visto no capítulo 2, esta discussão não era exatamente uma invenção do período, tendo já uma longa tradição quando Young começou a participar do debate, por volta de 1799.

A introdução do conceito de interferência luminosa propriamente, ao menos como colocado por Young em seus trabalhos originais acerca do tema (YOUNG, 1800; YOUNG, 1802a), não implicou modificações profundas na visão de como seria constituído o éter¹⁶⁴. Até pelo menos 1801, Young considerava o éter como consistindo de partículas que se repeliam umas às outras e, ao mesmo tempo, eram atraídas por partículas de matéria ordinária, numa visão bastante semelhante à do éter newtoniano, exceto pelo fato de que enquanto para

163 “Oh! Cruzar o éter! Sonho terrível e belo!” (HUGO, 1950, p. 817 *apud* THIBAUT e BARDINI, 2008, p. 364, tradução nossa).

164 Até porque várias das tentativas de explicações de fenômenos ópticos corriqueiros, como a refração ou a dispersão da luz, a partir de seus primeiros modelos (incompletos) de éter eram admitidamente insatisfatórias (YOUNG, 1802a).

Newton o éter era mais rarefeito em corpos mais densos e mais concentrado em corpos diáfanos, para Young as coisas se passavam justamente da forma oposta¹⁶⁵. Uma característica importante do éter imaginado por Young nesta época era a de que a densidade do éter não mudava abruptamente nos contornos dos corpos, fazendo com que houvesse uma espécie de “atmosfera” ou “halo” de éter que se projetava para um pouco além dos limites geométricos dos objetos densos (CANTOR, 1970, p. 44), e que eventualmente, como em Newton, era responsável pela inflexão da luz nas bordas dos corpos¹⁶⁶.

Young baseava seu modelo inicial de éter em quatro hipóteses fundamentais (YOUNG, 1802a):

1. “Um éter luminífero permeia [todo] o universo, rarefeito e elástico em alto grau¹⁶⁷”;
2. “Ondulações são excitadas neste éter toda vez que um corpo se torna luminoso”;
3. “A sensação de cores diferentes depende das frequências diferentes das vibrações excitadas pela luz na retina”;
4. “Todos os corpos materiais têm uma atração pelo meio etéreo, através da qual ele é acumulado dentro de sua [dos corpos materiais] substância, e a uma pequena distância ao redor deles, em um estado de maior densidade, porém não de maior elasticidade”.

165 Fundamentalmente por causa das previsões opostas acalentadas pelas teorias ondulatória e da emissão para a velocidade da luz em meios refringentes.

166 Esta visão é apelidada pelo historiador da ciência britânico Geoffrey N. Cantor (1943-) de “hipótese da distribuição do éter” (CANTOR, 1970, p. 44). Não se deve no entanto acreditar que Young atribuísse *todo* o desvio da luz para o interior da sombra geométrica de corpos interpostos à ação do “halo” de éter (como Newton havia feito). Para Young a luz já era intrinsecamente divergente, sendo uma ondulação, e o efeito era apenas *amplificado* pela ação do “halo” de éter.

167 A alta elasticidade do éter decorria da enorme velocidade de transmissão de sinais luminosos, como já visto no capítulo 2.

O conceito de elasticidade do meio estaria ainda ligado, inversamente, a quanto uma onda *divergia* ao se propagar. Assim, como a elasticidade do éter seria muito maior que a do ar, por sua vez muito maior que a da água, ondas na água seriam muito mais divergentes que ondas no ar (som), por sua vez ainda muito mais divergentes que ondas no éter (luz), o que explicava a aparente propagação retilínea da luz, a formação de sombras e a dificuldade em demonstrar a inflexão da luz.

Em suas primeiras ideias Young contemplava o éter como um meio integrador de diversos fenômenos: luz, calor radiante, eletricidade, etc., representando mesmo uma espécie de princípio unificador dos fenômenos da natureza¹⁶⁸. Esta visão seria um pouco mais modesta a partir de 1802, quando Young passou a se referir ao éter apenas como veículo dos fenômenos luminosos e do calor radiante. De toda maneira Young antevia no estudo das propriedades do éter luminífero o devir de uma nova física¹⁶⁹. Como se pode deduzir das palavras com que encerrava a palestra 39 de seu curso sobre filosofia natural e artes mecânicas¹⁷⁰, Young manteve esta esperança viva a despeito das modificações que precisou realizar em sua visão do éter¹⁷¹:

168 O que fica evidente a partir de sua afirmativa, consistente com as ideias de Euler de meio século antes, de que a existência do éter estaria “inegavelmente provada pelos fenômenos da eletricidade” (YOUNG, 1800, p. 126 *apud* CANTOR, 1970, pp. 45-46). Young já havia adotado a hipótese “vibratória” do calor (desfazendo-se do calórico); e quanto ao calor radiante, é provável que Young tenha sido convencido (talvez mais que o próprio autor) pelos experimentos de Herschel (HERSCHEL, 1800a, 1800b, 1800c e 1800d). Não apenas isso, mas o éter desempenhava também um papel mecânico na repulsão entre diferentes corpos e também na coesão dos corpos em si. No entanto, Young nunca logrou identificar completamente o fluido elétrico único em que acreditava com o éter da luz e do calor radiante, nem explicar a gravitação ou o magnetismo através de uma ação etérea (CANTOR, 1970, p. 55).

169 Previsão que de certa forma se concretizou, levando-se em conta o advento do eletromagnetismo (ver capítulo 7).

170 “Sobre a natureza da luz e das cores”.

171 Ou quem sabe graças a elas.

Presume-se que a exatidão com que a lei geral da interferência da luz mostrou-se aplicável a tão grande variedade de fatos, em circunstâncias tão dissimilares, permite estabelecer sua validade da maneira mais satisfatória [possível]. A confirmação total ou a decidida rejeição da teoria que primeiramente sugeriu esta lei¹⁷² pode ser aguardada apenas com o tempo e a experimentação; caso seja refutada, nossos prospectos serão novamente confinados dentro de seus antigos limites, porém se [ela] for completamente estabelecida podemos esperar uma ampla extensão de nossa visão das operações da natureza através de nossa familiarização com um meio tão poderoso e tão universal quanto o que se deve atribuir à propagação da luz (YOUNG, 1845, p. 370)¹⁷³[v1].

Um dos problemas que levaram Young a relaxar sua visão do éter como elemento integrador de (possivelmente, ainda que no futuro) todos os fenômenos físicos foi sua incapacidade de manter o papel mecânico desempenhado pelo éter nos fenômenos de repulsão entre corpos muito próximos, como lâminas finas, e na coesão dos corpos, quando confrontado com a questão da eventual desaceleração que isto deveria acarretar no movimento dos corpos celestes. Abrindo mão destas explicações, o éter estava livre para apresentar “uma rarefação tão grande quanto nós escolhermos fazê-la” (YOUNG, 1802b, p. 194 *apud* CANTOR, 1970, p. 57), o que permitia o movimento desimpedido dos planetas, embora agora o éter ficasse limitado a participar apenas dos fenômenos ligados à luz e ao calor radiante.

Uma vez que o éter não participava mais dos efeitos de interação mecânica entre os corpos, como a coesão, nada o obrigava a interagir em *qualquer* instância com a matéria ordinária. Com isso, e a propósito como Fresnel alguns anos mais tarde, Young foi levado a analisar a imunidade do éter ao movimento da matéria a partir do já bem conhecido fenômeno da aberração da luz das estrelas:

172 Young se refere à teoria ondulatória da luz.

173 O curso foi ministrado na *Royal Institution* em 1807.

Eu não encontrei, no curso destas investigações, nenhuma razão para supor a presença de um tal meio responsável pela inflexão [da luz] na vizinhança de substâncias densas, como eu estava previamente inclinado a lhes atribuir; e, após considerar o fenômeno da aberração das estrelas, estou disposto a acreditar que o éter luminífero permeia a substância de todos os corpos materiais com pouca ou nenhuma resistência, tão livremente talvez como vento passando através de uma fileira de árvores (YOUNG, 1804, pp. 12-13)[v2].

O fenômeno da aberração estelar, descoberto por Bradley nos anos finais da década de 1720, consistia em um deslocamento sazonal que uma estrela parecia experimentar quando vista por um observador em movimento solidário à Terra¹⁷⁴. O efeito ocorria porque enquanto a luz da estrela atravessava o tubo do telescópio, este se deslocava simultaneamente em outra direção, de modo que, para que a luz fosse efetivamente transmitida ao longo do eixo do tubo, o telescópio deveria ser inclinado de um certo ângulo específico¹⁷⁵ *na direção de seu movimento* em relação à estrela (ver figura 5.1 a seguir). O fenômeno é em tudo semelhante ao que obriga uma pessoa que caminha na chuva a inclinar o guarda-chuva de um certo ângulo na direção de seu movimento, se não quiser se molhar, ainda que as gotas de chuva caiam estritamente na vertical. Este ângulo é completamente determinado pela relação entre a velocidade com que a pessoa caminha e a velocidade com que as gotas caem, e da mesma forma uma medição do ângulo de aberração estelar permitia determinar a relação entre a velocidade do observador na

174 Bradley tropeçou no fenômeno enquanto buscava determinar a paralaxe estelar de γ -Draconis, uma estrela relativamente brilhante que passa muito próximo do zênite na latitude de Londres e que portanto permitia medições muito exatas a partir de observações meridianas com telescópios verticais fixos. Bradley percebeu que o efeito de deslocamento relativo da estrela ao longo do ano acontecia, de fato, mas defasado de três meses em relação ao esperado. Foi para explicar esta defasagem que Bradley introduziu a aberração estelar e com ela pôde estimar a velocidade da luz, obtendo um número relativamente próximo ao que os trabalhos de Römer no século anterior permitiam estimar. A descoberta do efeito de aberração estelar pode ser entendida portanto como um subproduto do longo e tortuoso programa de pesquisa de busca de determinação da paralaxe estelar, história brilhantemente contada em HIRSHFELD, 2001.

175 Justamente, o assim chamado “ângulo de aberração”.

Terra – a composição dos movimentos orbital e rotacional para aquele ponto da superfície naquele instante – e a velocidade de propagação da luz.

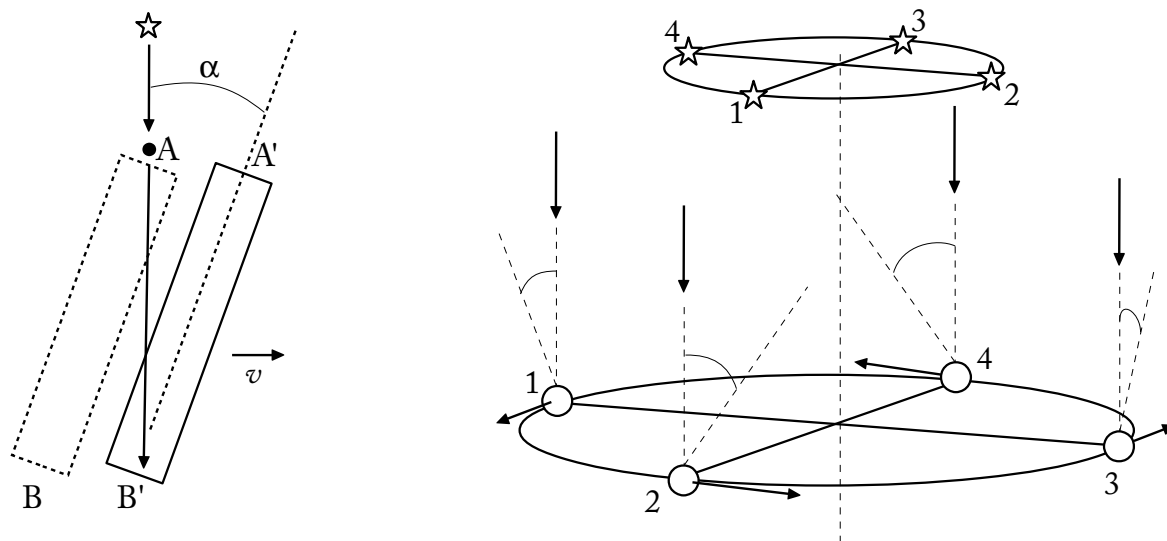


Fig. 5.1 – O fenômeno da aberração. Uma partícula luminosa oriunda de uma estrela ingressa no tubo de um telescópio em A (figura da esq.) e atinge o olho do observador em B'. Para que isto aconteça, no entanto, o telescópio não pode estar apontado diretamente para a posição real da estrela, mas deve estar inclinado de um ângulo α na direção do movimento da Terra (e do telescópio) proporcional à relação v/c . Na figura da direita, como o efeito da aberração pode ser estimado a partir da variação percebida da posição da estrela ao longo do ano.

Evidentemente, o ângulo de aberração só foi percebido a partir do momento em que foram feitas diversas observações de uma mesma estrela em diferentes épocas do ano, o que permitiu observar a contínua variação na direção de observação ao longo da órbita da Terra e explicar a defasagem de três meses entre a sazonalidade observada e a esperada para um efeito de paralaxe, que dependia não da *velocidade* relativa, mas da *posição* relativa entre estrela e observador.

Se se considera a luz como constituída de partículas, conforme a teoria da emissão, a explicação do fenômeno é simples, porém no contexto ondulatório era preciso supor que a onda luminosa não era afetada pela presença do tubo do telescópio, atravessando-o sem

impedimento.

O novo éter de Young (*ca.* 1803-1804) configuraria portanto por assim dizer um referencial absoluto¹⁷⁶ em relação ao qual os planetas se moveriam, produzindo o efeito da aberração¹⁷⁷. Consistentemente, em textos posteriores, Young passou a referir-se à sua hipótese 4 do éter nos seguintes termos:

Todos os corpos materiais serão considerados, com respeito ao fenômeno da luz, como consistindo de partículas tão distantes umas das outras que permitam o meio etéreo permeá-las com perfeita liberdade, e ou retê-lo num estado de maior densidade e de igual elasticidade ou constituir, junto com o meio, um agregado, que pode ser considerado como mais denso porém não mais elástico (YOUNG, 1845) [v3].

A onda luminosa ainda constituía, em consistência com a analogia com o som, uma perturbação longitudinal no éter. No entanto, muita coisa mudaria neste modelo nos anos subsequentes, em particular a partir dos estudos sobre a polarização da luz (seção 5.2) e de um experimento realizado por Arago em 1810 (seção 5.3).

5.2 A Luz como Onda Transversal e a Elasticidade do Éter

A rarefação do éter no espaço livre constituía uma condição *sine qua non* do modelo ondulatório conforme compreendido por Young e Fresnel, uma vez que

176 Por exemplo, em repouso em relação ao Sol.

177 Incidentalmente, este novo modelo de éter, livre de efeitos coesivos, permitiu a Young especular sobre seu possível papel na explicação da gravitação. Como Newton, Young achava a ideia de ação a distância quase incompreensível (CANTOR, 1970, p. 59).

[p]ara conceber uma sucessão numerosa de oscilações aproximadamente iguais da mesma partícula iluminante, é suficiente supor que sua densidade é muito maior que aquela do fluido no qual ela oscila [o éter]. É o que já devíamos concluir da regularidade dos movimentos planetários através deste mesmo fluido, que preenche os espaços celestes¹⁷⁸ (FRESNEL, 1826, p. 375)[v4].

No entanto a descoberta da polarização da luz por reflexão por Malus em 1808 (MALUS, 1809a e 1809b, anexados a MACH, 1926, pp. 307-317) trouxera novas e profundas questões ao debate sobre a natureza da luz, constituindo *de facto* a vanguarda da pesquisa em óptica do período e por extensão o campo de batalha preferencial entre as tradições corpuscular e ondulatória (*cf.* BUCHWALD, 1989). Dentre os diversos estudos feitos por Arago e Fresnel sobre o tema da polarização da luz, um em particular teve um efeito impactante sobre as ideias a respeito da natureza do éter luminífero do ponto de vista do modelo ondulatório. Tratava-se dos experimentos feitos pela dupla¹⁷⁹ sobre a *interferência da luz polarizada*, culminando com a descoberta de um conjunto de leis às quais o fenômeno parecia estar submetido. A iniciativa era oportuna: ao buscar estabelecer relações entre a polarização da luz e o fenômeno da interferência, Arago e Fresnel traziam o debate em torno da polarização da luz, que até então havia colocado os defensores da teoria ondulatória em situação difícil, para uma arena mais amistosa, *i. e.*, a do fenômeno da interferência, cuja própria natureza dificultava uma explicação corpuscular.

A descrição dos diversos experimentos realizados por Arago e Fresnel com a interferência da luz polarizada é extensa (ARAGO e FRESNEL, 1858, pp. 135-148). É

178 Isto é, os efeitos dissipativos do éter deviam ser desprezíveis. Aqui já era evidente a tentativa de assinalar propriedades mecânicas ao éter (SHAMOS, 1959, p. 113).

179 Porém sugeridos inicialmente por Arago, que “imaginou que poderia ser curioso pesquisar se as ações que os raios ordinários exercem habitualmente uns sobre os outros não seriam modificadas quando se fizesse interferir dois feixes luminosos previamente polarizados” (ARAGO e FRESNEL, 1858, p. 134).

interessante, no entanto destacar os diferentes métodos de observação do efeito de interferência utilizados.

Num primeiro experimento, um romboíde de espató da Islândia (calcita) ou, alternativamente, um prisma de cristal de rocha acromático, era colocado diante do ponto luminoso formado no foco de uma lupa, gerando, assim, para um observador além do material birrefringente, dois feixes divergentes de polarizações cruzadas. Um cilindro metálico era então colocado entre os dois pontos radiantes, exatamente na metade da distância que os separava. Desta maneira uma parte do feixe da direita se sobrepunha a uma parte do feixe da esquerda na sombra geométrica do cilindro. Apesar da superposição dos feixes, não se observava a formação de nenhuma franja de interferência, mesmo com o auxílio de uma lupa de observação (ARAGO e FRESNEL, 1858, pp. 135-136).

Não plenamente convencidos do efeito, Arago e Fresnel buscaram montagens alternativas para reproduzir o resultado. Fresnel, por exemplo, imaginou dois novos experimentos. Num primeiro, percebendo que a superposição dos feixes polarizados perpendicularmente um ao outro pelo espató não necessitaria da introdução de um objeto opaco para ocorrer, Fresnel buscou observar a formação das franjas observando diretamente a luz recebida na região de superposição dos feixes divergentes. Porém, como o raio extraordinário se movia no espató mais rapidamente que o raio ordinário, Fresnel utilizou uma placa compensadora (ver capítulo 4) sobre o feixe extraordinário para procurar trazer os dois feixes ao mesmo caminho óptico, o que deveria tornar manifestas as franjas de interferência. Apesar disso, nenhum padrão surgiu. Num segundo experimento, similar, uma placa de vidro foi colocada à frente do espató. A espessura do vidro havia sido calculada para compensar da

melhor maneira possível o atraso do raio ordinário em relação ao extraordinário, fazendo com que o caminho óptico do raio ordinário refletido na *primeira* superfície do vidro fosse igual ao do raio extraordinário refletido na *segunda*, mas mesmo assim não houve a formação de franjas de interferência, mesmo quando a placa era girada suavemente, buscando a mais perfeita compensação (ARAGO e FRESNEL, 1858, pp. 136-138).

Já Arago imaginou uma variação do experimento da fenda dupla na qual cada fenda era precedida por metade de uma lâmina de ágata girada de 90° uma em relação à outra. Isso faria com que os feixes oriundos de cada fenda tivessem polarizações cruzadas¹⁸⁰. Novamente nenhum efeito de interferência foi observado (ARAGO e FRESNEL, 1858, pp. 139-141).

Confirmando o efeito através de ainda outro experimento, desta vez sugerido por Fresnel diante da montagem feita por Arago com a fenda dupla¹⁸¹, os dois posicionaram um bloco de material birrefringente¹⁸² diante das fendas de modo a que ambos os feixes atravessassem as duas fendas, na esperança de observar *três* sistemas diferentes de franjas: os raios ordinários oriundos das duas fendas interfeririam normalmente, gerando um padrão de interferência centrado numa projeção do ponto médio das fendas. Um segundo padrão seria gerado pela superposição dos raios extraordinários, porém seria indistinguível do padrão anterior, e portanto apenas teria o efeito de aumentar-lhe a intensidade. No entanto, caso o feixe ordinário que atravessava uma das fendas de fato interferisse com o feixe extraordinário que atravessava a *outra* fenda, deveria surgir um outro padrão de interferência, deslocado para

180 No entanto, não dispondo no momento de nenhuma peça de ágata, Arago e Fresnel improvisaram com uma pilha de lâminas de mica cortada ao meio.

181 Efetivamente realizado no mesmo dia do experimento anterior.

182 Cal sulfatada, desta vez.

um dos lados em relação aos anteriores em função do atraso do feixe ordinário em relação ao extraordinário. E, reciprocamente, um terceiro padrão, simétrico a este, deveria aparecer do lado oposto. No entanto apenas *um* padrão de interferência, centrado em relação às fendas, pôde ser observado, o que corroborava mais uma vez a conclusão de que apenas os feixes polarizados de forma semelhante eram capazes de interferir. Para confirmar sua interpretação do fenômeno, Arago e Fresnel cortaram em duas metades o bloco birrefringente, colocando-as defronte às fendas agora com uma das metades girada de 90° . Desta forma o raio ordinário num caso tinha a mesma polarização do raio extraordinário da outra fenda, e vice-versa, de modo que apareciam apenas dois padrões de interferência, cada um de um lado da projeção do ponto médio entre as fendas, onde nenhum padrão se formava uma vez que ali agora se sobrepunham feixes de polarizações cruzadas. Assim o que se via era dois padrões de interferência separados por um intervalo branco e uniforme. Arago e Fresnel procederam então a mais um experimento com a mesma montagem, girando as metades do bloco birrefringente de modo a que seus eixos fizessem um ângulo de 45° entre si. Observaram finalmente o aparecimento dos três sistemas de franjas, com o central mais intenso que os laterais (ARAGO e FRESNEL, 1858, pp. 141-143).

De outra maneira, e utilizando ainda a montagem onde a luz saía de cada fenda polarizada perpendicularmente, Arago imaginou posicionar entre as fendas e o olho do observador um outro cristal birrefringente cujo eixo fizesse um ângulo de 45° com a direção da polarização de um e outro feixe incidente. Novamente, pôde-se observar padrões de interferência devidos à superposição dos raios ordinários de ambas as fendas e dos raios extraordinários de ambas as fendas, mas quando cruzados um com o outro apenas uma área

iluminada uniformemente foi produzida. Foi justamente deste experimento que Arago e Fresnel tiraram a conclusão de que raios originalmente polarizados em sentidos contrários (perpendiculares) podiam ser trazidos a um mesmo plano de polarização sem com isso adquirir a habilidade de interferir um com o outro (ARAGO e FRESNEL, 1858, pp. 143-144).

Numa outra experiência feita por Fresnel, as fendas eram colocadas sobre uma lâmina fina de material birrefringente cujo eixo fazia um ângulo de 45° com a direção da polarização do feixe incidente. Novamente observava-se a sombra das fendas com uma lupa, e mais uma vez com um prisma de espato da Islândia interposto, desta feita de modo a que seu eixo fizesse também um ângulo de 45° com o eixo do material birrefringente colocado diante das fendas. Observava-se neste caso *três* sistemas de franjas. Este resultado e a análise de todas as combinações de raios ordinários e extraordinários permitia concluir que dois raios trazidos para um mesmo plano de polarização poderiam, sim, interferir, desde que *originalmente* tivessem o mesmo estado de polarização (ARAGO e FRESNEL, 1858, pp. 144-148).

As conclusões a que Arago e Fresnel chegaram com esta série de experimentos foram por eles sintetizadas num conjunto de cinco “consequências”¹⁸³ (ARAGO e FRESNEL, 1858,

183 Hoje conhecidas como “leis de Fresnel-Arago” da interferência da luz polarizada, que eventualmente podem ser descritas da seguinte forma (HECHT, 1990, p. 339):

- 1) Dois [feixes de luz com] estados de polarização coerentes e ortogonais não podem interferir (...);
- 2) Dois [feixes de luz com] estados de polarização coerentes e paralelos interferirão da mesma maneira que a luz natural;
- 3) Os dois estados de polarização ortogonais constituintes da luz natural não podem interferir para formar um padrão de franjas prontamente observável mesmo se girados até o alinhamento (...).

Note-se como parte da coerência (em mais de um sentido) da redação original se perde com a omissão dos dois últimos ítems.

pp. 148-149):

1º Nas mesmas circunstâncias em que dois raios de luz ordinária parecem se destruir mutuamente, dois raios polarizados em ângulos retos ou em sentidos contrários não exercem um sobre o outro qualquer ação apreciável;

2º Os raios de luz polarizados em um único sentido agem um sobre o outro como os raios naturais, de sorte que nestas duas espécies de luz os fenômenos de interferência são absolutamente os mesmos;

3º Dois raios primitivamente polarizados em sentidos contrários podem a seguir ser trazidos a um mesmo plano de polarização, sem no entanto adquirir com isso a faculdade de se influenciarem;

4º Dois raios polarizados em sentidos contrários, e [depois] trazidos a polarizações análogas, se influenciam como os raios naturais, se eles provêm de um feixe primitivamente polarizado em um só sentido;

5º Nos fenômenos de interferência produzidos pelos raios que sofreram dupla refração o lugar das franjas não é determinado unicamente pela diferença de caminhos e de velocidades, e em algumas circunstâncias indicadas é preciso ainda levar em conta uma diferença igual a uma meia-onda (ARAGO e FRESNEL, 1858, pp. 148-149)[v5].

Em 1816 Young recebeu a visita de Arago, que lhe fez ver o resultado daqueles experimentos¹⁸⁴. Logo a seguir, Young chegou a uma possível explicação, bastante original, que assim relatou a Arago, numa carta datada de 12 de janeiro de 1817:

[e]stive refletindo sobre a possibilidade de dar uma explicação imperfeita da afecção da luz que constitui a polarização, sem desviar da genuína doutrina das ondulações. É um princípio nesta teoria que todas as ondulações são simplesmente propagadas através de meios homogêneos em superfícies esféricas concêntricas como as ondulações do som, consistindo simplesmente nos movimentos diretos e retrógrados das partículas [do éter] na direção do raio, com suas concomitantes condensação e rarefações. E no entanto é possível explicar nesta teoria uma vibração transversal, propagada também na direção do raio, e com igual velocidade, os movimentos das partículas se dando numa certa direção constante com relação ao raio; e isto é uma *polarização* (YOUNG, 1855, p. 380 *apud* WHITTAKER, 1910, pp. 121-122, grifo no original)[v6].

184 Os resultados dos experimentos só seriam publicados efetivamente em 1819 (WHITTAKER, 1910, p. 121).

E ainda no mesmo ano, no texto de um artigo para a *Encyclopaedia Britannica*, da qual era um colaborador frequente, Young iria mais além, insinuando que

se assumimos como um postulado matemático da teoria ondulatória, sem buscar demonstrar sua fundamentação física, que um movimento transversal pode ser propagado numa linha reta, podemos derivar desta suposição uma ilustração tolerável da subdivisão da luz polarizada por reflexão num plano oblíquo (YOUNG, 1855, p. 279 *apud* WHITTAKER, 1910, p. 122)[v7].

Isto é, Young em 1817 já parecia acreditar, pelo menos metodologicamente, que a luz era uma onda transversal e que a polarização por reflexão se dava pela decomposição da vibração em duas direções ortogonais, cada componente se comportando diferentemente (WHITTAKER, 1910, p. 122).

Young retornaria à questão em ainda outra carta escrita para Arago em 29 de abril de 1818, em que comparava as ondas luminosas às vibrações transversais numa corda agitada em uma de suas extremidades. Arago teria então mostrado a opinião de Young a Fresnel, que rapidamente percebeu que não apenas a ideia de uma onda transversal *explicava* a não interferência da luz polarizada evidenciada nos experimentos, mas que de fato o resultado dos experimentos *implicava* que a luz era uma onda transversal (WHITTAKER, 1910, p. 122).

Fresnel portanto concordava com Young, escrevendo em algum ponto no período 1821-1822 nos seguintes termos:

[p]ode haver ondas derivadas nas quais a direção das velocidades absolutas impressas às moléculas não seja perpendicular à superfície da onda. Refletindo sobre as leis particulares da interferência dos raios polarizados, eu me convenci, após a redação desta Memória¹⁸⁵, que as vibrações luminosas se executam perpendicularmente aos raios ou paralelamente à superfície da onda. Os raciocínios e os cálculos contidos nesta Memória estão também tão de acordo com esta nova hipótese quanto com a precedente, pois que são independentes da direção real das

185 Escrita em 1816.

vibrações e supõem somente que elas sejam executadas no mesmo sentido por todos os raios do mesmo sistema de ondas que concorre para a formação das franjas (FRESNEL, 1826, p. 384, nota de rodapé)[v8].

Com esta suposição Fresnel foi capaz de explicar consistentemente o fenômeno da polarização cromática descoberto em 1811 por Arago¹⁸⁶, e com as peças da polarização da luz começando a se encaixar o jogo rapidamente virou a favor da teoria ondulatória.

É claro que havia um preço a ser pago. Uma onda transversal não podia mais estar associada, como na analogia sonora, com a rarefação e compressão do meio etéreo, mas parecia implicar que as partículas do éter mantinham entre si uma relação mais similar à das moléculas de corpos sólidos, que, ao contrário dos fluidos, são capazes de propagar vibrações transversais. A partir de então o éter luminífero teria que ser encarado como uma substância com as propriedades paradoxais, aparentemente simultâneas, de extrema rarefação, para permitir o movimento desimpedido dos planetas, e incrível rigidez, para propagar uma vibração transversal com a velocidade da luz.

O efeito da transversalidade da onda luminosa sobre as propriedades do éter não parece ter incomodado tanto Fresnel, para quem provavelmente a consistência matemática era mais relevante que a plausibilidade do modelo físico por trás dela, porém parece ter deixado bastante insatisfeito Arago, que nunca foi capaz de aceitar completamente a ideia de um éter com propriedades “sólidas”¹⁸⁷. Para a maior parte dos cientistas da geração seguinte, no

186 Young já havia ele mesmo intuído que a explicação tinha que estar relacionada com o fenômeno da interferência, mas apenas com o entendimento da relação entre a polarização e a direção de vibração da onda luminosa foi possível efetivamente dar uma explicação completa do fenômeno no contexto ondulatório (WHITTAKER, 1910, p. 121, ver nota de rodapé).

187 Isto, no entanto, pode estar relacionado a Arago ter sido formado num ambiente ainda pré-revolucionário. Fresnel, como aliás Fourier, por exemplo, já pertencia a uma geração posterior, que se formou nas *Écoles* e que passou a vislumbrar a física de um modo menos mecanicista.

entanto, talvez a sensação fosse semelhante à expressa por Stokes, que afirmou que

[i]ndubitavelmente constitui uma violência às ideias que deveríamos ter formado *a priori* sobre a natureza do éter a afirmativa de que ele deve ser encarado como um sólido elástico ao tratar das vibrações da luz. Quando, no entanto, consideramos a maravilhosa simplicidade das explicações dos fenômenos da polarização ao se adotar a teoria das vibrações transversais, e as dificuldades, que para mim pelo menos parecem quase intransponíveis, de explicar estes fenômenos por quaisquer vibrações devidas à condensação e à rarefação de um fluido elástico como o ar, parece razoável suspender nosso julgamento, e se consolar em aprender dos fenômenos a existência de forças que nós não teríamos esperado antecipadamente (STOKES, 1846, p. 81 *apud* WILSON, 1972, p. 71)[v9].

5.3 O Éter Parcialmente Arrastado

Em 1810 Arago estava mergulhado na questão da velocidade da luz e de sua variação pelo efeito da refração, lendo para a primeira classe do *Institut de France*¹⁸⁸ uma *mémoire*¹⁸⁹ influente sobre o tema¹⁹⁰. Nela traçava uma revisão dos estudos sobre as possíveis causas das esperadas alterações na velocidade da luz no contexto da teoria da emissão¹⁹¹ e apresentava

188 Nome dado à Academia de Ciências no período napoleônico.

189 Um “paper”. Via de regra os trabalhos de Arago primavam, desde sua juventude, e como era de bom tom, por uma atenção especial à revisão histórica dos conceitos e experimentos relacionados ao tema, quesito em que a erudição de Arago o destacava.

190 O trabalho de Arago não foi publicado à época, no entanto. De qualquer forma Arago parece ter ficado satisfeito com as menções ao trabalho feitas tanto por Laplace quanto por Biot em obras que tiveram grande repercussão. Apenas em 1853 Arago reencontrou os originais de sua *mémoire* e os fez publicar nos *Annales de Chimie et de Physique*, dado o interesse renovado pela questão dentro do contexto da discussão das características do éter e de sua relação com a matéria em movimento (ARAGO, 1853, pp. 180-181 – ver notas de rodapé).

191 Por exemplo, a de que a gravidade de estrelas maiores deveria desacelerar os corpúsculos luminosos mais do

suas próprias observações sobre a refração da luz de diversos corpos celestes, indicando que em nenhum caso observou qualquer alteração no ângulo de refração da luz ao atravessar um prisma acromático¹⁹², independentemente do estado de movimento da fonte luminosa ou de sua natureza.

Arago teria ainda a feliz ideia¹⁹³ de apontar o telescópio, com um prisma acromático quádruplo e um círculo repetidor acoplados a ele, para diversas estrelas visíveis no céu próximas ao meridiano às 6h da manhã, quando a Terra (e o telescópio, e o prisma) deveria, em seu movimento de translação em torno do Sol, estar se movendo *em direção a* estas estrelas e, novamente, às estrelas que passavam pelo meridiano às 18h, quando a Terra deveria estar se movendo *na direção contrária a* estas estrelas¹⁹⁴. Tendo se assegurado de que o efeito seria mensurável¹⁹⁵, Arago procedeu às observações. Os minúsculos desvios observados lhe

que a de estrelas menores (ou mesmo pará-los (*cf.* PEDERSEN, 2000, p. 537), no que alguns podem enxergar o embrião da ideia moderna dos buracos negros), ou a de que a luz emitida por diferentes extremidades de um corpo celeste em rotação deveria ter diferentes velocidades. Neste particular, “o Dr. Blair (...) acreditava que a observação devia tornar sensível a desigualdade de velocidades com as quais são refletidos os raios luminosos que chegam a nós [oriundos] das duas bordas de Júpiter (...) e M. Robisson (...) indica igualmente as observações das duas bordas dos anéis de Saturno” (ARAGO, 1853, p. 187).

192 Prisma formado de duas componentes coladas, uma de vidro do tipo *flint* e outra de vidro do tipo *crowm*, projetados de modo a compensar justamente a dispersão cromática um do outro.

193 Possivelmente inspirado pelas ideias do filósofo natural inglês John Michell (1724-1793), que em 1784 escrevera sobre o tema, justamente propondo um experimento semelhante, porém usando a luz oriunda das duas componentes de uma estrela binária (PEDERSEN, 2000, p. 537).

194 Note-se que não apenas a velocidade de rotação da Terra é muito menor que a de translação, mas nestas posições especificamente a velocidade do observador devida à rotação seria perpendicular à da luz das estrelas. O historiador da ciência Michel Janssen cita, aparentemente de forma incorreta, que Arago teria realizado o experimento comparando medições da luz *da mesma* estrela próxima ao horizonte em posições opostas na órbita terrestre, isto é, com um intervalo de pelo menos seis meses entre elas (JANSSEN, 2001, p. 3).

195 Arago estimou que um desvio combinado de 28 segundos de arco deveria surgir das medições com o círculo repetidor.

pareceram erros aleatórios, de modo que pôde concluir que (estranhamente) a velocidade da luz não parecia ser alterada em função da velocidade relativa entre fonte e observador¹⁹⁶.

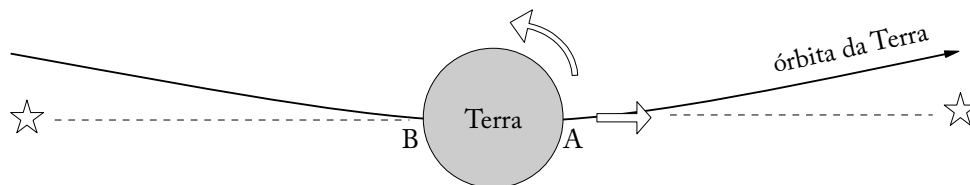


Fig. 5.2 – Experimento do prisma de Arago. Na posição A, às 6h da manhã, a Terra (e o prisma) tem uma velocidade translacional na direção da estrela na parte direita da figura. A velocidade da luz recebida dela deveria se somar à velocidade do prisma em sua direção, alterando ligeiramente o ângulo de refração se comparado com situação semelhante na posição B, às 18h, quando a luz da estrela da esquerda agora teria sua velocidade subtraída da velocidade translacional da Terra. Nenhuma alteração sistemática foi detectada, no entanto.

No quadro da teoria da emissão, em que as velocidades dos corpúsculos luminosos deveriam depender das velocidades relativas entre fonte e observador, este resultado era de difícil explicação. Parece ser devida a Laplace a aparentemente única solução possível: a de que as fontes luminosas emanariam corpúsculos luminosos com uma enorme gama de velocidades, porém o olho humano só seria capaz de perceber uma pequena fração destas velocidades (FRESNEL, 1868, p. 627). Assim, corpúsculos que numa situação de repouso relativo seriam percebidos pelo olho passariam a não mais ser percebidos numa situação de movimento relativo por terem velocidades agora acima do limiar de sensibilidade do olho, por exemplo, porém isto seria compensado pela percepção de outros corpúsculos que antes não seriam percebidos por terem velocidades abaixo do limiar, e vice-versa¹⁹⁷.

196 De fato, há quem considere o experimento do prisma de Arago o primeiro resultado experimental “relativístico” (FERRARO e SFORZA, 2004).

197 A explicação nestes termos não é isenta de críticas relacionadas à refração da luz de diferentes cores e à fisiologia da visão (ver por exemplo, FRESNEL, 1868, p. 628). No entanto Arago a justificava em função das então recentes descobertas do que hoje chamamos de radiação infravermelha e ultravioleta (PEDERSEN, 2000, p. 540). Incidentalmente, a explicação guarda uma certa semelhança, num outro contexto (ondulatório),

O experimento do prisma no entanto colocava problemas também para o modelo ondulatório em se considerando que no modelo ondulatório da época o éter seria uniforme e deveria poder atravessar livremente a matéria ordinária (como o vidro do prisma, por exemplo), e portanto teria ubiquamente a mesma densidade. Embora não dependesse da velocidade *da fonte*, a velocidade da luz deveria depender da velocidade relativa *do meio* em que a luz se propagava.

Anos depois, ainda insatisfeito com a situação, Arago escreveu a Fresnel perguntando-lhe qual seria, a seu ver, a explicação do fenômeno do ponto de vista da teoria ondulatória da luz. A solução encontrada por Fresnel, e enviada numa carta para Arago em 1818 (FRESNEL, 1868, pp. 627-636), consistia no seguinte:

Se o prisma arrastasse consigo todo o éter que ele contém, a totalidade do meio que serve de veículo às ondas compartilharia assim o movimento terrestre, [e, portanto,] a velocidade das ondas luminosas seria aquela que elas deveriam ter no meio suposto imóvel, aumentada da velocidade da Terra. Porém o caso em questão é mais complicado; não é senão *uma parte* deste meio que é arrastado por nosso globo, aquela que constitui o *excesso de sua densidade* sobre o éter ambiente. A analogia indica que, uma vez que apenas uma parte do meio se desloca, a velocidade de propagação das ondas não deve ser aumentada senão da velocidade *do centro de gravidade* do sistema (FRESNEL, 1868, p. 631, grifos nossos)[v10].

Fresnel conjurava portanto uma explicação “cinemática” que envolvia pensar o éter no interior da matéria ordinária como consistindo de duas porções distintas, uma das quais era arrastada de forma solidária pela matéria, enquanto a outra permanecia livre e imune ao movimento dos corpos materiais. Mais que isso, Fresnel mostrava que se se considerasse que a segunda porção tinha a mesma densidade do éter livre (do espaço), isto é, se a primeira porção

com a explicação de Fizeau de, se há o efeito Doppler-Fizeau do desvio de frequências em função da velocidade relativa, por que não vemos as estrelas que se afastam de nós azuladas e as que se aproximam de nós avermelhadas.

consistisse justamente num *excesso* de éter presente nos corpos¹⁹⁸, poder-se-ia dar conta do fenômeno.

Fresnel exemplificava como o esquema era capaz de anular o efeito da composição de velocidades sobre a refração da luz imaginando um caso simples em que exatamente *metade* do éter no interior de um corpo transparente fosse arrastado e metade se mantivesse livre. Do ponto de vista do centro de gravidade do éter total originalmente dentro do volume do corpo (e aqui é preciso entender que o raciocínio exige uma análise infinitesimal do movimento, ou instantânea) a metade solidária do éter estaria se deslocando com a metade da velocidade do corpo na direção da luz, acelerando-a portanto, mas a metade livre estaria se deslocando no sentido contrário com a mesma velocidade, retardando-a e compensando portanto o efeito. Como se tratava do referencial do centro de gravidade, o mesmo efeito ocorreria para qualquer proporção escolhida para a quantidade de éter móvel, solidária à matéria, e para a quantidade de éter imóvel, livre (FRESNEL, 1868, p. 631-632).

Embora Fresnel não o tenha escrito neste formato em sua carta de 1818, o termo que se devia somar à velocidade da luz no meio em repouso (em relação ao éter) para dar conta do arrasto causado por seu movimento era

$$\left(1 - \frac{1}{n^2} \right) v \quad ,$$

198 A grande crítica ao modelo de éter de Fresnel baseado no arrasto parcial é a de que ele introduz arbitrariamente duas naturezas distintas de éter em função de sua solidariedade ou de sua imunidade ao movimento dos corpos materiais. Em 1846 Stokes proporia uma saída honrosa para o problema supondo que, ao invés de *uma parte* do éter ser arrastada com *toda* a velocidade do corpo, *tudo* o éter no interior dos corpos fosse arrastado, porém com apenas *uma parte* da velocidade do corpo, de modo a reproduzir perfeitamente o efeito sem introduzir dois tipos diferentes de “éteres” (JANSSEN, 2001, pp. 5-6).

onde v era a velocidade do corpo em relação ao éter livre do espaço, e n o índice de refração do material de que era constituído o corpo, pela teoria ondulatória igual à razão entre as velocidades da luz no vácuo e no meio em questão (c/u). O termo $1 - (1/n^2)$, que pode ser interpretado como a *fração* da velocidade do corpo adicionada à velocidade da luz quando se propagando em seu interior, ficou conhecido como “coeficiente de Fresnel”, e a velocidade da luz no interior de um corpo em movimento pôde ser expressa portanto como

$$u' = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v .$$

É questionável até que ponto a ideia do arrasto parcial representada pelo coeficiente de Fresnel foi proposta como uma hipótese *ad hoc*¹⁹⁹, mas seja lá como for ela expressa matematicamente a impossibilidade prática de medir a velocidade da Terra em relação ao éter através de experimentos utilizando a refração da luz.

Em 1871, estimulado pela discussão entre astrônomos continentais²⁰⁰ a respeito do possível efeito de diferentes espessuras de lentes de telescópios sobre as medidas de aberração estelar, o astrônomo real britânico George Biddell Airy (1801-1892) realizou um experimento, havia muito proposto como um *Gedankenexperiment*²⁰¹, no qual o tubo de um telescópio era

199 Como veremos no capítulo 6, Fresnel deduziu o coeficiente de arrasto a partir de considerações a respeito da relação entre a densidade do éter no interior de materiais refringentes e no espaço livre, porém certamente tendo os resultados experimentais da aberração estelar e do experimento do prisma de Arago em vista.

200 No período 1867-1869, envolvendo particularmente os astrônomos Ernst Friedrich Wilhelm Klinkerfues (1827-1884), de Leipzig, e Martinus Hoek (1834-1873), de Utrecht. Hoek aparecerá novamente no capítulo 6 como autor de um experimento interferométrico relacionado a esta questão.

201 Pelo menos duas vezes ainda no século XVIII: em 1766 pelo jesuíta polímata croata Ruđer Bošković (1711-1787) numa carta ao sábio francês Joseph Lalande (1732-1807) apenas tornada pública quando comentada no quarto volume da 2ª edição (1781) de sua obra “Astronomie”, e pelo astrônomo escocês Patrick Wilson (1743-1811) em 1782 (ARAGO, 1852, pp. 185-186, PEDERSEN, 2000, pp. 504 e 513). O

preenchido completamente com uma coluna de água²⁰² e com ele era estimado o ângulo de aberração, a partir de uma série de medições realizada de fevereiro a outubro daquele ano. Airy concluiu que a presença da água em nada afetava a medição da aberração de γ -Draconis²⁰³, e que portanto o pleito de Klinkerfues de que a espessura do vidro da lente tinha uma participação no valor medido, o que também afetaria não apenas os valores medidos para a velocidade da luz mas também todo o fundamento da teoria ondulatória, era infundado (AIRY, 1871)²⁰⁴.

O experimento do telescópio preenchido com água provia também uma maneira simples de deduzir o coeficiente de Fresnel²⁰⁵. A figura 5.3 mais à frente representa um tubo de telescópio preenchido de água e apontado na direção de uma determinada estrela²⁰⁶. Note-se que

Gedankenexperiment havia sido mencionado já por Fresnel (como proposto por Bošćović) em sua famosa carta a Arago, na qual havia sido introduzido o conceito de arrasto parcial. Nela Fresnel concluía que “[a]inda que esta experiência não tenha sido feita até agora, eu não tenho dúvidas de que ela confirmaria esta consequência, que se deduz igualmente do sistema da emissão e daquele das ondulações” (FRESNEL, 1868, pp. 636). O experimento de pensamento é ainda qualificado como “célebre” por pelo menos um autor (JANSSEN, 2001, p. 5).

202 As lentes do telescópio foram corrigidas para o efeito da presença da água sobre a correção das aberrações esféricas e cromáticas do telescópio (AIRY, 1871, p. 36).

203 Estrela que a propósito havia participado da própria descoberta do efeito de aberração estelar, por Bradley.

Como Airy também utilizou um telescópio “de trânsito”, a escolha era acertada dada a latitude de Greenwich.

204 É curioso que no debate o experimento de Arago não tenha sido mencionado, pois claramente o experimento de Airy lhe era equivalente.

205 Esta dedução é adaptada da apresentada por Kurt Pedersen (PEDERSEN, 2000, pp. 519-520). A argumentação original de Fresnel é apresentada no capítulo 6 no contexto do experimento de Fizeau.

206 Lembre-se de que devido ao efeito da aberração há um ângulo entre a posição *real* da estrela e a *aparente*. Para efeito de simplificação dos cálculos é conveniente considerar uma estrela cuja luz incida perpendicularmente à direção do movimento do telescópio (movimento orbital da Terra).

$$\overline{ER} = \overline{DR} \cos i = \overline{BR} \sin r \quad , \text{ ou seja, } \overline{DR} = \frac{\overline{BR} \sin r}{\cos i} \quad .$$

De B a R, propagando-se pela água a uma velocidade u , a luz gastaria um tempo t , de modo que

$$\overline{BR} = u.t$$

e, portanto,

$$\overline{DR} = \frac{u.t \sin r}{\cos i} \quad .$$

Pela teoria ondulatória da luz, a lei de Snell pode ser relacionada às velocidades de propagação da luz nos meios envolvidos na refração da forma

$$n = \frac{c}{u} = \frac{\sin i}{\sin r} \quad \rightarrow \quad u = c \frac{\sin r}{\sin i} \quad ,$$

o que, substituindo na expressão anterior, gera

$$\overline{DR} = \frac{c.t \sin^2 r}{\sin i \cos i}$$

Caso o telescópio não estivesse preenchido de água, a luz seguiria o caminho BY, encontrando o ponto D que teria se movido para a posição Y no mesmo tempo. Portanto

$$\overline{DY} = v.t \quad .$$

Mas por causa da refração, para que o resultado experimental de que o ângulo de aberração *não muda* seja satisfeito, a luz precisa ser arrastada pela água apenas da distância

$$\overline{DY} - \overline{DR} = v.t - \frac{c.t \sin^2 r}{\sin i \cos i} = v.t \left(1 - \frac{c}{v} \frac{\sin^2 r}{\sin^2 i \cos i} \right) \quad .$$

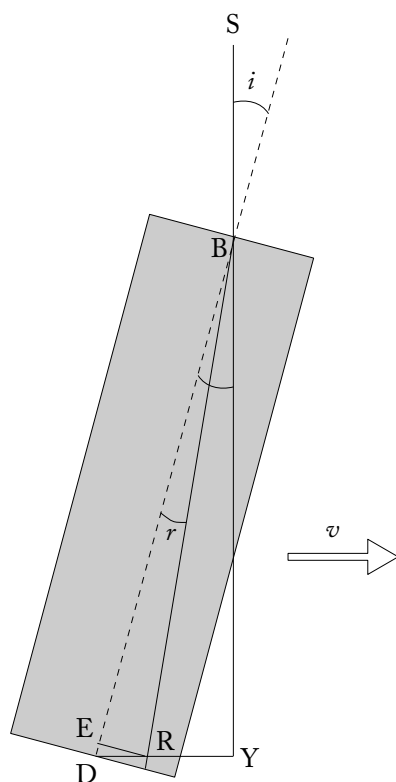


Fig. 5.3 – Um telescópio preenchido com água recebe um raio de luz de uma estrela S. A refração da luz pela água deveria alterar a posição de observação para R, porém o mesmo não ocorre devido à compensação causada pelo arrasto do éter pela água em movimento (PEDERSEN, 2000, p. 519-520).

Ora, mas pela próprias definições de ângulo de aberração e índice de refração:

$$\frac{\sin i}{\cos i} = \tan i = \frac{v}{c} \quad \text{e} \quad \frac{\sin^2 r}{\sin^2 i} = \frac{1}{n^2},$$

de modo que

$$\frac{\overline{DY} - \overline{DR}}{t} = v \left(1 - \frac{1}{n^2} \right).$$

Ou seja, para que o ângulo de aberração de uma estrela vista por um telescópio preenchido de água não mude é preciso que a água arraste a luz em seu movimento com uma

velocidade igual à velocidade da água multiplicada pelo coeficiente de Fresnel²⁰⁷,

$$\left(1 - \frac{1}{n^2}\right).$$

Uma construção semelhante poderia ser feita para o experimento do prisma de Arago, também a partir do referencial de um observador em repouso em relação ao prisma, e certamente para qualquer outro experimento em que se tentasse evidenciar o movimento da Terra em relação ao éter através do fenômeno da refração²⁰⁸. Em suma, “o coeficiente de Fresnel garante que a refração da luz num corpo em movimento siga a lei de Snel *do ponto de vista de um observador que se move junto com o corpo*”²⁰⁹ (JANSSEN, 2001, p. 4).

A introdução do índice de refração na relação matemática que caracterizava a composição de velocidades da luz no interior da matéria trazia ainda um problema que não passou despercebido a Wilhelm Veltmann (1832-1902). No início dos anos 1870s ele chamaria a atenção para o fato de que a dispersão cromática obrigava considerar que o índice de refração era uma função da frequência da luz incidente. Isso significava na prática que ao propagar luz branca num material transparente em movimento em relação ao éter do espaço livre, cada cor componente do feixe obrigaria a uma quantidade diferente de éter sendo arrastada junto com o corpo em movimento (VELTMANN, 1873 *apud* JANSSEN, 2001, p. 6). Embora matematicamente o coeficiente de Fresnel continuasse a prover uma maneira

207 Esta, é claro, é uma interpretação semelhante àquela proposta por Stokes.

208 É claro que, embora tenhamos nos referido ao experimento do telescópio preenchido de água na dedução do coeficiente de Fresnel, o resultado foi obtido de forma geral em função do índice de refração n e portanto seria válido para qualquer material.

209 No capítulo 6 veremos um experimento em que justamente o material refringente *não* está em repouso em relação ao observador!

consistente de dar conta dos resultados experimentais envolvendo a óptica dos corpos em movimento, ficava progressivamente mais difícil atribuir a ele um significado físico aceitável.

Como colocou o historiador da ciência Michel Janssen,

O trabalho de Veltmann ilustra uma tendência importante na óptica dos corpos em movimento. Junto com uma crença crescente na adequação empírica do coeficiente de Fresnel, havia um crescente ceticismo a respeito da interpretação literal do efeito em termos de um arrasto real do éter. A atitude dominante em relação ao coeficiente de Fresnel na segunda metade do século aparentemente era a de que, qualquer que fosse o mecanismo físico por trás dele, o coeficiente tinha que ser parte de qualquer teoria óptica baseada na hipótese de um éter imóvel se uma tal teoria quisesse explicar por que (pelo menos em primeira ordem em u/c) experimentos ópticos terrestres parecem obedecer às mesmas leis que seriam satisfeitas se a Terra estivesse em repouso em relação ao éter. No curso do século XIX mostrou-se que o coeficiente de Fresnel garante que isso seja verdadeiro não apenas para fenômenos de refração, mas também para todos os fenômenos de reflexão, difração e interferência (JANSSEN, 2001, p. 6)[v11].

5.4 Stokes e o Éter Hidrodinâmico

Pelos idos de 1845 a teoria ondulatória da luz já estava bem estabelecida havia pelo menos uma década, e no entanto a explicação dada para o fenômeno da aberração da luz das estrelas neste contexto implicava, como visto, que o éter era capaz de atravessar desimpedido as paredes dos tubos dos telescópios. Esta conjectura levaria o físico e matemático irlandês George Gabriel Stokes (1819-1903) à sutil consideração de que como

[a] teoria ondulatória da luz (...) explica de forma tão simples e bonita os mais complicados fenômenos, (...) somos naturalmente levados a considerar a

aberração como um fenômeno não explicado por ela, porém não incompatível com ela (STOKES, 1845, p. 9)[v12].

Stokes tinha então em torno de 26 anos e vinha de uma formação de pesquisa em hidrodinâmica, área em que daria grandes contribuições²¹⁰, e portanto pôde trazer uma abordagem inteiramente nova à questão²¹¹. Suas intervenções não podem ser separadas das questões a respeito do tema introduzidas por James Challis (1803-1882), professor plumiano e diretor do observatório de Cambridge, e, o que é mais relevante, na comunidade acadêmica britânica da época uma autoridade já bastante reconhecida em hidrodinâmica.

A despeito dos fenômenos ópticos que praticamente obrigavam o éter a obedecer equações correspondentes a um meio sólido, “Challis imaginava o éter como um fluido e eventualmente tentou explicar virtualmente todos os fenômenos físicos aplicando suas teorias hidrodinâmicas ao éter” (WILSON, 1972, p. 60). Foi particularmente contra a abordagem de Challis que Stokes viria a desenvolver seu modelo de éter²¹².

Aparentemente Stokes foi inspirado por um resultado experimental, relativamente surpreendente, envolvendo o arrasto provocado pela oscilação de um pêndulo num fluido, de

210 De fato, conforme afirmaria Larmor já na primeira década do século XX, as contribuições de Stokes para a hidrodinâmica levaram a disciplina de um estágio preliminar a uma teoria experimental e matemática ordenada (WILSON, 1972, p. 61).

211 Ou quase. Um efeito de arrasto já havia sido aventado, embora não desenvolvido em suas últimas consequências, por Augustin-Louis Cauchy (1789-1857) em 1831 (JANSSEN, 2001, p. 3). Também o matemático e físico inglês George Green (1793-1841) teria sugerido que um fluido desta natureza seria instável.

212 No entanto, Challis e Stokes concordariam em alguns aspectos. A interpretação do que consistiria o efeito da aberração da luz estelar, no entanto, era divergente. Numa abordagem original, Challis imaginava que o efeito decorria não do desvio na posição aparente da estrela, porém do desvio da posição aparente da mira de fio do próprio telescópio. Challis buscou desenvolver uma teoria independente da natureza do éter (WILSON, 1972, p. 67).

que teria tomado conhecimento em 1842 ou 1843:

Quando um pêndulo está em movimento, supor-se-ia naturalmente que o ar próximo ao corpo em movimento deslizaria através da superfície, ou a superfície através dele, o que dá no mesmo se apenas o movimento relativo for considerado, com uma velocidade comparável com a própria velocidade absoluta da superfície. Porém ao prender um pedaço de uma folha de ouro à parte de baixo de um pêndulo, de modo a fazê-lo projetar-se em uma direção perpendicular à superfície, e então colocando o pêndulo em movimento, Sir James South descobriu que a folha de ouro mantinha sua posição perpendicular exatamente como se o pêndulo estivesse estado em repouso; e não foi senão quando a folha de ouro carregada pelo pêndulo havia sido removida para alguma distância da superfície que ela começou a ficar para trás. Este experimento mostra claramente a existência de uma ação tangencial entre o pêndulo e o ar, e entre uma camada de ar e a seguinte (STOKES, 1856, p. 12 *apud* WILSON, 1972, pp. 61-62)[v13].

Stokes passou a considerar, portanto, que um corpo ao mover-se no interior de um fluido arrastava consigo o fluido próximo à superfície do corpo. Por uma questão de continuidade, este arrasto deveria diminuir gradativamente à medida em que se considerava pontos mais e mais afastados da superfície do corpo, até que a uma certa distância o efeito do movimento do corpo sobre o fluido seria desprezível. Esta mesma ideia seria aplicada por Stokes para a relação entre o éter e o movimento da Terra.

Além disso, a partir de 1848 Stokes dedicou-se a estudar as interações entre fluidos e sólidos, e, ao mesmo tempo, a identificar uma gradação contínua e progressiva entre estes dois estados da matéria, resolvendo as aparentes contradições nas características físicas do éter através da ideia de que ele se comportaria como *silly-putty* (SCHAFFNER, 1972, pp. 66-67 *apud* JANSSEN, 2001, p. 3), uma espécie de massa mole feita com uma mistura de água e farinha fina²¹³ para as crianças brincarem. Colocada sobre a palma da mão, a massa escorre

213 Amido de milho ou fécula de batata, por exemplo, na proporção 2:1. Uma massinha semelhante é vendida ainda hoje como brinquedo infantil, com o mesmo nome, numa fórmula comercial de maior durabilidade mas

como um fluido, porém quando comprimida rapidamente comporta-se como um sólido, podendo ser “quebrada” ou moldada numa forma esférica que “quica” quando lançada contra uma parede ou contra o chão, por exemplo. Para Stokes o éter se comportava como um fluido quando submetido às delicadas pressões impostas pelo suave movimento dos planetas, porém quando obrigado às oscilações rapidíssimas que constituíam a luz, o éter respondia como um sólido, mais ou menos como uma versão radicalizada de *silly-putty*.

Com isso Stokes criou um modelo capaz de não apenas dar conta das propriedades físicas contraditórias do éter, mas também de explicar o efeito da aberração da luz estelar através de um mecanismo de arrasto hidrodinâmico muito mais ortodoxo e fisicamente aceitável que o éter “fantasmagórico” – diáfano e intangível – que atravessava imune todo o volume da Terra. A explicação se baseava claramente no experimento do pêndulo com a folha de ouro:

Devo supor que a Terra e os planetas carregam uma porção do éter consigo de modo que o éter perto de suas superfícies está em repouso em relação a estas superfícies, enquanto sua velocidade muda à medida que nos distanciamos da superfície, até que, a uma distância não muito grande, está em repouso no espaço (STOKES, 1845, pp. 9-10)[v14].

O éter, ao ter sua velocidade variada nas proximidades da Terra, modificaria a *orientação das frentes de onda* que chegavam à Terra em uma direção formando um ângulo com a direção do movimento orbital da Terra. Como a direção na qual um objeto celeste é visto da Terra corresponde por definição à direção normal às frentes de onda que dele recebemos, a pequena variação angular que corresponde ao efeito da aberração estaria identificada com esta pequena inclinação nas frentes de onda em função do arrasto do éter pela Terra (ver figuras

que exhibe exatamente os mesmos efeitos.

5.4 e 5.5 a seguir).

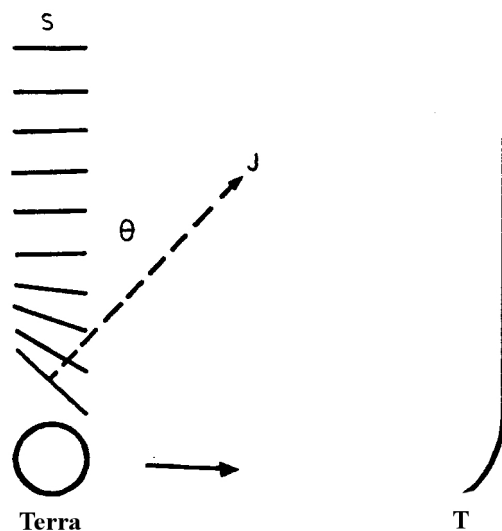


Fig. 5.4 – Explicação de Stokes para o efeito de aberração da luz estelar a partir da progressiva inclinação das frentes de onda causadas pelo arrasto do éter pela Terra. As frentes de onda luminosas recebidas na Terra oriundas de S parecerão provenientes de J. O ângulo θ é o ângulo de aberração. À direita, o que corresponderia à trajetória do “raio” luminoso (WILSON, 1972, p. 65)²¹⁴.

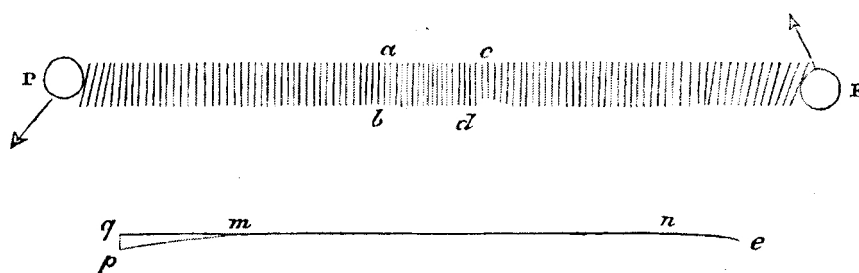


Fig. 5.5 – Ilustração original de Stokes para o efeito de aberração da luz causado pelo arrasto do éter pela Terra. Curiosamente, Stokes chamava a atenção para o fato de que, visto da Terra (E), um planeta (P) parecerá estar numa posição desviada de sua posição verdadeira, porém não apenas por causa do arrasto do éter pela Terra, mas também pelo arrasto do éter pelo próprio planeta, de modo que a trajetória do “raio” luminoso seria a descrita na parte de baixo da figura (STOKES, 1845, p. 13).

Além disso, o modelo de éter “silly-putty” de Stokes resolvia um outro problema fundamental: com o éter completamente arrastado e sempre em repouso em relação a um observador na superfície da Terra, o experimento de Arago de 1810 sobre a refração da luz

²¹⁴ Wilson cita como fonte da ilustração o artigo original de Stokes de 1845 (STOKES, 1845), porém a figura original é bastante diferente (figura 5.5).

estelar por um prisma ficava automaticamente explicado, sem a necessidade da introdução da (esquisita, fisicamente) suposição do arrasto parcial proposta por Fresnel²¹⁵.

De toda maneira, a interpretação de Stokes admitidamente não era capaz de explicar nenhuma observação ou resultado experimental que o modelo de Fresnel não explicasse. Mostrando *fairplay*, Stokes chegou mesmo a demonstrar que o resultado de um experimento relatado por Jacques Babinet (1794-1872) em 1839 era, contrariamente ao que acreditava o seu autor, tão bem explicado pelo modelo do arrasto parcial de Fresnel quanto pelo do éter arrastado pela Terra²¹⁶. Isto levou Stokes a lamentar não haver nenhuma maneira de “colocar as duas teorias sob o jugo de algum experimento decisivo” (WILSON, 1972, p. 71).

Não seria preciso esperar muito. Menos de cinco anos depois da proposição do modelo de Stokes, um inventivo jovem físico francês chamado Hippolyte Fizeau (1819-1896), que dois anos antes havia ganhado notoriedade por realizar a primeira medição terrestre da velocidade da luz, faria justamente isso.

215 Para funcionar matematicamente, no entanto, a teoria de Stokes implicava que o éter deveria ser um fluido “irrotacional”, isto é, em que a quantidade $v_x dx + v_y dy + v_z dz$ era uma diferencial exata.

216 O experimento de Babinet merece um maior detalhamento, não apenas porque seu resultado teve que ser explicado nas discussões sobre a natureza do éter no meio do século XIX, mas também por três outros motivos importantes. Primeiramente, ele é um experimento interferométrico. Em segundo lugar, ele é talvez o mais precoce experimento interferométrico relacionado à óptica dos corpos em movimento. Finalmente, ele seria reencenado pelo astrônomo holandês Martinus Hoek (1834-1873) em Utrecht em 1868, que aparentemente não tinha conhecimento do experimento de Babinet, e a quem efetivamente a maior parte dos poucos autores que hoje em dia se referem ao experimento creditam sua autoria (algo semelhante ocorre com o experimento do prisma de Arago de 1810, “substituído” nos relatos modernos pelo experimento (equivalente) do telescópio preenchido com água realizado por Airy em 1871). No entanto, preferimos deixar a análise do “experimento de Babinet-Hoek” para o próximo capítulo, onde ele se insere numa discussão mais abrangente.

6 O Arrasto no Laboratório

*“Experiments have lives of their own”*²¹⁷

Ian Hacking

6.1 O Experimento de Fizeau de 1851

A história dos experimentos destinados a pôr em evidência a relação do éter com a matéria comum exhibe uma longa lista de resultados nulos ou desacreditados e cientistas frustrados. A exceção à regra é o experimento de Fizeau do arrasto do éter de 1851²¹⁸.

A par dos trabalhos de Fresnel, e, mais proximamente a ele, dos de Stokes, Doppler e Challis, entre outros, Fizeau percebeu que as hipóteses sobre as propriedades do éter luminífero até então propostas podiam ser agrupadas em três tipos, segundo a relação do éter com a matéria ordinária no interior de corpos transparentes. Nestas hipóteses ou bem (1) o éter estaria como que fixo às moléculas dos corpos, e compartilharia com eles de seu movimento; ou (2) o éter seria livre e independente, não sendo afetado pelo movimento das moléculas dos corpos; ou, finalmente, (3) uma parte do éter seria livre e uma parte como que fixa às moléculas dos corpos, esta a hipótese avançada por Fresnel em sua análise do problema da aberração estelar e de um experimento devido a Arago, e que deu origem ao coeficiente de

217 “Experimentos têm vidas próprias” (HACKING, 1983, *apud* PATTON, 2011, p. 209, tradução nossa).

218 De fato, até o final do século XIX “o *único* trabalho de qualquer consequência a respeito da influência, sobre a velocidade da luz, do movimento do meio por ela atravessado, é o experimento de Fizeau” (MICHELSON e MORLEY, 1886, p. 377, grifo nosso).

arrasto de Fresnel. Para Fizeau as hipóteses surgiam necessariamente da “ausência de noções certas” sobre as propriedades do éter luminífero e de sua relação com a matéria ponderável. Embora estivesse inclinado a admitir que uma ou outra hipótese fosse mais ou menos provável, Fizeau admitia que não havia “nenhuma que possa ser considerada demonstrada” (FIZEAU, 1851, p. 349; FIZEAU, 1859, p. 385)²¹⁹.

Considerando a situação em que um corpo transparente encontrava-se em movimento (em relação à fonte de luz), cada uma das hipóteses anteriores fazia asserções distintas para a velocidade com que a luz se propagava no interior do material. No primeiro caso, uma vez que o movimento do corpo era compartilhado com o éter em seu interior, a luz se propagaria com uma velocidade igual à da velocidade de propagação da luz no éter em repouso mais ou menos a velocidade do corpo, dependendo de se a luz se propagava no corpo no mesmo sentido ou no sentido oposto ao do movimento do corpo no espaço. No segundo caso, não sendo afetado pelo movimento do corpo, o éter propagaria a onda luminosa com uma velocidade inalterada, isto é, com a mesma velocidade que a luz exibia naquele meio em repouso. Finalmente, no terceiro caso, se uma parte do éter era arrastada pelo movimento do corpo, a velocidade da luz seria aumentada (ou diminuída, dependendo do sentido de propagação) de uma fração da velocidade do corpo no espaço.

Utilizando métodos interferométricos, Fizeau foi capaz de propor um experimento para determinar a variação do índice de refração, e, por conseguinte, da velocidade de

219 Oito anos depois, Fizeau publicou nos *Annales de Chimie et Physique* uma versão estendida de sua comunicação de 1851 para a *Académie des Sciences* (nos anos intervenientes Fizeau esteve às voltas com sérios problemas pessoais), no qual procedeu a um maior detalhamento dos cálculos envolvidos na análise teórica, dos procedimentos experimentais e da análise dos dados. Este fato já levou mais de um autor a referir-se ao experimento tendo sido realizado em 1859 (por exemplo, HOUSTON, 1919, p. 214).

propagação da luz, de um meio transparente em movimento em relação ao observador²²⁰.

Muito embora reconhecesse que em geral os movimentos dos corpos se davam a velocidades muito pequenas em comparação com a velocidade com que a luz se propagava mesmo no interior de materiais densos, Fizeau afirmava ser possível “submeter a uma prova decisiva” dois meios – o ar e a água – que, “pela mobilidade de suas partes”, podiam ser facilmente colocados em velocidades suficientemente grandes (FIZEAU, 1859, p. 387).

O projeto de Fizeau para concretizar esta promessa se baseava no duplo tubo desenvolvido originalmente por Arago e Fresnel²²¹, a quem ele dava o crédito, que era suficientemente preciso para discernir diferenças sutis de índices de refração (por exemplo entre o ar seco e o ar úmido).

Fizeau realizou experimentos tanto com o ar quanto com a água. No caso do ar os resultados foram inconclusivos, devido à pequena diferença entre os índices de refração do ar e do vácuo, mas no caso da água os resultados de Fizeau eram suficientemente conclusivos.

Na montagem com a água (figura 6.1 a seguir), Fizeau fez a luz solar colimada pela luneta L percorrer dois tubos paralelos preenchidos completamente com água. Os tubos estavam conectados de tal forma que a água circulava em ambos, porém em sentidos opostos (indicados pelas setas na figura). Os feixes oriundos das fendas O_1 e O_2 perfaziam o mesmo percurso, porém em sentidos contrários: o feixe vindo da fenda O_1 atravessava o tubo superior

220 O historiador da ciência alemão Jan Frercks faz ver que o experimento de Fizeau de 1851 fazia parte de uma série de projetos experimentais desenvolvidos por Fizeau ao longo do período 1847-1852 com o objetivo de detectar através de um resultado experimental *positivo* o arrasto do éter (FRERCKS, 2001). Segundo Frercks, para Fizeau um experimento era digno de publicação na medida em que apresentava um resultado positivo (não-nulo), e é neste contexto que o experimento do arrasto do éter pela água deve ser compreendido (FRERCKS, 2004; FRERCKS, 2005).

221 Ver capítulo 4.

A_1 – com a corrente de água a favor – e a lente da luneta L' , sendo refletido pelo espelho m no foco. Ao reatruvessar a lente, o feixe era então introduzido no tubo inferior A_2 – novamente a favor do fluxo de água. O contrário se dava com o feixe oriundo da fenda O_2 , que ao longo de todo seu trajeto estava contra o fluxo de água.



Fig. 6.1 – Diagrama do experimento de Fizeau do arrasto do éter de 1851 (MASCART, 1893).

Com este dispositivo engenhoso, Fizeau evitava que diferenças de pressão ou temperatura entre os dois tubos afetassem a formação das franjas, uma vez que agora estas diferenças agiam igualmente em ambas as frentes de onda.

A luneta L recombinava os feixes em S' , ampliando a intensidade das franjas, que eram observadas através de uma ocular que dispunha de uma retícula graduada para permitir a medição de eventuais deslocamentos das franjas.

A luz atravessava as duas fendas de forma a produzir na recombinação da saída uma figura de interferência típica, em que as franjas claras correspondiam às posições nas quais as diferenças de percurso entre as frentes de onda que percorreram os tubos num e noutro sentido eram de números inteiros de comprimentos de onda – interferência construtiva –, e as franjas escuras correspondiam às regiões onde estas diferenças eram de múltiplos ímpares de meio comprimento de onda – interferência destrutiva.

A separação entre as franjas de interferência está relacionada à separação entre as fendas, de modo que quanto mais afastadas as fendas uma da outra mais estreitas ficam as franjas projetadas. Como os tubos implicavam necessariamente um espaço entre eles da ordem

de centímetros, Fizeau foi obrigado a lançar mão de um artifício para que as fendas pudessem estar separadas de uma distância uma da outra muito menor que os tubos propriamente. Embora tenha pensado em utilizar um sistema de quatro espelhos para diminuir a separação entre os feixes de luz após passarem pelas fendas²²², Fizeau acabou optando por utilizar duas lâminas de vidro de faces paralelas (placas compensadoras) relativamente espessas, inclinadas em relação aos feixes incidentes de modo a refratá-los em uma direção paralela à dos feixes originais, porém mais espaçadas pelo deslocamento lateral sofrido pelo feixe durante a refração na lâmina (figura 6.2 a seguir).

A água era colocada em movimento por um sistema de ar comprimido que transferia o volume de água rapidamente de um reservatório para outro através dos tubos. Um sistema de válvulas permitia reverter o fluxo facilmente, apenas fechando e abrindo os registros no cilindro de ar comprimido (ver figura 6.3 mais à frente). Este sistema no entanto não permitia uma regulagem fina do valor da velocidade (que podia entretanto ser medido previamente pela vazão), e, o que era mais problemático, obrigava o observador a fazer uma leitura rápida do deslocamento das franjas, pois o pico do fluxo não durava senão alguns poucos segundos.

Como as posições das franjas dependiam fundamentalmente da defasagem entre uma frente de onda e outra ao se encontrarem naquela posição específica, é fácil compreender como a velocidade do éter no interior da água afetaria a posição das franjas.

222 Um sistema idêntico seria imaginado por Michelson para resolver um problema semelhante no projeto de medição do diâmetro de estrelas (*cf.* capítulo 8).

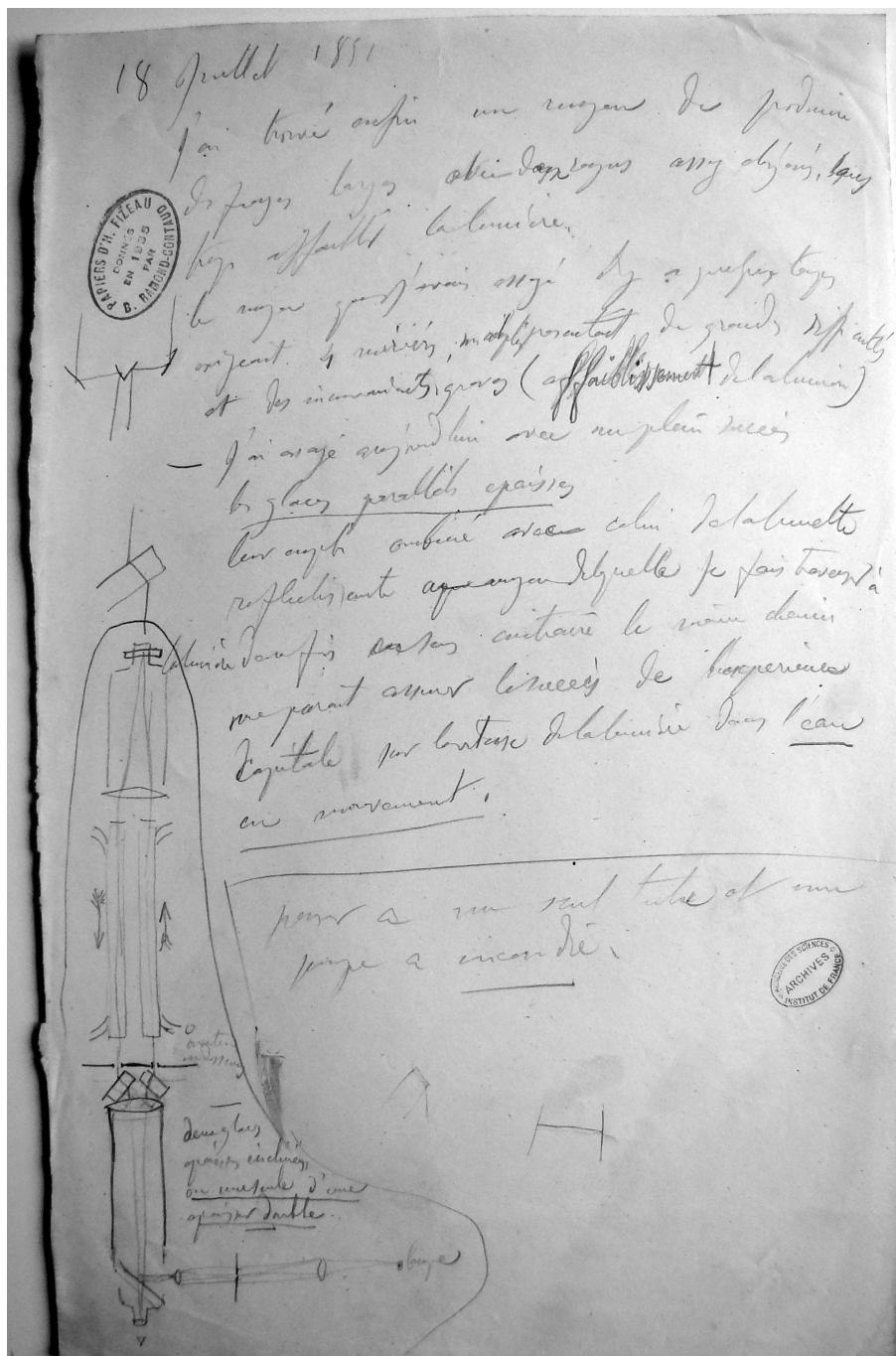


Fig. 6.2 – Página do caderno de laboratório de Fizeau relativa a 18 de julho de 1851 com o rascunho da montagem óptica do experimento do arrasto do éter. Note-se o estudo (no alto) das possibilidades de redução da separação efetiva das fendas por reflexão e por refração, esta última sendo preferida por Fizeau. (ARCHIVES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES).

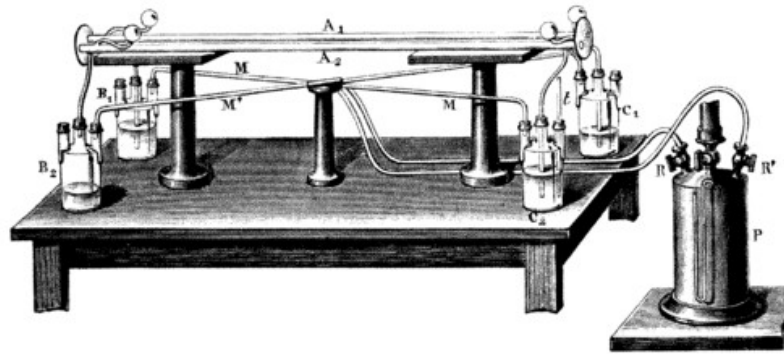


Fig. 6.3 – Ilustração dos detalhes do sistema hidráulico do experimento de Fizeau 1851. A abertura dos registros R e R' do reservatório de ar comprimido P empurrava violentamente o volume de água contido nos reservatórios nas extremidades dos tubos, permitindo um fluxo de água em grande velocidade, ainda que efêmero (MASCART, 1893).

Caso de fato o éter fosse arrastado junto com a água em seu movimento, as franjas deveriam se deslocar (em relação à sua posição quando a água estava em repouso) em virtude do fato de que agora o feixe que percorria o trajeto no interior da água no mesmo sentido do movimento da água (e, neste caso, do éter) levava menos tempo para alcançar a saída S' do que a frente de onda que havia saído ao mesmo tempo pela outra fenda e percorrido o trajeto no sentido contrário ao do fluxo de água (e éter). Mais importante, era possível calcular este deslocamento a partir da medição da velocidade da água nos tubos.

Caso o éter não fosse afetado pelo movimento da água, não deveria haver qualquer deslocamento na posição das franjas.

Finalmente, caso o éter fosse parcialmente arrastado, o deslocamento das franjas deveria acontecer, mas não seria tão grande quanto no primeiro caso. Mais importante, a lei do arrasto parcial de Fresnel também permitia calcular de quanto seria este deslocamento.

Realizando o experimento com o fluxo de água a uma velocidade de 7,059 m/s, estimada pela vazão do tubo, Fizeau encontrou um deslocamento das franjas na média igual a 0,23016 da largura da franja, em relação à água em repouso. Para maximizar o efeito, Fizeau

comparou os deslocamentos das franjas quando a água fluiu num e noutra sentido, o que evidentemente dobrava o efeito: entre uma e outra situação o deslocamento foi, portanto, de 0,46 da largura de uma franja, isto é, praticamente metade, um valor perfeitamente mensurável.

Os detalhes da análise de Fizeau sobre a incerteza de medição e os procedimentos experimentais são uma leitura adorável. Em última instância a incerteza era determinada, segundo Fizeau, pelo sistema de injeção de ar no reservatório de água, que a empurrava através dos tubos com uma velocidade aproximadamente constante durante um período muito curto, ao longo do qual o observador precisava fazer a medição do deslocamento das franjas. Ele admitia que a montagem poderia ser modificada de forma a comportar um sistema de fluxo contínuo de água, mas tal modificação retardaria o trabalho experimental, estendendo-o “até uma época do ano em que as experiências que exigem o emprego da luz solar tornam-se quase inexecutáveis”. Ainda assim, os desvios em relação à média dos valores medidos por Fizeau eram bastante pequenos em relação ao valor medido, “o maior deles não passando de um treze avos de franja” (FIZEAU, 1859, p. 393).

O deslocamento (não-nulo) encontrado por Fizeau excluía automaticamente a hipótese de um éter estacionário. Para compreender como o valor encontrado decidia entre as duas outras hipóteses (arrasto parcial e movimento solidário), Fizeau calculou o valor do deslocamento esperado em cada caso.

Primeiramente ele mostrou o que deveria se passar caso o movimento do éter fosse solidário ao da água. Suponhamos que a luz percorresse uma distância total E dentro da água. Caso esta distância fosse percorrida no vácuo (ou no ar, onde, para todos os efeitos, a luz se

propaga com aproximadamente a mesma velocidade v que no vácuo), ela poderia ser expressa por

$$E = v \cdot \Delta t$$

onde Δt representava o intervalo de tempo gasto pela luz para percorrer a distância E .

Na água em repouso, no entanto, o intervalo de tempo gasto no mesmo percurso E era dilatado em função da velocidade v' na água ser menor do que v :

$$E = v' \cdot \Delta t' \rightarrow \Delta t' = \frac{E}{v'}$$

Em se fazendo a água se mover com uma velocidade u e considerando-se que o éter participasse deste movimento, os tempos de percurso seriam diferentes no caso em que a luz percorre a água no mesmo sentido do movimento da água e no caso em que a luz percorre a água no sentido contrário ao do movimento da água, pois agora seria preciso considerar como a velocidade da luz na água em movimento a composição de velocidades da luz em relação ao éter e do éter em relação ao observador. Isto resultaria em dois intervalos de tempo distintos para cada feixe.

No caso do feixe que partia da fenda A e se movia contrariamente ao fluxo de água, o intervalo de tempo seria

$$\Delta t'_A = \frac{E}{v' - u} ,$$

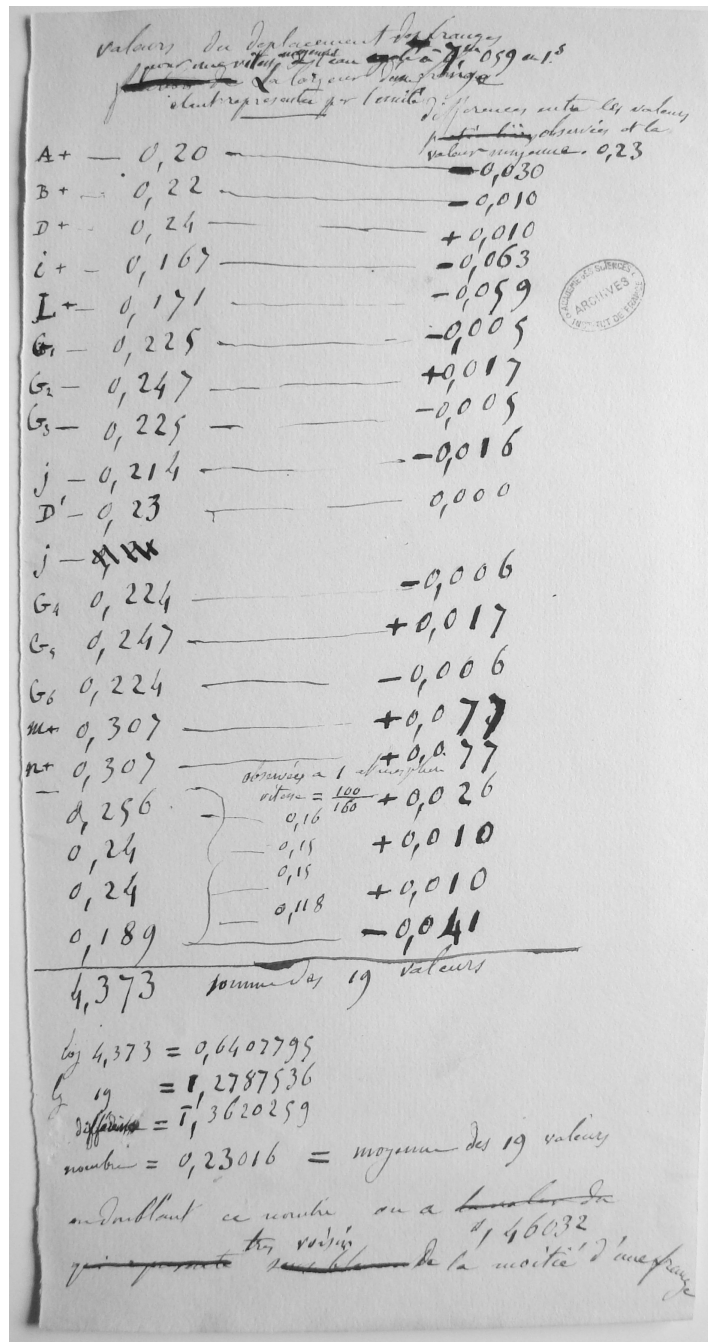


Fig. 6.4 – Anotações do caderno de laboratório de Fizeau com a série de medidas dos deslocamentos de franjas para a velocidade de 7,059 m/s para o fluxo de água (ARCHIVES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES).

enquanto no caso do feixe que partia da fenda B e se movia no mesmo sentido do fluxo de água o intervalo de tempo seria dado por

$$\Delta t'_B = \frac{E}{v' + u}$$

A diferença de percurso Δ entre um e outro feixe poderia ser calculada, portanto, a partir do percurso equivalente no vácuo e das diferenças nos intervalos de tempo devidas ao movimento da água:

$$\Delta = v \cdot \Delta t'_A - v \cdot \Delta t'_B = E \left(\frac{v}{v' - u} - \frac{v}{v' + u} \right)$$

ou

$$\Delta = 2 E \frac{u}{v} \left(\frac{v^2}{v'^2 - u^2} \right)$$

Como a velocidade u do fluxo da água era muito menor do que a velocidade v da luz no vácuo (na razão 1 : 33.000.000), Fizeau desprezou o termo em segunda ordem em (u/v) , aproximando a diferença de percurso para

$$\Delta = 2 E \frac{u}{v} \frac{v^2}{v'^2} = 2 E \frac{u}{v} m^2$$

m sendo o índice de refração da água ($m = 1,33$).

Cada feixe atravessava uma distância E igual a duas vezes o comprimento dos tubos ($L = 1,4875$ m), portanto, ao fazer o cálculo Fizeau obteve $\Delta = 0,0002418$ mm. Dividindo este número pelo comprimento de onda da luz utilizada (raia E do espectro solar $\rightarrow \lambda = 0,000526$ mm), Fizeau encontrou o deslocamento esperado das franjas na hipótese do éter se deslocar solidário à água:

$$\frac{\Delta}{\lambda} = 0,4597$$

Ora, mas os resultados encontrados experimentalmente (0,23) equivaliam a apenas metade deste valor. Logo, a hipótese do éter solidário à matéria ordinária também estava em desacordo com os resultados experimentais.

Restava comparar os resultados experimentais com as previsões feitas pela hipótese do arrasto parcial de Fresnel, o que Fizeau também fez didaticamente. Para esta hipótese, admitia-se, de acordo com Fresnel, que a mudança de velocidade da luz ao passar de um meio transparente a outro se dava porque o éter apresentava uma *densidade* diferente em cada um dos meios, sendo mais denso nos corpos materiais que no vácuo. Para dois meios de mesma elasticidade e que não diferiam senão por suas densidades, Fresnel supunha que os quadrados das velocidades de propagação da luz estavam na razão inversa de suas densidades²²³:

$$\frac{D'}{D} = \frac{v^2}{v'^2}$$

Mais que isso, a hipótese de Fresnel admitia que a parte do éter que era arrastada junto à matéria ordinária quando esta era posta em movimento correspondia precisamente ao “excesso” de densidade de éter em relação à densidade do éter no vácuo, isto é, a

$$D' - D = D \cdot \frac{v^2 - v'^2}{v'^2}$$

Colocava-se agora um problema: como determinar a velocidade de propagação das ondas luminosas em um meio constituído de uma parte em movimento e uma parte imóvel? Supondo que o movimento se dava no mesmo sentido da propagação da onda, Fresnel

223 Isso tinha também implicações com relação à divisão da intensidade luminosa quando um feixe sofria refração e reflexão (PRESTON, 1928, p. 101).

considerava a velocidade que adquiria o centro de gravidade do sistema. Sendo u a velocidade da matéria ordinária, a velocidade do centro de gravidade do éter em seu interior seria:

$$u \cdot \frac{D' - D}{D'} = u \cdot \frac{v^2 - v'^2}{v'^2}$$

Isto correspondia, portanto, ao quanto a velocidade de propagação das ondas na água em movimento deveria ser aumentada ou diminuída. Isto é, a diferença de percurso no caso específico do experimento de Fizeau era dada por

$$\Delta = E \left(\frac{v}{v' - u \left(\frac{v^2 - v'^2}{v^2} \right)} - \frac{v}{v' + u \left(\frac{v^2 - v'^2}{v^2} \right)} \right)$$

Procedendo a simplificações semelhantes às feitas nos cálculos anteriores, obtinha-se

$$\Delta = 2 E \frac{u}{v} \left(\frac{v^2 - v'^2}{v'^2 - u^2 \left(\frac{v^2 - v'^2}{v^2} \right)^2} \right)$$

Novamente desprezando os termos em u^2/v^2 ficamos apenas com

$$\Delta = 2 E \frac{u}{v} \left(\frac{v^2 - v'^2}{v'^2} \right) = 2 E \frac{u}{v} \left(\frac{v^2}{v'^2} - 1 \right)$$

$$\Delta = 2 E \frac{u}{v} (m^2 - 1)$$

onde m era o índice de refração absoluto do meio e $(m^2 - 1)$ era o chamado coeficiente de arrasto de Fresnel.

Fazendo as contas para a mesma iluminação, calculava-se $\Delta = 0,00010634$ mm e, portanto,

$$\frac{\Delta}{\lambda} = 0,2022 \quad .$$

Comparando com o resultado experimental de 0,23, Fizeau concluiu que os resultados estavam, portanto, consistentes com a terceira hipótese, corroborando a lei do arrasto parcial de Fresnel. Mesmo a pequena diferença foi atribuída por Fizeau ao efeito de viscosidade da água, pelo qual a velocidade média (medida) do fluxo de água deveria ser um pouco *menor* que a velocidade da água no centro do tubo, longe das paredes, onde efetivamente os feixes luminosos passavam.

Retornando ao experimento com o ar e realizando uma análise semelhante à desenvolvida no caso da água, Fizeau mostrou matematicamente que na hipótese do éter mover-se solidário ao ar, o efeito deveria ser suficientemente grande para causar um deslocamento de franjas mensurável pela montagem, enquanto que na hipótese do arrasto parcial de Fresnel este deslocamento seria da ordem de dois décimos de milésimos da largura da franja, portanto muito pequeno para ser medido pelo sistema.

Apesar da maestria experimental de Fizeau e dos resultados inquestionáveis, ele não foi capaz de defender inequivocamente o modelo de Fresnel para o éter, talvez em virtude da permanência de uma imagem mecânica de éter cujo funcionamento – “mecanismo” – fosse mais claro. Tal dificuldade conceitual se faria presente mesmo nos trabalhos de cientistas muito posteriores, até a primeira metade do século XX. Apesar dos esforços de Fresnel e outros pesquisadores para elaborar uma explicação de por que apenas uma parte do éter era

arrastada, de acordo com o coeficiente de arrasto, não foi possível resolver todos os problemas decorrentes das conjecturas necessárias.

Fizeau propôs originalmente seu experimento como um *experimentum crucis*, destinado a decidir qual hipótese a respeito da natureza do éter e de sua relação com a matéria ordinária estava de acordo com a forma como a luz se propagava em meios materiais transparentes em movimento relativo. O resultado foi inequivocamente favorável à hipótese do arrasto parcial de Fresnel, porém Fizeau admitiu achá-la “tão extraordinária e sob qualquer aspecto tão difícil a admitir (como verdadeira) que seria forçoso exigir outras provas ainda e um exame aprofundado da parte dos geômetras, antes de adotá-la como uma expressão da realidade das coisas” (FIZEAU, 1851, p. 355; FIZEAU, 1859, p. 404). Seria necessária a reformulação conceitual da teoria da relatividade para livrar o pensamento científico da necessidade de um éter luminífero e contextualizar o coeficiente de arrasto de Fresnel como uma implicação da adição de velocidades relativística, que nele já estava implícita, como se verá mais à frente.

6.2 Os Experimentos de Babinet e de Hoek

Os efeitos de aberração estelar e os desdobramentos das discussões sobre os modelos de éter ao longo do século levaram a diversos outros experimentos que buscavam detectar o movimento da Terra em relação ao éter, uma questão fundamental para a óptica de então. Um destes experimentos, hoje pouco lembrado, foi realizado por Babinet em 1839, e depois,

independentemente, por Hoek em 1868.

É pouco claro como exatamente Babinet realizou seu experimento, porém pode-se afirmar com certeza que Babinet buscava encontrar um deslocamento no padrão de franjas produzido por um interferômetro alinhado com a direção leste-oeste quando da introdução de um volume de matéria ordinária transparente nos braços do interferômetro (BABINET, 1839, p. 775). Sua montagem, que bem pode ter inspirado Fizeau²²⁴, deve ter sido algo próximo do representado esquematicamente na figura 6.5 a seguir.

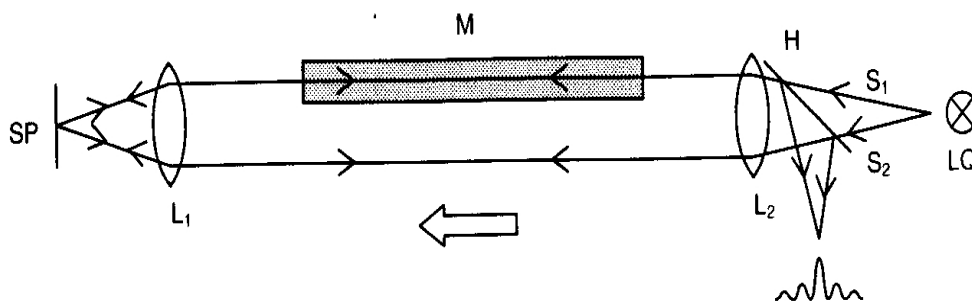


Fig. 6.5 – Diagrama da montagem experimental de Babinet de 1839 conforme compreendida por Frercks (FRERCKS, 2001, p. 86), em que a seta branca representa a direção e o sentido do movimento do éter em relação ao aparelho (ou vice-versa). O retângulo sólido M representa um volume de matéria refringente introduzido num dos braços do interferômetro, enquanto SP é o espelho colocado no foco da lente L_1 .

Assim Babinet descrevia o experimento²²⁵:

Consta-tei que o movimento da Terra não influi em nada na velocidade dos raios que atravessam um meio refringente arrastado pela Terra, ou ao menos que dois raios interferentes que atravessam duas espessuras de vidro, iguais entre si porém percorridas pelos dois raios em sentidos opostos relativamente à direção destes raios, produzem as mesmas franjas, e nas mesmas posições, que se a Terra tivesse estado imóvel²²⁶; o que está em oposição direta com uma das explicações que se tem dado da

224 Fizeau de fato a mencionava em sua comunicação de 1851 (e no artigo estendido de 1859), embora não exatamente como inspiração para a montagem experimental.

225 Este pequeno trecho corresponde praticamente a todo o registro da comunicação de Babinet.

226 A menção de Babinet a *duas* espessuras de vidro, e não uma, atravessadas pelos feixes em sentidos opostos ao

famosa experiência negativa do Sr. Arago²²⁷ (...). Esta será uma nova condição a ser satisfeita por todas as teorias da propagação da luz em meios refringentes. Em minha experiência, segundo as teorias admitidas ou propostas, o deslocamento das franjas teria sido de várias larguras de franja, isto é, de diversos milímetros, enquanto que pela observação ele foi completamente nulo²²⁸ (BABINET, 1839, pp. 775)[vi1].

Babinet não explicava como exatamente ele podia saber como seriam e em que posição se formariam as franjas de interferência no caso da Terra estar em repouso, mas é lícito especular que talvez ele tenha alterado a orientação do interferômetro para fazer variar a componente da velocidade do éter na direção da propagação da luz²²⁹. Além disso, sua conclusão de que as franjas deveriam ter sido deslocadas de vários milímetros leva a crer que ele estava comparando as franjas projetadas pelo interferômetro sem a presença do material refringente com o que pensava que ocorreria com elas quando da introdução do material no interferômetro.

Fizeau buscou explicar o resultado do experimento de Babinet lançando mão da mudança de fase experimentada pela frente de onda ao refletir no espelho em movimento relativo ao éter:

(...) considerando as circunstâncias desta experiência, observei a existência de uma causa de compensação que deve tornar insensível o efeito devido ao movimento. Esta causa reside na reflexão que a luz sofre nesta experiência; de fato, pode-se demonstrar que, uma vez que dois raios têm entre si uma diferença de marcha, esta diferença é alterada pelo efeito da reflexão sobre um espelho em movimento: ora, em calculando separadamente os dois efeitos na experiência do Sr.

do movimento do vidro em relação ao éter, é estranha. A se acreditar na interpretação que Frercks dá à montagem (figura 6.5), e que de fato é a única que parece fazer algum sentido, estas duas espessuras de vidro representam *a mesma* espessura, vista diferentemente por cada feixe em termos de seu movimento relativo.

227 Isto é, com o coeficiente de arrasto de Fresnel.

228 Como vimos no capítulo 5, Stokes mostrou, menos de dez anos depois, que, contrariamente ao que acreditava Babinet, o resultado estava de acordo tanto com o modelo do arrasto parcial de Fresnel quanto com um modelo em que o éter estivesse em repouso (arrasto completo).

229 O que o colocaria realmente próximo de antecipar Michelson.

Babinet, encontra-se que eles têm valores sensivelmente iguais e de sinais contrários²³⁰ (FIZEAU, 1851, pp. 354-355; FIZEAU, 1859, p. 403)[vi2].

No entanto uma outra explicação para o resultado nulo do experimento de Babinet seria dada, inadvertidamente, por Hoek ao reinventar o experimento em 1868. Hoek havia trabalhado como observador na Universidade de Leiden, onde estudara com o astrônomo holandês Frederik Kaiser (1808-1872). Devido a problemas de saúde, Hoek não pôde mais conduzir observações à noite e passou portanto a dedicar-se ao trabalho teórico. Em 1859 Hoek tornou-se professor extraordinário de astronomia em Utrecht, sendo promovido a professor regular em 1867, sucedendo ao também astrônomo holandês Jean Abraham Chrétien Oudemans (1827-1906)²³¹. Com alguns de seus estudantes, Hoek começou a montar um catálogo de “estrelas de comparação”, enquanto ao mesmo tempo estudava tanto o problema da velocidade da luz em corpos sólidos em movimento quanto os “sistemas cometários”, *i. e.*, cometas que adentram o sistema solar em partes diferentes. Hoek faleceu em 1873, antes mesmo de completar 40 anos (KERNKAMP, 1936, p. 128), sem obter um reconhecimento científico significativo²³².

230 A nosso ver, no entanto, o raciocínio de Fizeau poderia sofrer a objeção de que mesmo antes da introdução da espessura de vidro no braço do interferômetro o sistema já estava sujeito ao efeito da alteração de fase devido ao movimento relativo do espelho, e portanto a introdução do vidro no braço do interferômetro deveria mesmo produzir um atraso mensurável e, conseqüentemente, um deslocamento das franjas. De toda maneira, importa perceber que a montagem de Babinet teve alguma influência sobre a escolha de Fizeau de usar um meio refringente em movimento relativo *ao observador no laboratório* para buscar um resultado experimental positivo para o arrasto do éter.

231 Oudemans havia viajado para as colônias holandesas do sudeste asiático (Java, hoje Indonésia), retornando a seu antigo posto após o falecimento precoce de Hoek. Portanto seria mesmo correto, embora um tanto quanto estranho, dizer que Oudemans ao mesmo tempo precedeu e sucedeu a Hoek no cargo.

232 De fato, Hoek não parece ter sido considerado em muito alta conta como pesquisador: “ele sempre cuidou, cometendo sempre alguns erros em seus trabalhos, para que continuasse [um cientista de] segunda categoria” (van der AA, 1933).

À frente do observatório de Utrecht, em 1861 Hoek produziu uma obra de revisão da teoria e instrumentação em torno do efeito de aberração estelar à luz do modelo de Fresnel do éter (HOEK, 1861). Sete anos mais tarde, baseando-se no experimento de Fizeau de 1851 da medição do coeficiente de arrasto de Fresnel, Hoek realizou, aparentemente ignorando o trabalho análogo de Babinet, seu “novo” experimento (HOEK, 1868) no qual, ao orientar o interferômetro na direção leste-oeste, pôde introduzir a velocidade de rotação da Terra no cálculo do coeficiente de arrasto, da mesma maneira que Babinet havia feito vinte e nove anos antes. Na interpretação de Hoek do experimento, uma parte do feixe de luz atravessava uma coluna de água que estava em repouso em relação ao interferômetro (contrariamente ao que ocorria no experimento de Fizeau) no mesmo sentido do movimento da Terra em relação ao éter, era refletido por um espelho e retornava sem atravessar a água, enquanto uma outra parte do feixe fazia o percurso inverso, e portanto atravessando a coluna de água no sentido inverso ao do movimento da Terra (figura 6.6).

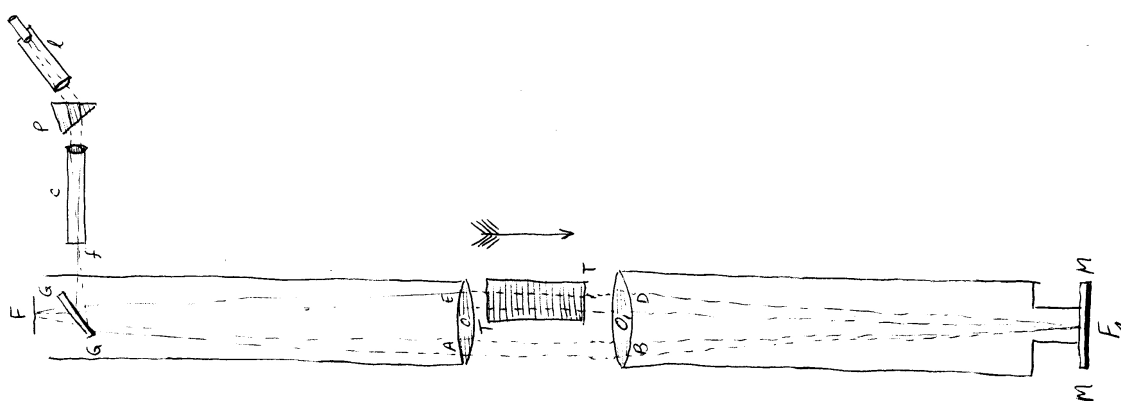


Fig. 6.6 – Esquema da montagem experimental inicial de Hoek de 1868, em que o interferômetro estava orientado na direção oeste-leste (e a seta portanto representa a velocidade da coluna de água em relação ao éter). O retângulo hachurado T representa a célula de água situada num dos braços do interferômetro, e MM um espelho no foco F_1 do telescópio da direita. Cópia à mão feita pelo autor a partir do original de Hoek (HOEK, 1868).

Hoek reportou não ter encontrado qualquer formação de franjas de interferência ao analisar a superposição dos feixes retornados, e buscou mostrar que este seria o resultado esperado de acordo com o modelo de Fresnel do arrasto parcial, e dentro de uma margem ainda mais exata que no trabalho de Fizeau²³³, uma vez que as diferenças de velocidade relativa entre o feixe que perpassava a água a favor de seu movimento (junto com a rotação da Terra) e o feixe que vinha de encontro à água no sentido contrário eram muito maiores que no caso do experimento original de Fizeau com fluxos de água da ordem de no máximo 7 m/s.

É tentador dizer que os trabalhos de Babinet e de Hoek situam-se, metodologicamente, a meio caminho dos experimentos de Michelson relativos à detecção do “vento de éter” (MICHELSON, 1881; MICHELSON e MORLEY, 1887)²³⁴, embora não conste que tenham sido uma influência explícita destes últimos, e é mesmo provável que Michelson desconhecesse aqueles trabalhos especificamente. De todo modo, como atesta a realização prática do *Gedankenexperiment* da refração da luz de uma estrela por um telescópio cheio d'água²³⁵, executada em 1871 por Airy, a questão da óptica dos corpos em movimento seguia a passos largos para se tornar a questão mais fundamental da física do final do século²³⁶.

233 De fato, Hoek fez ao contrário: partindo do resultado experimental nulo, demonstrou que o mesmo implicava um fator de correção equivalente ao coeficiente de arrasto de Fresnel. Hoek concluiu que seu erro relativo era de 1/55, contra 1/7 no caso de Fizeau. Não há qualquer menção à alteração na fase da frente de onda devido à reflexão pelo espelho em movimento relativo ao éter.

234 A literatura em língua inglesa diferencia os dois efeitos chamando o primeiro de “ether drag” e o segundo de “ether drift”.

235 A questão, no entanto, é análoga à do experimento do prisma de Arago de 1810, como já visto no capítulo anterior, e produziu os mesmos resultados nulos.

236 É curioso também como em algumas listas de experimentos relevantes para os estudos da óptica dos corpos em movimento o experimento do prisma de Arago e o experimento de Babinet sejam preteridos ou “substituídos” pelos seus equivalentes realizados por Airy e Hoek, respectivamente. É possível que cada geração de cientistas, ao se deparar com um problema duradouro, sinta a necessidade de arrolar os seus

6.3 A Repetição do Experimento de Fizeau por Michelson e Morley

O próximo experimento de significância histórica realizado com um objetivo correlato foi o experimento realizado por Michelson em 1881 durante seu período de licença da marinha estadunidense para estudos na Europa. Neste experimento um feixe de luz era dividido pelos dois braços de um interferômetro de braços perpendiculares inventado por Michelson especialmente para o experimento²³⁷. Um dos braços era orientado na direção oeste-leste (na direção do movimento da Terra) e o outro conseqüentemente na direção norte-sul. A diferença de caminho óptico experimentada pela luz ao percorrer em um trajeto de ida e volta cada braço do interferômetro deveria ser variada quando o interferômetro fosse girado de 90°, gerando portanto um deslocamento detectável das franjas devido ao efeito do “vento de éter”. Este experimento será apresentado em grande detalhe no capítulo seguinte, porém é importante mencioná-lo neste ponto da história porque seu fracasso em detectar um resultado positivo levou lordes Rayleigh a instar Michelson a aprimorá-lo²³⁸, e a levar a cabo um

próprios experimentos, ou os mais próximos de si, ao argumentar sobre o problema. Alguns pesquisadores no entanto se mostram surpresos com o fato, percebendo que “[d]ada a importância histórica do experimento de Arago como a primeira tentativa de detectar o movimento absoluto da Terra e gatilho para a hipótese de Fresnel, a ausência de referências ao trabalho de Arago em livros-texto é intrigante” (FERRARO e SFORZA, 2004, p. 3, referem-se particularmente a um livro clássico de relatividade, *viz.* “Einstein's Theory of Relativity”, de Max Born). Algo semelhante se pode dizer, em alguns casos, também da reprodução de experimentos, embora nesses casos normalmente o experimento original não seja esquecido – mas precisa ser “corroborado” pela reprodução mais recente. Um caso desta natureza, muito relevante para esta pesquisa, é tema da seção a seguir.

237 O “interferômetro de Michelson”, justamente.

238 Os dois cientistas encontraram-se durante a reunião da Associação Britânica para o Progresso da Ciência de 1884, realizada em Montréal, no Canadá. Rayleigh também pode ter discutido o assunto com Michelson durante uma palestra de lordes Kelvin em Baltimore no mesmo ano.

programa de pesquisa que tinha por objetivo testar as premissas do modelo de éter de Fresnel, que eram: (1) a de que o éter do espaço livre (de matéria ordinária) era imóvel e uniforme; e (2) a de que o éter no interior da matéria ordinária em movimento em relação ao éter do espaço livre era parcialmente arrastado de acordo com o que previa o coeficiente de arrasto. As premissas deveriam ser testadas através da repetição de dois experimentos cujos resultados pareciam dar respostas contraditórias quanto à adequação das hipóteses do modelo de éter de Fresnel: o experimento de Fizeau de 1851 (que parecia confirmar a segunda hipótese), e o experimento de Michelson de 1881 (que parecia negar a primeira hipótese).

Michelson convidou para o projeto seu colega Edward Williams Morley (1838-1923), um professor de química que também lecionava no Western Reserve College, com quem aparentemente Michelson conversara no trem ao retornar para os Estados Unidos da reunião de Montréal, e em 1886 ambos assim justificavam a necessidade de reproduzir o experimento de Fizeau²³⁹:

Em que pese a engenhosidade mostrada nesta notável montagem, que é aparentemente adotada por eliminar tão admiravelmente o deslocamento acidental das franjas por causas externas, parece haver uma dúvida geral com relação aos resultados obtidos, ou ao menos à interpretação destes resultados dada por Fizeau²⁴⁰. Isto, junto com a importância fundamental do trabalho deve ser nossa desculpa para sua repetição (MICHELSON e MORLEY, 1886, pp. 379-380)[vi3].

239 A participação de Morley, rotineiramente minimizada quando se analisa o papel de cada um no experimento feito pela dupla em 1887, foi no entanto fundamental para a reprodução do experimento de Fizeau em 1886. Michelson tivera um colapso nervoso naquele ano, de modo que praticamente toda a complexa montagem foi, portanto, levada a cabo por Morley (LIVINGSTON, 1973).

240 De fato, muitos dos principais nomes da óptica da segunda metade do século XIX parecem ter se manifestado neste sentido: Eduard Ketteler (1836-1900), Wilhelm Veltmann (1832-1902), Mascart, Poincaré e Lorentz são citados em STACHEL, 2005, pp. 6-7.

Apesar da declarada admiração pela montagem de Fizeau, a dupla fez nela alguns aperfeiçoamentos a partir das seguintes objeções (MICHELSON e MORLEY, 1886, p. 380):

1. Na montagem de Fizeau a eliminação de deslocamentos acidentais das franjas pela deformação das janelas de vidro nas extremidades dos tubos, ou por variações assimétricas da densidade da água, por exemplo, dependia da suposição de que os dois feixes haviam percorrido caminhos idênticos, e não meramente equivalentes. Experimentalmente, no entanto, Michelson e Morley verificaram que ao inserir uma placa de vidro diante de um dos feixes e incliná-la ligeiramente as franjas sofriam um deslocamento perceptível²⁴¹;

2. Na montagem de Fizeau a observação do deslocamento das franjas precisava ser feita muito rapidamente, pois a velocidade máxima do líquido durava pouco mais que um instante devido ao sistema de propulsão da água por ar comprimido;

3. Na montagem de Fizeau o uso de uma fonte quase puntiforme e de fendas para dividir a frente de onda, com o conseqüente recurso a tubos de diâmetros pequenos, limitava em muito a luminosidade final do sistema de franjas, dificultando a observação;

4. Na montagem de Fizeau a velocidade do líquido ao longo do eixo do tubo não era medida, mas apenas estimada a partir de uma velocidade média da água como um todo.

Endereçando estas objeções, Michelson e Morley conceberam uma montagem alternativa, aperfeiçoada (fig. 6.7), na qual a luz colimada de uma fonte em a tinha sua amplitude dividida por uma superfície semi-espelhada em b e os feixes daí resultantes eram refletidos pelos espelhos c e d de modo a, paralelos, ingressar nos tubos de latão de 28 mm de

²⁴¹ Michelson e Morley não explicitam, no entanto, o que pensam ser a origem do problema, pois teoricamente a montagem de Fizeau não deveria apresentar este comportamento.

diâmetro interno e 3 m de comprimento²⁴². Os tubos eram fechados em suas extremidades por placas de vidro de faces paralelas, que no entanto não eram colocadas perfeitamente perpendiculares à maior extensão dos tubos, para que a luz refletida fosse desviada para baixo da mira telescópica de observação, de forma a não se sobrepor à luz que efetivamente atravessava as placas e os tubos. Os feixes eram retrorefletidos por um prisma de reflexão total de dimensões adequadas colocado à frente da outra extremidade dos tubos, e recombinados pelo divisor de feixe, permitindo a observação da interferência pelo telescópio em *g*. O fluxo de água era produzido por um grande tanque colocado no sótão do prédio, a 23 m de altura, provendo 3 min de fluxo de água praticamente constante com as válvulas abertas, o que permitia tomar confortavelmente diversas medidas antes de se ter que bombear novamente toda a água para o tanque. Toda a parte hidráulica era montada em suportes de madeira mecanicamente isolados do sistema óptico, que era apoiado em bancadas de tijolos.

Este arranjo trazia ainda duas vantagens adicionais: em primeiro lugar permitia o uso de uma fonte de luz extensa, melhorando em muito a luminosidade do sistema de franjas. Além disso, os tubos podiam ser de calibres maiores, e podiam ser colocados a qualquer distância um do outro sem prejuízo para a largura das franjas. Michelson e Morley verificaram ainda que a interposição de uma placa inclinada (em *h* na figura) não alterava a posição do máximo central (branco) do sistema de franjas²⁴³, mas tão-somente a largura e a inclinação das franjas (MICHELSON e MORLEY, 1886, p. 380).

242 Na segunda série de experimentos os tubos tinham 6 m de comprimento.

243 As franjas não eram deslocadas nem mesmo quando se acendia um fósforo próximo ao caminho dos feixes.

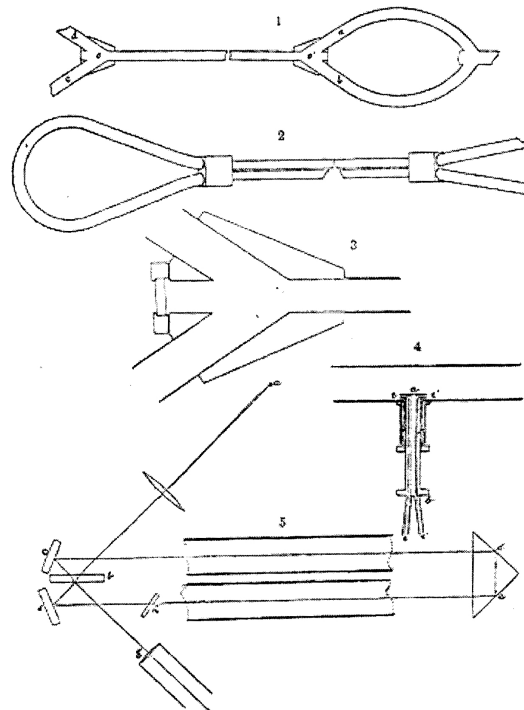


Fig. 6.7 – Esquema da montagem de Michelson e Morley para a repetição do experimento de Fizeau (5, em baixo). Outros detalhes mostram o tubo de Pitot acoplado ao tubo de água para determinação da velocidade da água em diversos pontos (4), a inserção em ângulo do fluxo de água nos tubos (3) e as visões lateral (1) e superior (2) da instalação hidráulica (MICHELSON e MORLEY, 1886, p. 381).

Ao longo dos experimentos foram utilizadas água destilada e uma lâmpada elétrica, e o deslocamento das franjas era estimado por comparação com duas miras de fio reguláveis dispostas no foco do telescópio. Ao inclinar um dos espelhos fazia-se com que as franjas se inclinassem, e a mira de fio horizontal era posicionada no ponto do padrão em que as franjas permaneciam fixas a despeito do movimento do espelho. O fluxo de água era então produzido, e as miras de fio deslocadas até ladear o máximo central, seu deslocamento medido micrometricamente, depois o fluxo de água era invertido nos tubos, e o deslocamento das franjas novamente registrado pelo recuo necessário para que as miras de fio retornassem às laterais do máximo central, e assim por diante, até que uma série de medições foi tomada, permitindo uma análise estatística do efeito.

Quanto à velocidade da água, um valor médio era obtido por um processo semelhante ao de Fizeau, e uma análise das diferenças de pressão a diferentes distâncias das paredes dos tubos permitia obter um fator de correção igual a 1,165 vezes a velocidade média para a velocidade da água no centro do tubo. As velocidades alcançadas eram, na primeira série, 8,72 m/s, na segunda, 7,65 m/s, e na terceira, 5,67 m/s.

A análise de todas as medições, reduzidas a uma proporção comum, produziram o equivalente a um deslocamento duplo da ordem de 0,1840 da largura de franja para um comprimento de 10 m de tubo com velocidade da água de 1,0 m/s, gerando um valor experimental para o coeficiente de arrasto igual a $0,434 \pm 0,02$, contra um valor teórico igual a 0,437.

Como Fizeau, Michelson e Morley também testaram a possibilidade de medir o arrasto do éter pelo ar, que conseguiam fazer correr pelos tubos a 25 m/s. O resultado experimental, no entanto, não pôde distinguir o deslocamento real do erro de leitura do aparelho, ficando da ordem do centésimo da largura da franja, e sendo portanto virtualmente indetectável, o que estava novamente de acordo com a previsão teórica de míseros 0,0036 da largura de franja.

Michelson e Morley concluíram portanto que “o resultado anunciado por Fizeau está essencialmente correto; e que *o éter luminífero é inteiramente não afetado pelo movimento da matéria que ele permeia*” (MICHELSON e MORLEY, 1886, p. 386, grifo no original)²⁴⁴.

244 A conclusão nos parece paradoxal, uma vez que a verificação do coeficiente de arrasto implicava, ao menos na interpretação costumeira, considerar que o éter luminífero era de alguma maneira afetado pelo movimento da matéria que ele permeava. Ela só faz sentido se se levar em conta a distinção que Michelson já possivelmente fazia entre o éter livre e o ‘halo’ de éter que parecia estar agregado aos átomos da matéria e com eles compartilhar o movimento, como explicação para a parcialidade do arrasto. Neste caso, Michelson e Morley

6.4 A Repetição do Experimento de Fizeau por Zeeman

Em 1895, Lorentz já havia desenvolvido uma primeira versão de sua “teoria do elétron” - um *tour de force* teórico que consistia em última instância na busca de integrar num corpo conceitual e matemático único e consistente todos os efeitos ópticos e eletromagnéticos conhecidos²⁴⁵. No processo, Lorentz percebeu a necessidade de um termo adicional ao coeficiente de arrasto de Fresnel, para dar conta da dependência do índice de refração com o comprimento de onda da luz arrastada. Acrescido deste “termo dispersivo”, o coeficiente de Fresnel passava a ser expresso como:

$$1 - \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n} \lambda \frac{dn}{d\lambda} .$$

Em 1914, o físico holandês Pieter Zeeman (1865-1943) decidiu testar a correção deste termo adicional, pois tanto Fizeau quanto Michelson e Morley haviam trabalhado com fontes de luz branca, observando o deslocamento do máximo central, e portanto não se preocupando com os possíveis valores do coeficiente para diferentes cores. O que era pior, uma reanálise dos valores experimentais obtidos em ambos os casos à luz do novo termo dispersivo parecia piorar o acordo dos dados com os valores calculados teoricamente²⁴⁶. Finalmente, pelo menos dois

estariam se referindo apenas ao éter livre nesta conclusão.

245 Foi neste processo que um pouco mais tarde Lorentz deduziu a necessidade de transformações de coordenadas entre referenciais comuns e o referencial do éter, que levariam tanto às transformações de Lorentz como à ideia da contração (de FitzGerald-Lorentz) para “salvar os fenômenos” no que dizia respeito ao experimento de Michelson-Morley de 1887. Mais sobre a teoria do elétron de Lorentz no próximo capítulo.

246 Por exemplo, para a linha D do espectro, o coeficiente conforme medido por Fizeau era de 0,434, batendo bastante bem com o valor calculado de 0,437. No entanto, levando-se em consideração o acréscimo do termo dispersivo, o coeficiente para o dubleto do sódio se tornava 0,451, piorando bastante o acordo experimento-

outros autores contemporâneos, o físico e filósofo alemão Max B. Weinstein (1852-1918) e o físico austro-húngaro Gustav Jaumann (1863-1924), haviam sugerido pouco antes expressões alternativas para o coeficiente de arrasto²⁴⁷, que embora não desviassem significativamente para o caso da propagação da luz na água podiam desviar consideravelmente em outros casos (ZEEMAN, 1914, p. 448).

A montagem óptica de Zeeman²⁴⁸ era absolutamente idêntica à utilizada por Michelson e Morley²⁴⁹. No entanto, como o objetivo de Zeeman era testar o coeficiente de arrasto para diversos comprimentos de onda distintos, isso o obrigou a tomar diversas providências específicas.

Em primeiro lugar, era preciso alimentar o interferômetro com luz monocromática. Num primeiro momento Zeeman utilizou as linhas amarela, verde e violeta do mercúrio. No entanto a baixa intensidade fez Zeeman optar num segundo momento por utilizar uma seção estreita do espectro de um arco elétrico obtida através de um monocromador (ZEEMAN, 1915a, p. 398).

As baixas visibilidade e intensidade da luz violeta empregada ($\lambda = 435,8$ nm), especialmente, obrigaram Zeeman a lançar mão de técnicas fotográficas para o registro das

teoria (ZEEMAN, 1914, pp. 447-448).

247 Zeeman também chamava a quantidade de “coeficiente de convecção” (ver, por exemplo, ZEEMAN e DIBBETZ, 1921, p. 206).

248 Zeeman foi auxiliado por W. de Groot no trabalho de laboratório. Zeeman também expressa sua gratidão a J. van der Zwall, que construiu boa parte das delicadas peças mecânicas do aparelho.

249 Morley não é citado sempre que Zeeman refere-se ao trabalho de Michelson e Morley de 1886. Em particular, Zeeman refere-se à montagem óptica como “o método de Michelson”. Inclusive o diagrama impresso no artigo de Zeeman é idêntico ao do artigo de Michelson e Morley (ZEEMAN, 1914, pp. 448-449).

franjas, com tempos de exposição de 5 a 7 minutos. Isto, no entanto, obrigava não só a estruturar a montagem hidráulica de modo a permitir um fluxo contínuo durante um intervalo de tempo desta monta, mas também a mantê-lo o mais constante possível, o que só foi conseguido com a instalação de canos de grande diâmetro (7,5 cm) na tubulação principal do laboratório²⁵⁰. Os tubos do interferômetro tinham 6 m de comprimento e 40 mm de diâmetro interno, e a velocidade máxima alcançada pela água no eixo dos tubos foi de 5,5 m/s.

Para o registro dos deslocamentos das franjas de interferência Zeeman reportou ter utilizado três métodos distintos para construir uma referência contra a qual medi-los (ZEEMAN, 1915a, pp. 399-400 e figura 6.9).

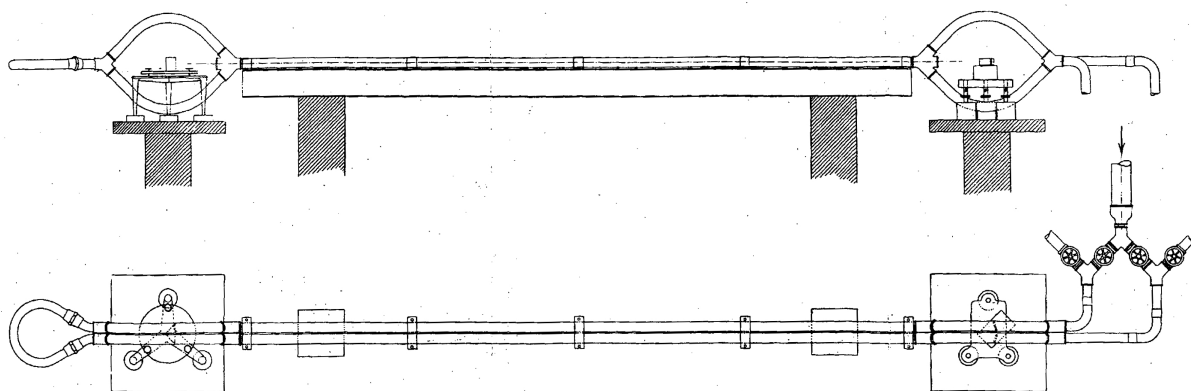


Fig. 6.8 – Vistas lateral (em cima) e superior (em baixo) da montagem hidráulica de Zeeman para a medição do coeficiente de arrasto para diferentes comprimentos de onda. Zeeman foi especialmente metucioso na confecção das peças das janelas ópticas nas extremidades dos tubos visando uma maior uniformidade no fluxo de água (ZEEMAN, 1914, prancha em anexo).

250 Graças a uma autorização especial dada pelas autoridades municipais de Amsterdã.

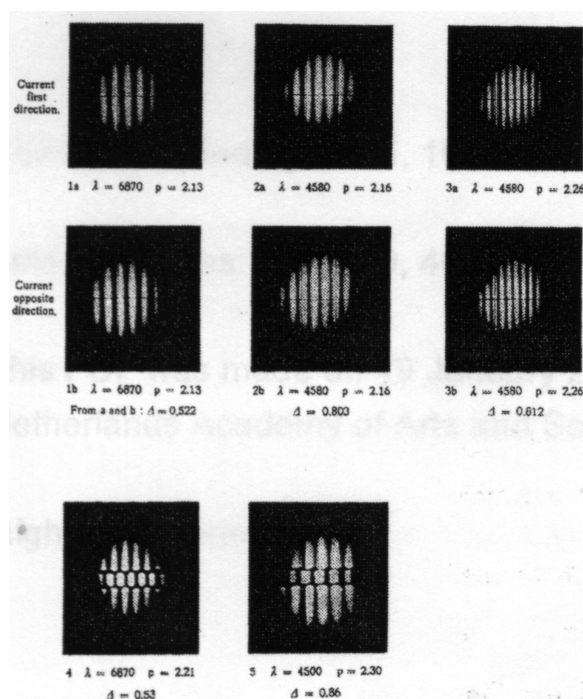


Fig. 6.9 – Fotografias das franjas tiradas por Zeeman contrastando dois dos métodos por ele empregados para registrar os deslocamentos das franjas: miras de fio (em cima e no meio, comparando as franjas com a corrente de água num e noutro sentido) e máscaras para fotografias sobrepostas, em que a faixa horizontal central apresentava as posições das franjas para quando o fluxo estava no sentido oposto (em baixo) (ZEEMAN, 1915a, prancha em anexo).

Os resultados obtidos por Zeeman corroboraram com boa exatidão a forma proposta por Lorentz para o coeficiente de arrasto (cf. tabela 6.1 e figura 6.10 a seguir).

λ (nm)	deslocamento das franjas		
	Fresnel	Lorentz	experimental
450,0	0,443	0,464	0,465
458,0	0,442	0,463	0,463
546,1	0,439	0,454	0,451
687,0	0,435	0,447	0,445

Tabela 6.1 – Valores calculados e experimentais para o deslocamento das franjas no experimento de Fizeau para quatro cores diferentes (ZEEMAN, 1915a, p. 404).

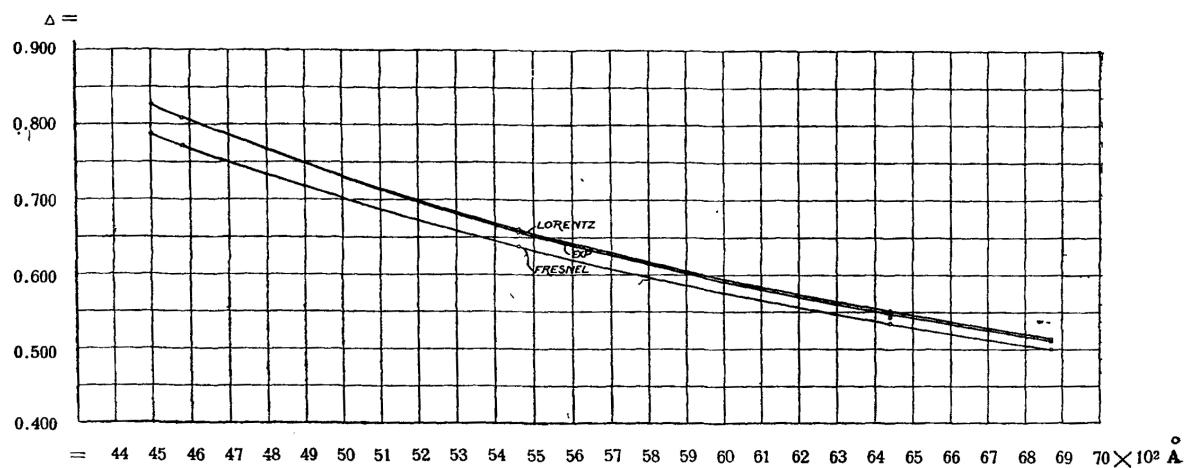


Fig. 6.10 – Ajuste para a variação do coeficiente de Fresnel com o comprimento de onda, comparando os valores teóricos calculados a partir da expressão de Fresnel e de Lorentz com os valores experimentais, marcados “EXP” no gráfico (ZEEMAN, 1915a, p. 405).

Nos anos subsequentes à reprodução do experimento de Fizeau, Zeeman permaneceu ligado à questão do arrasto parcial²⁵¹. No período 1919-20, Zeeman e seus colaboradores decidiram enfrentar experimentalmente a questão do arrasto do éter pela matéria *sólida*²⁵², para o que conceberam uma montagem mecânica sofisticada, em que se punha em um movimento rápido de vai-vém longos blocos de vidro ou de cristal de quartzo, de maneira que enquanto

251 Mesmo em 1915 Zeeman já vislumbrara a possibilidade de utilizar o termo dispersivo introduzido no coeficiente de arrasto de Fresnel para a análise de fenômenos solares devido ao efeito do arrasto pelas massas gasosas transparentes em diferentes movimentos giratórios no Sol (ZEEMAN, 1915b). Em 1917, por exemplo, Zeeman publicou um estudo minucioso das variações da velocidade da água ao longo do comprimento dos tubos na montagem do experimento de Fizeau, bem como ao longo de seu diâmetro, aperfeiçoando a determinação do fator de correção para a velocidade efetiva da água no interior dos tubos (ZEEMAN, 1917). Em 1921 Zeeman empregava a montagem para estudos exploratórios, como o que detectou um “surpreendente” deslocamento de franjas quando vapor de sódio era introduzido em um dos caminhos da luz no interferômetro (DIBBETZ e ZEEMAN, 1921).

252 A argumentação principal para justificar a realização destes experimentos era a de que o coeficiente de Fresnel havia sido introduzido para explicar o efeito de arrasto parcial causado pelo movimento de um prisma *de vidro* no experimento de Arago, porém havia sido testado por Fizeau numa montagem em que o éter era arrastado pela *água*. Lorentz lembraria a Zeeman que um experimento correlato que também envolvia o arrasto do éter pelo vidro em movimento (porém, no caso, de rotação) já havia sido realizado como pesquisa de doutorado por Franz Harress em torno de 1910 (*cf.* capítulo 7) (ZEEMAN, de GROOT, SNETHLAGE e DIBBETZ, 1920, p. 1410).

um dos blocos ia para frente ao longo da barra o outro se movia para trás, e vice-versa²⁵³.

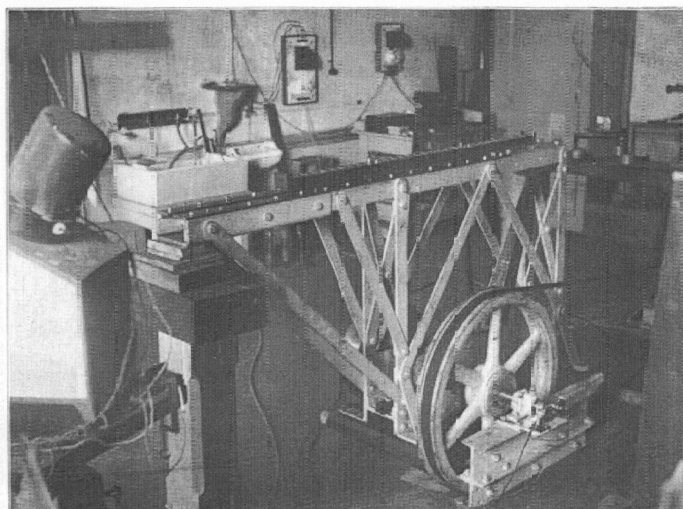


Fig. 6.11 – Montagem para a medição do arrasto parcial em sólidos. Cilindros de vidro ou de quartzo eram colocados em movimento de vai-vém defasados ao longo da barra horizontal por um motor e um sistema de correias e alavancas (ZEEMAN, 1919, prancha em anexo).

Como os blocos cumpriam exatamente o papel desempenhado pelas colunas de água dentro dos tubos no experimento original de Fizeau, toda a montagem óptica podia permanecer a mesma dos estudos de Zeeman com a água em movimento. Novamente, as franjas foram fotografadas para se determinar os deslocamentos em cada caso, e desta feita um sistema elétrico permitiu sincronizar o disparo do obturador da câmera com posições específicas das barras em seus movimentos. Com isso foi possível sobrepor diversas exposições da mesma posição, obtendo fotos com boa definição (ZEEMAN, 1919, pp. 467 e 469). Os

253 Os “blocos” eram na verdade composições de diversos blocos menores alinhados e firmemente presos a uma sapata de madeira, separados por discos de borracha abertos no centro. Os comprimentos das composições variaram ao longo dos experimentos entre 100 e 140 cm. A velocidade máxima conseguida por Zeeman e Snethlage para os blocos foi de 10 m/s, quando a roda maior girava a 184 rpm (ZEEMAN, 1919, p. 466). O sistema no entanto apresentou diversas dificuldades operacionais. Entre elas, Zeeman reporta que só se conseguia alcançar a velocidade máxima após ligar e desligar o motor por duas ou três vezes. Houve mesmo uma ocasião em que um dos “belamente acabados” cilindros de vidro, certamente fixado incorretamente à sapata, soltou-se com a máquina em velocidade máxima, destruindo todos os outros cilindros da composição, além de parte do latão e da madeira do suporte da barra (ZEEMAN, 1919, p. 470).

resultados obtidos com o quartzo foram:

λ (nm)	deslocamento das franjas	
	calculado (Lorentz)	experimental
475,0	0,166	$0,156 \pm 0,007$
538,0	0,143	$0,148 \pm 0,006$
651,0	0,115	$0,125 \pm 0,007$

Tabela 6.2 – Valores calculados e experimentais para o deslocamento das franjas no experimento do arrasto do éter por blocos de quartzo para quatro cores diferentes (SNETHLAGE e ZEEMAN, 1919, p. 516).

Graças à qualidade e uniformidade dos cilindros de vidro fornecidos pela Carl Zeiss, os experimentos com vidro *flint* produziram resultados ainda mais exatos que os realizados com quartzo. Em particular “pareceu finalmente possível observar também o efeito-Fizeau para o vidro diretamente através de um telescópio, tão claramente quanto é possível com a água em movimento, e tivemos o privilégio de demonstrar o efeito diante de vários físicos” (ZEEMAN, de GROOT, SNETHLAGE e DIBBETZ, 1920, p. 1402). Apesar do sucesso de Zeeman e de seus colaboradores, os resultados não parecem ter atraído muita atenção (DRYSDALE, 1934, pp. 834-835).

6.5 A Dedução Relativística do Coeficiente de Arrasto

Embora seja mais lembrado hoje por sua descoberta da difração dos raios-X, pela qual foi agraciado com o prêmio Nobel, Max von Laue (1879-1960) teve um papel de destaque na

promoção da teoria da relatividade restrita. Foi como aluno do também físico alemão Max Planck (1858-1947) que von Laue primeiro travou contato com os novos conceitos introduzidos em 1905 por Albert Einstein (1879-1955). Seguindo o conselho de Planck, von Laue foi até o escritório de patentes suíço em Berna conhecer Einstein, e a partir daí tornou-se amigo e admirador do jovem cientista, além de um dos mais importantes propagadores da teoria da relatividade (ROWE, 2008, p. 54). Von Laue rapidamente convenceu-se de que a teoria da relatividade provia à física um novo quadro conceitual que resolvia o impasse criado pelo choque entre a eletrodinâmica de Maxwell e a mecânica newtoniana. Um dos triunfos mais precoces e importantes da teoria da relatividade foi a derivação do coeficiente de arrasto de Fresnel por von Laue em 1907 (LAUE, 1907). O resultado decorria com tamanha naturalidade da fórmula de adição de velocidades relativística que o próprio von Laue ficou espantado que ninguém até então tivesse se dado conta do fato²⁵⁴, e fez um levantamento bibliográfico para certificar-se de que efetivamente nada ainda havia sido publicado a respeito²⁵⁵. Isto é particularmente curioso quando se leva em conta que o próprio Einstein teria aparentemente considerado que o conhecimento da aberração estelar e dos resultados do experimento de Fizeau “eram suficientes” como dados empíricos para a gênese da teoria da relatividade (PATTON, 2011; SHANKLAND, 1963 *apud* FERRARO e SFORZA, 2011,

254 Mais sobre a relação entre interferometria e o desenvolvimento da relatividade no capítulo 7.

255 Além disso, von Laue deu uma importantíssima contribuição à teoria da relatividade publicando em 1911 o livro *Das Relativitätsprinzip*, em que colocava a relatividade a partir de um novo formato, livrando a teoria das âncoras que Einstein ainda havia deixado presas à teoria do elétron de Lorentz. Foi esta nova formulação dos princípios da relatividade, baseada na estrutura físico-matemática desenvolvida pelo matemático alemão Hermann Minkowski (1864-1909), que permitiu a Einstein alçar vôo em direção a uma teoria geral da relatividade (ROWE, 2008, p. 55). Von Laue continuou escrevendo sobre relatividade por toda a sua carreira (por exemplo, LAUE, 1956).

pp. 1-2). Os cientistas Rafael Ferraro e Daniel M. Sforza parecem considerar que desta afirmação de Einstein se deve deduzir que para Einstein era claro que o arrasto medido no experimento de Fizeau decorria da adição de velocidades relativística (FERRARO e SFORZA, 2011, p. 2), porém esta interpretação contrasta com o assombro de von Laue diante da lacuna na literatura relativística frente a um “resultado tão importante” quanto o do experimento de Fizeau (von LAUE, 1907).

Na conclusão de seu artigo, von Laue explicitava que estava contrapondo o arrasto parcial do éter por um corpo em movimento a um arrasto “completo” da luz pela matéria:

Segundo o princípio da relatividade, a luz seria *completamente* arrastada pelos corpos, mas, justamente por isso, sua velocidade relativa a um observador que não compartilha do movimento dos corpos não é exatamente a soma vetorial de sua velocidade em relação aos corpos e da velocidade dos corpos em relação ao observador. Desta maneira estamos desobrigados da necessidade de introduzir na óptica um “éter” que permeia os corpos sem tomar parte em seu movimento²⁵⁶ (LAUE, 1907, p. 990)[vi4].

O coeficiente de Fresnel decorria diretamente da fórmula de adição de velocidades relativística, conforme demonstrava von Laue com o seguinte raciocínio: considere-se dois referenciais, R e R' , em movimento relativo ao longo da direção x com velocidade v . De um modo bastante geral, a uma velocidade w' , medida a partir do referencial R' , cuja direção forma um ângulo ϑ' com o eixo x' , corresponde portanto, relativamente ao referencial R , a velocidade:

256 É curioso que von Laue aqui falasse de um éter que não toma parte no movimento dos corpos, quando justamente o coeficiente de Fresnel se referia a como exatamente o éter participava (parcialmente) do movimento dos corpos transparentes. Acreditamos que von Laue, mais que um convertido, um apóstolo da teoria da relatividade, já tivesse expurgado de sua visão de mundo *qualquer* éter luminífero, e portanto se referisse a características diferentes do modelo do éter de Fresnel indistintamente, inadvertidamente colocando “tudo no mesmo saco”, por assim dizer. A insistência, na última frase, de que o éter era a partir de então um conceito supérfluo, era desnecessária no contexto do artigo, mas se justificava no contexto catequético da época do início da relatividade.

$$w = \frac{\sqrt{v^2 + w'^2 + 2vw' \cos \vartheta' - \frac{1}{c^2} v^2 w'^2 \sin^2 \vartheta'}}{1 + \frac{1}{c^2} vw' \cos \vartheta'}$$

Considere-se agora um corpo de índice de refração²⁵⁷ n movendo-se em relação a R' , de tal forma que a velocidade de fase da luz para R' é:

$$w' = \frac{c}{n}$$

A velocidade correspondente no sistema R é, portanto:

$$w = \frac{\sqrt{v^2 + \frac{c^2}{n^2} + 2v \frac{c}{n} \cos \vartheta' - \frac{v^2}{n^2} \sin^2 \vartheta'}}{1 + \frac{v}{cn} \cos \vartheta'}$$

Mas no caso do experimento de Fizeau²⁵⁸ as direções das velocidades v e w' ($=c/n$) estão alinhadas, então $\cos \vartheta' = \pm 1$, e:

$$w = \frac{\frac{c}{n} \pm v}{1 \pm \frac{v}{cn}}$$

Expandindo em série de potências, tem-se:

$$= \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \left\{ \pm v - \frac{v^2}{cn} \pm \frac{v^3}{(cn)^2} - \frac{v^4}{(cn)^3} \pm \dots \right\},$$

que em primeira aproximação corresponde ao coeficiente de Fresnel.

Em substâncias dispersivas o valor a ser inserido para n correspondia, naturalmente, à

257 O termo “índice de refração” vai se referir sempre ao índice de refração medido pelo referencial em questão.

Não julgamos necessário cunhar o termo “índice de refração próprio”, embora valha a pena enfatizar que o índice de refração de uma substância não é um valor absoluto.

258 Curiosamente von Laue se referia não ao experimento de Fizeau, mas ao “experimento de Fresnel”. É difícil dizer se ele se referia ao experimento de Arago da refração da luz estelar por um prisma, que obrigou Fresnel a introduzir o coeficiente de arrasto do éter, ou ao experimento de Fizeau propriamente. Preferimos interpretar da última forma. De qualquer maneira isso não faz diferença para o raciocínio matemático.

frequência de oscilação no referencial R' . Para a velocidade de grupo valia exatamente a mesma coisa quando se substituía o índice de refração n pela expressão $n + u (dn/du)$ (u sendo a frequência de oscilação), o que reproduzia o termo de correção introduzido por Lorentz e verificado experimentalmente por Zeeman. Assim o coeficiente de Fresnel ficava completamente consistente com a teoria da relatividade, que passava a prover uma abordagem heurística muito mais simples para o efeito. Olhando pelo outro lado, a dedução de von Laue transformava o resultado experimental obtido por Fizeau (à época já verificado por Michelson e Morley) numa espécie de elemento de corroboração da teoria da relatividade²⁵⁹, na medida em que o resultado do experimento estava em perfeito acordo com a previsão relativística. Isto se mostraria indispensável, uma vez que mesmo na década de 1930 o arrasto parcial ainda seria compreendido como uma comprovação da realidade do éter e de sua relação com o movimento da matéria ordinária. Escrevendo na *Nature* em 1934, C. V. Drysdale, um pesquisador reconhecido na área da engenharia elétrica, ainda argumentaria que “uma conclusão fundamentalmente importante que emerge (...) dos experimentos com a água em movimento de Fizeau, Michelson e Morley e Zeeman é que o movimento através do éter tem um significado definido e um efeito mensurável” (DRYSDALE, 1934, p. 834).

259 De fato, talvez o único resultado experimental *positivo* reproduzido relacionado à óptica dos corpos em movimento no século XIX.

6.6 Duas Outras Aplicações da Mesma Montagem

Duas outras aplicações de uma montagem semelhante à utilizada por Fizeau no experimento do arrasto parcial do éter foram propostas por Carl Barus em seu *brainstorm* interferométrico de 1921 (BARUS, 1921, pp. 146-149)²⁶⁰. Na primeira delas, Barus buscou detectar o efeito, reportado pelo físico britânico Frank Twyman (1876-1959)²⁶¹ em 1919, de que o índice de refração de um líquido sofria um súbito aumento na proximidade de uma superfície de vidro polido em função de um efeito de capilaridade. Uma célula com janelas de vidro era colocada ao longo de um dos braços do interferômetro (ver figura 6.12), e preenchida com um líquido. O micrômetro *m* permitia deslizar a célula transversalmente ao longo da seção do feixe, de modo a eventualmente fazer com que um ou outro dos feixes interferentes fosse obstruído pela borda metálica da célula, caso em que as franjas evidentemente desapareceriam. Barus preencheu a célula alternadamente com benzeno e éter, reportando não ter encontrado nenhuma variação do posicionamento das franjas para qualquer posição do micrômetro, mesmo as mais próximas da borda da célula, onde os efeitos de capilaridade poderiam ser mais efetivos.

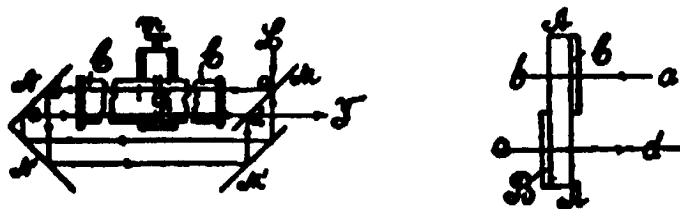


Fig. 6.12 – Montagem interferométrica para a tentativa de medição da suposta variação do índice de refração de um líquido causada pela proximidade a uma superfície sólida, inicialmente através da

²⁶⁰ Barus chamava a montagem de “interferômetro auto-ajustável”.

²⁶¹ Incidentalmente co-inventor do interferômetro de Twyman-Green para testes de superfícies ópticas.

introdução de uma célula com janelas de vidro num dos braços do interferômetro (à esq.). A luz ingressa em L e as franjas são observadas por um telescópio em T. No detalhe, placa de vidro AA, que eventualmente substituiu a célula CC, contra a qual eram prensadas lâminas de vidro idênticas (B e C) para encerrar uma película de líquido ou ar em contato com o vidro (à dir.) (BARUS, 1921, p. 146).

Estimando que o volume de líquido utilizado reduzia em demasia os efeitos de capilaridade, Barus trocou a célula por uma simples placa de vidro de faces paralelas, contra a qual posicionou, com o auxílio de pregadores de madeira e em lados opostos da placa, lâminas de vidro idênticas, de modo que finas camadas de ar ou de líquido podiam ser prensadas entre a placa e cada lâmina. A graduação do micrômetro podia ser usada para avaliar a variação relativa de espessura do filme formado entre as placas em diferentes posições, e a introdução de uma película de éter numa das lâminas e uma de água na outra permitia estimar o índice de refração do éter, uma vez que sua rápida evaporação e substituição pelo ar deslocava sensivelmente as franjas. Entretanto o valor encontrado (1,37) não era significativamente diferente do valor tradicionalmente obtido para o índice de refração do éter utilizando os métodos normais (1,36), e Barus concluiu pela inadequação do método para a medição do efeito (BARUS, 1921, p. 148).

A montagem, no entanto, sugeriu a Barus desenvolver um recurso interessante, semelhante ao empregado por Haber e Löwe para o aperfeiçoamento do interferômetro de Rayleigh, qual seja, o uso de dois padrões de franjas para uma melhor estimativa de seus deslocamentos relativos, um padrão “sendo usado como uma espécie de *vernier* do outro” (BARUS, 1921, p. 148). Para alcançar este resultado, o interferômetro era acrescido de um segundo divisor de feixe, de modo a permitir introduzir nele dois pares de feixes interferentes, cada qual oriundo de uma fonte de luz branca em uma posição distinta (L e L' na figura 6.13 a

seguir). Os feixes corriam o interferômetro ligeiramente deslocados um do outro. Uma cunha de vidro (um “compensador de Billet”) era introduzida no interferômetro, e um parafuso micrométrico permitia movê-la de maneira a variar as larguras das franjas de um e outro sistema. A contínua e pequena diferença entre os caminhos ópticos no vidro da cunha, experimentados por um e outro par de feixes, fazia com que as franjas se sobrepusessem apenas periodicamente, permitindo o seu uso para estimativa de submúltiplos de deslocamentos, exatamente como num nônio.

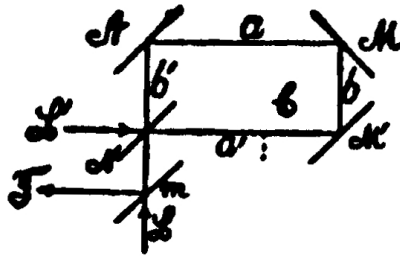


Fig. 6.13 – Montagem para comparação entre dois sistemas de franjas distintos. L e L' eram duas fontes de luz branca e T o telescópio em se podia observar os sistemas de franjas por elas projetados através do interferômetro. A linha tracejada C representava uma cunha de vidro móvel que visava a regular os tamanhos relativos das franjas em cada sistema, permitindo o uso de um como escala para leitura de deslocamentos no outro (BARUS, 1921, p. 149).

7 Tentando Medir o “Vento de Éter”

*“I am afraid we must still regard Cloud No. I. as very dense.”*²⁶²

William Thomson (lorde Kelvin)

7.1 A Luz como Onda Eletromagnética

Qualquer tentativa de fazer uma apresentação resumida da importância dos trabalhos do físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) com o eletromagnetismo está antecipadamente fadada ao fracasso. No entanto, na impossibilidade de evitá-la, chamamos a atenção para o fato de que

(...) Maxwell fez pelos fenômenos eletromagnéticos o que Newton havia alcançado para a mecânica. Ele condensou tudo o que era então conhecido a respeito da luz, da eletricidade e do magnetismo. (...) Ele formulou a estrutura matemática (...) que apontou para a unidade do “éter” e formou a base de toda a *teoria eletromagnética*. Ele previu a existência de ondas elétricas se propagando pelo espaço, posteriormente descobertas por Hertz (SHAMOS, 1959, p. 283, grifos no original) [vii1].

A partir de 1849, o físico alemão Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) e, posteriormente, seu compatriota e matemático Carl G. Neumann (1832-1925) haviam desenvolvido uma teoria que buscava integrar num só corpo conceitual toda a gama de fenômenos eletrostáticos e eletromagnéticos conhecidos. Embora admirada por Maxwell pela sua engenhosidade, a base física desta teoria seria por ele criticada pela necessidade de nela levar em consideração não apenas as posições e a natureza das partículas interagentes mas

²⁶² “Temo que precisemos considerar ainda a Nuvem No. I. como muito densa” (KELVIN, 1904, tradução nossa).

também suas *velocidades*. O conceito subjacente de uma força de ação a distância que dependia da velocidade viria a ser descartado por Maxwell em favor de uma nova entidade que lhe seria sugerida pelas linhas de força imaginadas pelo físico e químico britânico autodidata Michael Faraday (1791-1867) duas décadas antes para explicar as relações entre efeitos elétricos e magnéticos: o *campo eletromagnético* (MAXWELL, 1865). Para Maxwell (e, aliás, Faraday, Ampère²⁶³ e outros), a ação a distância só fazia sentido a partir da intermediação do meio circundante. Porém, mesmo na ausência de um meio material ordinário, os efeitos eletromagnéticos se faziam sentir a distância posto que o campo eletromagnético se configuraria a partir da “substância etérea” que permaneceria mesmo no “assim chamado vácuo” (MAXWELL, 1865). Esta substância não seria outra, segundo Maxwell, senão o próprio éter luminífero:

Temos então alguma razão para acreditar, a partir do fenômeno da luz e do calor²⁶⁴, que existe um meio etéreo preenchendo o espaço e permeando os corpos, capaz de ser colocado em movimento e de transmitir este movimento de uma parte a outra, e de comunicar este movimento à matéria grosseira²⁶⁵ de modo a aquecê-la e afetá-la de várias formas. (...) Um meio tendo uma tal constituição deve ser capaz de outras formas de movimento e deslocamento que aquelas que produzem os fenômenos da luz e do calor, (...). Agora sabemos que o meio luminífero em certos casos sofre a ação do magnetismo; pois Faraday descobriu que, quando um raio polarizado linearmente atravessa um meio diamagnético transparente na direção das linhas de força magnética produzidas por ímãs ou correntes na vizinhança, o plano de polarização sofre uma rotação²⁶⁶ (MAXWELL, 1865)[vii2].

Outros efeitos semelhantes ajudaram a consolidar, no raciocínio de Maxwell, a suspeita

263 Pelo menos no que dizia respeito às ações relacionadas aos fenômenos elétricos, magnéticos, luminosos e caloríficos (CANEVA, 1980, p. 122).

264 Aqui Maxwell se referia ao calor radiante.

265 A “matéria ordinária”, isto é, a matéria comum que constitui os corpos sensíveis.

266 O assim chamado “efeito Faraday” (FARADAY, 1845, p. 568).

de que os fenômenos relativos à luz, ao calor radiante, à eletricidade e ao magnetismo seriam operados todos através de um mesmo éter, que se comportaria como um fluido elástico:

Parece portanto que certos fenômenos em eletricidade e magnetismo levam à mesma conclusão daquelas da óptica, qual seja, as de que há um meio etéreo permeando todos os corpos, e modificado apenas em grau pela presença deles; que as partes deste meio são capazes de serem colocadas em movimento por correntes elétricas e por ímãs; que este movimento é comunicado de uma parte do meio a outra por forças que surgem das conexões destas partes; que sob a ação destas forças há uma certa deformação que depende da elasticidade destas conexões; e que portanto pode existir energia em duas formas diferentes no meio, uma forma sendo a própria energia de movimento de suas partes, e a outra sendo a energia potencial armazenada nas conexões em virtude de sua elasticidade²⁶⁷ (MAXWELL, 1865) [vi3].

O conjunto de todo o conhecimento experimental adquirido dos fenômenos elétricos e magnéticos foi então condensado num conjunto de vinte equações²⁶⁸, a partir das quais Maxwell pôde computar a energia do campo eletromagnético para diversas situações. Em particular Maxwell aplicou-as

(...) ao caso de uma perturbação magnética propagada através de um campo não condutor, e pode-se mostrar que as únicas perturbações que podem ser propagadas são aquelas transversais à direção de propagação, e que a velocidade de propagação é a velocidade v , encontrada em experimentos como aqueles de Weber, que expressa o número de unidades eletrostáticas de eletricidade que estão contidas em uma unidade eletromagnética.

Esta velocidade é tão próxima da [velocidade] da luz²⁶⁹ que parece haver forte razão para concluir que a própria luz (incluindo o calor radiante e outras radiações, caso existam) é uma perturbação eletromagnética na forma de ondas propagadas através do campo eletromagnético de acordo com as leis do

267 Os conceitos de energia cinética e energia potencial, bem como o princípio da conservação da energia, já estavam bem estabelecidos nesta época, e “a física da energia era considerada a física do éter também” (MORUS, 2005, p. 85).

268 Apenas posteriormente as equações seriam resumidas num conjunto principal de quatro equações (*cf.* seção 7.2)

269 Já medida “em laboratório” desde os trabalhos de Fizeau (FIZEAU, 1849) e Foucault (FOUCAULT, 1850).

eletromagnetismo. (...) Se a mesma propriedade de elasticidade for retida em corpos transparentes densos, parece que o quadrado do índice de refração é igual ao produto da capacidade dielétrica específica pela capacidade magnética específica²⁷⁰. (...).

O conceito da propagação de perturbações magnéticas transversais, à exclusão de [perturbações] normais²⁷¹, é proposto distintamente pelo professor Faraday em seu “Pensamentos sobre as Vibrações dos Raios”. A teoria eletromagnética da luz, como proposta por ele, é idêntica em substância à que eu comecei a desenvolver neste artigo, exceto que em 1846 não havia dados para calcular a velocidade de propagação (MAXWELL, 1865)[vii4].

A velocidade da luz seria portanto constante para um determinado meio, tendo um valor próximo a 3×10^8 m/s no vácuo – função unicamente da permeabilidade elétrica e da permissividade magnética do espaço livre²⁷². Este fato em si seria tão importante que o físico inglês Oliver Lodge (1851-1940) afirmaria algumas décadas depois que

por transmitir ondas a uma velocidade finita e mensurável, o éter se entregou, e permitiu toda possibilidade de cálculos e afirmativas numéricas. Suas propriedades são a partir daí exibidas como essencialmente finitas – não importando se toda a sua extensão possa se revelar infinita (LODGE, 1909, p. 100)[vii5].

Porém uma coisa era prever a existência de ondas eletromagnéticas e sugerir a identidade entre elas e a luz, outra coisa era demonstrá-lo experimentalmente.

270 Maxwell refere-se ao que hoje chamaríamos, respectivamente, de permissividade elétrica do meio (ϵ) e de permeabilidade magnética do meio (μ).

271 Normais (perpendiculares) à frente de onda, isto é, longitudinais.

272 Cujos valores são definidos, hoje, de forma exata respectivamente por $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N/A² e $\epsilon_0 = 8,854187817... \times 10^{-12}$ C²/N.m², em função do valor acordado para a velocidade da luz, igual a $2,99792458 \times 10^8$ m/s. É preciso cuidar para não se acreditar, anacronicamente, que a teoria eletromagnética conforme interpretada à época estabelecia a velocidade da luz como uma velocidade *absoluta*. Ela deve ser interpretada como a velocidade da luz medida pelo referencial do éter “estacionário”.

7.2 Hertz e os *Maxwellianos*

Em 1878, Hertz, aos 21 anos, foi estudar em Berlim sob o guarda-chuva dos famosos físicos alemães Hermann von Helmholtz (1821-1894) e Gustav Kirchhoff (1824-1887)²⁷³. Ali ele receberia seu doutorado em 1880 e continuaria trabalhando até 1883²⁷⁴. Mas foi apenas alguns anos mais tarde, já como professor de física experimental na escola técnica de Karlsruhe, que Hertz conduziu seus famosos experimentos sobre a onda eletromagnética. O estímulo inicial parece ter sido dado pela divulgação de um prêmio proposto pela academia prussiana de ciências para o trabalho que melhor mostrasse a confirmação experimental da relação entre a ação eletromagnética e a polarização de um dielétrico. Aparentemente Hertz não entrou na competição, mas ficou intrigado pela questão e pelo trabalho experimental na área (SHAMOS, 1959, p. 186). Numa série de experimentos, ele demonstrou a propagação de efeitos eletromagnéticos pelo espaço, mediu a velocidade de propagação e o comprimento de onda das ondas, e comprovou sua natureza transversal através de experimentos envolvendo a reflexão, a refração e a polarização de ondas eletromagnéticas, obtendo “sucesso em produzir raios de força elétrica distintos, e em realizar com eles experimentos que são comumente

273 Por volta do último quarto do século XIX os institutos científicos alemães (prussianos), e em particular o Instituto de Física de Berlim, já gozavam de grande prestígio internacional, tendo inaugurado uma nova (e hoje moderna) forma de fazer ciência profissionalmente (MORUS, 2005, pp. 45-53). Na década de 1880 a união de diversos institutos e um maciço investimento estatal criaram o *Physikalisch-Technische Reichanstalt*, provavelmente uma instituição sem precedentes à época (MORUS, 2005, pp. 246-250). Incidentalmente, Helmholtz, um dos pioneiros da descoberta do princípio de conservação da energia, foi seu primeiro diretor.

274 E portanto estava por perto quando Michelson por lá construiu seu primeiro interferômetro e com ele realizou a versão original (em 1881) do experimento que mais tarde seria consagrado como o “experimento de Michelson-Morley” (cf. seção 7.3).

realizados com luz e calor radiante²⁷⁵ (HERTZ, 1889, p. 769).

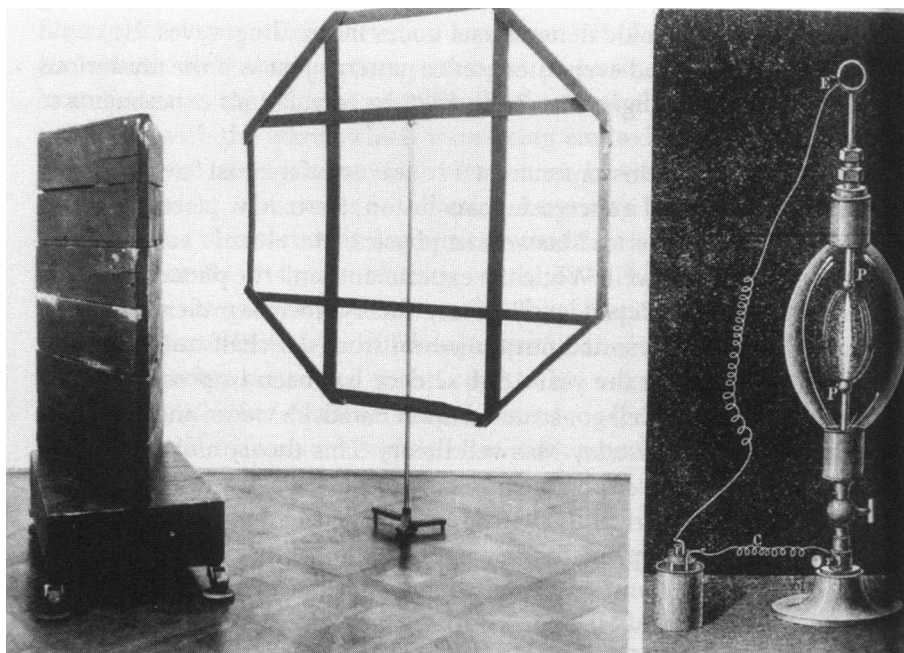


Fig. 7.1 – Alguns dos equipamentos desenvolvidos e utilizados por Hertz para demonstrar a existência e natureza das ondas eletromagnéticas no éter (MORUS, 2005, p. 171).

Em resumo, até o final de 1888 Hertz já havia estabelecido a natureza eletromagnética da luz conforme a teoria de Maxwell, e fornecido comprovação empírica da incrível síntese maxwelliana entre a óptica, a eletricidade e o magnetismo. Além disso, Hertz

era um experimentador muito engenhoso que foi forçado a inventar técnicas inteiramente novas para a detecção das ondas elétricas de Maxwell. De seu sucesso

275 É importante notar que Hertz não conseguiu observar efeitos de interferência com seu aparato (mas o físico italiano Augusto Righi (1850-1920) sim, descrevendo diversos experimentos envolvendo a interferência de ondas hertzianas em 1897 (CONNES, 1986, p. 22)). Fora isso, os raios exibiram todas as propriedades usualmente associadas à luz (SHAMOS, 1959, p. 195). Isto parece ter sido suficiente para Hertz poder afirmar ter “removido qualquer dúvida quanto à identidade entre luz, calor radiante e movimento ondulatório eletromagnético” (HERTZ, 1889). Uma coisa pouco observada é que o advento do eletromagnetismo e os experimentos de Hertz também incorporaram à síntese óptica-eletricidade-magnetismo a explicação da natureza do *calor radiante* (radiação infravermelha), que desde os trabalhos de Herschel no início do século XIX (HERSCHEL, 1800a, 1800b, 1800c e 1800d) já se suspeitava ter propriedades comuns à luz. A este respeito vale lembrar os trabalhos de Fizeau e Foucault de 1847 mostrando que também se podia atribuir ao calor radiante um comprimento de onda (FIZEAU, 1878) e que ele também exibia o fenômeno da interferência (FIZEAU e FOUCAULT, 1878).

surgiu a indústria da comunicação, e, talvez mais importante, uma imagem mais clara da natureza da luz (SHAMOS, 1959, p. 185)[vii6].

A partir de então ficou claro que o éter das interações elétricas e magnéticas não poderia ser outro senão o próprio éter luminífero, uma suspeita que já existia seriamente desde os tempos de Fizeau, entre outros (ver, por exemplo, FRERCKS, 2001 e 2007; ACLOQUE, 1984). Com o banimento do *calórico*²⁷⁶ em meados do século XIX, em favor de uma visão mecânica e atomista dos fenômenos relacionados às trocas de calor, o éter luminífero sobreviveu como o último dos (fluidos) imponderáveis necessários aos modelos físicos²⁷⁷. Mais do que isso, a constatação da existência das ondas eletromagnéticas conforme previstas por Maxwell correspondeu de um certa maneira a uma constatação, ainda que indireta, da existência do próprio éter²⁷⁸.

A despeito da opinião posterior de Einstein de que

(...) antes de Maxwell, a Realidade Física, enquanto representação dos processos da natureza, era compreendida como consistindo de partículas materiais, cujas variações consistiam apenas de movimentos governados por equações diferenciais parciais. Desde a época de Maxwell, a Realidade Física tem sido pensada como representada por campos contínuos, governados por equações diferenciais parciais, e *incapazes de qualquer interpretação mecânica*. Esta mudança na concepção da Realidade é a mais profunda e mais fecunda que a física experimentou desde os tempos de Newton (EINSTEIN, 1931, p. 71, *apud* SHAMOS, 1959, p. 285, grifos nossos)[vii7],

para Maxwell o éter detinha uma realidade física e mecânica inalienável (*cf.* seção 7.1). Um

276 Fluido responsável por efeitos térmicos, supostamente trocado por corpos a diferentes temperaturas quando em contato, na visão predominante no século XVIII e início do século XIX.

277 De fato, como escreveria Maxwell, “[o] único éter [*i. e.*, fluido imponderável] que sobreviveu é aquele que foi inventado por Huygens para explicar a propagação da luz” (MAXWELL, 1878, p. 568).

278 Constatação tão impactante para a cultura científica e tecnológica da época que mesmo muitas décadas depois os primeiros locutores de rádio ainda se refeririam às “ondas hertzianas no éter” como o meio de propagação de seus programas.

outro exemplo da natureza mecânica do éter em Maxwell é sua interpretação do termo que precisou introduzir nas equações do eletromagnetismo, e que constituiu uma contribuição original de Maxwell²⁷⁹. Ele deu o nome de “corrente de deslocamento” a este fator, porque o interpretava como “um ‘deslocamento’ do meio eletromagnético, o que estava de acordo com sua visão do éter como um meio elástico sujeito a trações e tensões; estas dando origem às forças elétricas e magnéticas” (SHAMOS, 1959, p. 287).

Sua visão teve prosseguimento nos trabalhos de jovens cientistas insulares, como Lodge, Oliver Heaviside (1850-1925) e George Francis FitzGerald (1851-1901), que levaram a exposição da teoria eletromagnética contida no *Tratado* de Maxwell (MAXWELL, 1873) até a sua formulação moderna²⁸⁰. No processo, buscaram atribuir ao éter propriedades mecânicas

279 Na sua forma moderna as equações de Maxwell podem ser escritas genericamente como:

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \rho \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} &= \vec{J}_d + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad ,\end{aligned}$$

onde o termo J_d na última equação corresponde à corrente de deslocamento introduzida por Maxwell (WANGSNESS, 1986, p. 353).

280 O grupo, que incluía ainda Hertz como “membro estrangeiro”, ganhou do historiador da ciência estadunidense Bruce J. Hunt a alcunha de “os maxwellianos” (HUNT, 1991). Já Olivier Darrigol considera também como maxwellianos continentais precoces, além de Hertz, o austro-húngaro Ludwig Boltzmann (1844-1906), o alemão August Föppl (1854-1924) e o francês Henri Poincaré (1854-1912) (DARRIGOL, 1993, pp. 264-269). É preciso mencionar também o físico e matemático francês Joseph Boussinesq (1842-1929), que ajudou a desenvolver ferramentas matemáticas utilizadas no tratamento da elasticidade de fluidos com a expressa intenção de dar conta das propriedades do éter eletromagnético, num período (publ. em 1878) entre a obra de Maxwell e a confirmação de Hertz das ondas eletromagnéticas (BOUSSINESQ, 1921). Kelvin, Lodge, Weber, Lorentz, Boussinesq, Heaviside, Larmor, todos estavam desenvolvendo uma hidrodinâmica do éter na época.

que explicassem seu comportamento e os efeitos ópticos e eletromagnéticos que deveriam ser satisfeitos, *i. e.*, as equações de Maxwell, o que fez com que os modelos de éter ficassem progressivamente mais complexos (CAMEL, 2000; KLEIN, 1972).

Além disso, a natureza atômica e granular da matéria, e em particular a descoberta de partículas portadoras de quantidades fundamentais de carga elétrica na composição dos átomos, conduziu a um modelo em que a própria matéria ordinária era compreendida como sendo formada por entidades discretas, constituídas de turbilhonamentos do éter que se mantinham estáveis ao longo do tempo. Apesar de sua abordagem original e criativa, a teoria dos átomos de “vórtices de éter”, propagada por lord Kelvin (KELVIN, 1867; SILLIMAN, 1963) e cortejada como solução mesmo pelo pragmático Michelson, constituiu-se em relação aos estudos do éter luminífero o que nas artes o rococó representou para o estilo barroco no final do século XVIII: um estirão final exagerado que levou ao extremo um conceito já próximo da exaustão de suas possibilidades heurísticas (CAMEL, 2000; DARRIGOL, 1994, pp. 273-275). Neste contexto é fácil identificar como revolucionário o fato da teoria da relatividade tornar o conceito de éter supérfluo²⁸¹, dissociando o *campo* de qualquer referência material.

De qualquer maneira, o conceito de éter ainda era ensinado em cursos de física tradicionais até pelo menos a metade da década de 1930, e da seguinte maneira:

Em virtude do princípio de conservação da matéria, torna-se necessário admitir que certos fenômenos como os da luz, calor e electricidade são devidos a fenômenos de movimento vibratório das moléculas dos corpos e que esses

281 Note-se que mesmo Einstein não desacreditou do éter senão durante um curto período, entre 1905 e meados de 1907, quando começou a refletir sobre a relatividade geral e concluiu que o espaço-tempo teria que ter propriedades físicas, o que de certa forma representava uma espécie de (novo) éter (KOSTRO, 2000).

movimentos se transmitem até aos órgãos dos nossos sentidos por meio de movimentos vibratórios [*sic*] das moléculas dos corpos intermediários. Há, porém, fenómenos que chegam até nós sem que tenhamos conhecimento da existencia [*sic*] de qualquer corpo intermediário [*sic*], por exemplo, a luz das estrelas, o calor do sol, a luz eléctrica dentro de um recipiente em que se tenha feito o vácuo, etc. O espirito humano foi assim levado a admitir que na natureza não existe em parte alguma o vácuo perfeito e que os espaços inter-siderais e os intervalos ou póros moleculares, vãos [*sic*] da própria substância, estão na realidade cheios dum fluido subtil, infinitamente mais ténue do que os mais leves gases, *absolutamente inerte e perfeitamente elástico*.

A este fluido, agente transmissor dos fenómenos caloríficos, luminosos e eléctricos através do espaço dá-se o nome de *éter*.

O *éter* pode ser considerado como matéria num novo estado, capaz de embeber e penetrar intimamente todos os corpos *sólidos, líquidos ou gasosos* e que enche os espaços siderais do mesmo modo que os póros intermoleculares, pondo em relação todas as partes do universo. O *éter* não se pode reconhecer directamente pelos sentidos e resulta de uma concepção imposta pelo raciocínio para explicar a transmissão de energia (luz, calor e electricidade) através dos espaços que se não podia compreender sem a existência de um meio material.

A concepção do éter em física e a hipótese dos movimentos vibratórios moleculares da matéria completam as ideias modernas sobre a constituição dos corpos, as quais contêm incipiente a teoria completa das suas propriedades (NOBRE, 1934, grifos no original).

De fato, mesmo muito depois de 1905 o artigo de Einstein daquele ano sequer era destacado da massa de trabalhos publicados no campo da “relatividade” (ver figura 7.2).

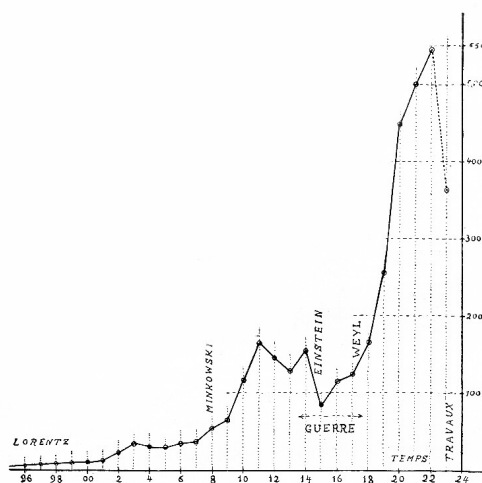


Fig. 7.2 – “Produção anual de escritos em relatividade”, *circa* 1924. O campo era reconhecido como

tal desde os trabalhos de Lorentz e Poincaré no final do século XIX, e o artigo (hoje tido como seminal) de Einstein de 1905 (EINSTEIN, 1905) não recebia então qualquer destaque especial. Ao contrário, a participação mais relevante de Einstein é marcada na época da 1ª guerra mundial (1914-1918), período no qual formalizou sua teoria da relatividade geral (EINSTEIN, 1916).

No entanto a ida de Einstein para os Estados Unidos, combinada com o ímpeto nacionalista da época e a cultura científica estadunidense, de viés mais empírico, levariam a uma releitura da evolução da relatividade. No processo, um experimento, acima de todos, seria alçado a uma posição de destaque, para tristeza de seu próprio autor.

7.3 Michelson e o Vento de Éter

Como todo velejador sabe, o vento é relativo. O vento percebido a bordo é de fato uma combinação de dois movimentos: o do ar em relação à Terra e o do barco em relação à Terra. Mesmo que o ar esteja perfeitamente parado em relação à Terra, o movimento do barco nos faz perceber um “vento” com velocidade igual à do barco, no sentido oposto. O conceito não poderia ser estranho a Michelson, cuja experiência como oficial da marinha e navegador pode ter sido relevante como inspiração para a criação de seu mais famoso instrumento e experimento.

Ondas acústicas têm sua velocidade determinada pelas características físicas (densidade etc.) do meio em que se propagam. A intensidade e a direção da velocidade do som são afetadas pela velocidade *do meio* (vento, no caso do ar) em relação ao observador, mas não pela

velocidade *da fonte* sonora em relação ao observador²⁸². Por que isso não se aplicaria à luz se propagando no éter? Como toda velocidade é definida em relação a um referencial, é razoável supor, dada a onipresença do éter, que a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo fosse dada em relação ao referencial do éter.

De acordo com a hipótese que era mais aceita à época, do éter estacionário, a Terra, ao girar em grande velocidade em torno do Sol (~30 km/s), atravessava o éter sem perturbá-lo. Sopraria, então, em qualquer laboratório, um “vento de éter”, que teria precisamente a mesma velocidade em sentido oposto. A velocidade da luz medida por um observador terrestre deveria variar portanto entre $c + v$, quando a favor do “vento de éter”, e $c - v$, quando contra.

Por volta do final da década de 1870 Wilhelm Veltmann já havia demonstrado que era impossível detectar através de experimentos ópticos o movimento de um observador em relação ao éter em primeira ordem – isto é, em medições em que o fator sensível era a razão v/c (MILLER, 1981, p. 21). Em março de 1879, numa carta ao astrônomo estadunidense David Peck Todd (1855-1939) postumamente²⁸³ publicada tanto na revista *Nature* quanto nos *Proceedings* da *Royal Society* no ano seguinte (HARMAN, 1998, p. 165), Maxwell sugeriu que efeitos de segunda ordem²⁸⁴ em v/c poderiam em tese ser medidos, porém seriam diminutos demais (da ordem de 10^{-8}) para serem detectados com a tecnologia da época.

Neste ínterim, um então ainda desconhecido Michelson terminava seu período de formação como oficial da marinha estadunidense e retornava de um período embarcado para

282 Embora a frequência seja, no que é conhecido como *efeito Doppler*.

283 Como Fresnel, Malus e Hertz, Maxwell também faleceu precocemente (em 5 de novembro de 1879). A óptica do século XIX infelizmente ceifou diversas carreiras na flor da idade, e podemos apenas especular, meio melancólicos e meio maravilhados, o que todos eles teriam feito caso lhes houvesse sido oferecido mais tempo.

284 Isto é, dependendo da razão v^2/c^2 .

lecionar física na própria academia da marinha, em Anápolis²⁸⁵. Interessado pela medição da velocidade da luz, Michelson em 1878 aprimorou a montagem do espelho giratório de Foucault e realizou a 4ª determinação desta constante²⁸⁶, incrementando ainda mais sua exatidão (LIVINGSTON, 1973; SHANKLAND, 1973; MILLIKAN, 1938; SWENSON, 1972, p. 372)

Muitos cientistas estadunidenses à época eram estimulados a cumprir um período de treinamento nos melhores institutos e laboratórios da Europa, onde se cultivava uma cultura de precisão experimental que logo se espalharia pelo mundo desenvolvido (MORUS, 2005, p. 235). Assim, Michelson eventualmente conseguiu uma licença da marinha estadunidense e viajou com a família para um período de dois anos de estudos na Europa, em particular na França²⁸⁷ e na Alemanha.

É possível que a observação de Maxwell a respeito da impossibilidade de se medir efeitos de segunda ordem tenha atingido os brios de experimentador detalhista de Michelson, que enquanto em Berlim ousou propor um experimento em que um efeito de segunda ordem poderia ser observado e medido “com facilidade” (MICHELSON, 1881, p. 121). O princípio do experimento era semelhante à ideia proposta por Maxwell: dois sinais luminosos seriam

285 A história de como Michelson foi parar lá em primeiro lugar, fazendo uma das primeiras viagens de trem transcontinentais, por si só é digna do tomo 2 de um romance. O tomo 1 seria fartamente preenchido pela aventura de sua família ao emigrar da Europa para o “faroeste” estadunidense, passando pelo recém-aberto canal do Panamá e participando diretamente da corrida do ouro (LIVINGSTON, 1973 dá conta do recado, na ausência dos dois tomos).

286 Após Fizeau, Foucault e Cornu (SWENSON, 1972, p. 372).

287 O nome de Michelson já era famoso na comunidade científica internacional, graças à sua determinação da velocidade da luz em Anápolis, mas praticamente ninguém fora dos Estados Unidos o conhecia pessoalmente, de forma que quando ele foi primeiramente apresentado aos membros da *Académie des Sciences* em Paris, muitos perguntaram se ele não era “o filho do famoso Michelson” (LIVINGSTON, 1973, p. ?).

enviados em direções ortogonais, um ao longo da direção do (suposto) movimento da Terra em relação ao éter e outro perpendicular a este. Espelhos refletiriam de volta ambos os sinais, que retornariam portanto defasados um do outro de uma maneira que dependeria do quadrado da razão das velocidades (ver figura 7.3 a seguir).

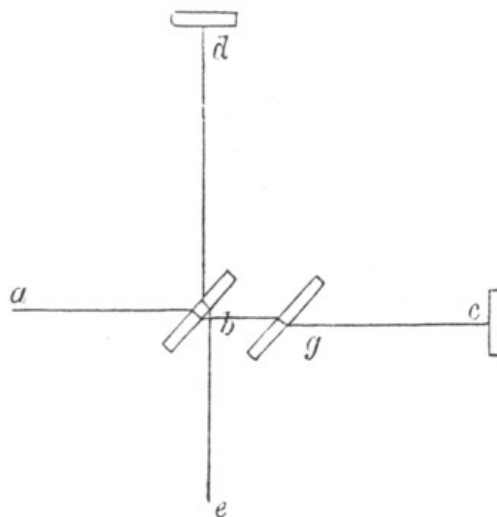


Fig. 7.3 – Esquema geral do interferômetro de Michelson em sua montagem original. A luz oriunda de uma fonte em *a* era parcialmente refletida pela placa de faces paralelas *b*, produzindo os feixes perpendiculares *bc* e *bd*. Espelhos de primeira superfície em *c* e *d* refletiam os feixes de volta à placa *b*, produzindo uma superposição ao longo de *be*²⁸⁸ onde se podia observar padrões de interferência. Uma segunda placa de faces paralelas, *g*, semelhante à primeira, era colocada ao longo do braço *bc* do interferômetro para compensar a diferença de caminho óptico entre os braços²⁸⁹ (MICHELSON, 1881, p. 122).

Para mostrar a diferença de caminho óptico entre os dois feixes introduzida pelo movimento da Terra (e do interferômetro) em relação ao éter, Michelson computou o tempo gasto pela luz em cada parcela do trajeto. Ele supôs que um dos feixes estivesse alinhado com o movimento da Terra em relação ao éter, e portanto os tempos gastos nos trajetos de ida e volta

²⁸⁸ Também ao longo de *ba*, incidentalmente.

²⁸⁹ Repare-se que, a superfície semi-espelhada sendo a face posterior da placa *b*, o feixe por ela refletido na direção *bd* terá atravessado a espessura da placa duas vezes a mais do que o feixe transmitido na direção *bc*, e portanto a introdução da placa *g*, atravessada na ida e na volta do feixe, compensa perfeitamente a diferença de percurso, desde que sua espessura e material sejam idênticos às da placa *b*.

entre a placa semi-espelhada e o espelho seriam, respectivamente²⁹⁰,

$$T_1 = \frac{D}{c+v} \quad \text{e} \quad T_2 = \frac{D}{c-v} \quad ,$$

levando a um tempo total de percurso de ida e volta igual a

$$T_1 + T_2 = \frac{D}{c+v} + \frac{D}{c-v} = 2D \frac{c}{c^2 - v^2} \quad .$$

Enquanto isso o outro feixe, propagando-se numa direção perpendicular ao movimento relativo entre a Terra e o éter, “seria inteiramente não afetado”, tendo seu tempo de trajeto de ida e volta calculado por Michelson como simplesmente²⁹¹

$$2T_0 = 2 \frac{D}{c} \quad .$$

A diferença no tempo de percurso entre um e outro feixe seria portanto de

$$\tau = T_1 + T_2 - 2T_0 = 2D \frac{c}{c^2 - v^2} - 2 \frac{D}{c} = 2Dc \left(\frac{1}{c^2 - v^2} - \frac{1}{c^2} \right) = 2Dc \left(\frac{v^2}{c^2(c^2 - v^2)} \right) \quad ,$$

o que corresponderia aproximadamente a

$$\tau \approx 2T_0 \frac{v^2}{c^2} \quad .$$

Embora pequena, esta diferença de tempo de percurso seria então suficiente para a luz percorrer uma distância igual a

290 Ou vice-versa, dependendo de se se orienta o braço no mesmo sentido do movimento da Terra em relação ao éter ou no sentido contrário.

291 Na suposição de contato óptico, *i. e.*, de que os braços do interferômetro tivessem exatamente o mesmo tamanho.

$$c \tau \approx 2c T_0 \frac{v^2}{c^2} = 2D \frac{v^2}{c^2} .$$

Aproximando a velocidade relativa entre a Terra e o éter para a velocidade orbital da Terra, Michelson estimou a razão v/c em 1/10.000. Considerando ainda um comprimento para os braços do interferômetro (D) de cerca de 1,2 m, isto é, aproximadamente 2 milhões de vezes o comprimento de onda da luz amarela, Michelson pôde computar a defasagem esperada em termos do comprimento de onda da luz amarela como

$$2D \frac{v^2}{c^2} \approx 2 \times 1,2 \times \frac{2.000.000}{100.000.000} \approx \frac{4}{100} ,$$

isto é,

(...), o feixe que tiver viajado na direção do movimento da Terra terá na realidade viajado 4/100 de um comprimento de onda mais do que teria viajado se a Terra estivesse em repouso [em relação ao éter]. O outro feixe, estando em ângulo reto com o movimento, não seria afetado.

Se, agora, o aparato for girado em 90° de modo a que o segundo feixe seja trazido à direção do movimento da Terra, seu caminho terá sido aumentado de 4/100 de comprimentos de onda. A variação total na posição das franjas de interferência seria de 8/100 da distância entre as franjas, uma quantidade facilmente mensurável²⁹² (MICHELSON, 1881, pp. 121-122)[vii8].

Michelson realizou o experimento utilizando um lampião²⁹³ como fonte de luz branca,

292 Michelson considerava a resolução de um interferômetro com estas configurações da ordem de 1/100 de franja.

293 Uma “lâmpada” de Argand, muito provavelmente. Para o alinhamento inicial do interferômetro, os espelhos eram colocados a distâncias aproximadamente iguais da placa central com o auxílio de um compasso, e depois alinhados finamente com o auxílio de um parafuso micrométrico junto à placa b que permitia alterar a largura, a posição ou a direção das franjas. Inicialmente isto era feito usando-se uma fonte de maior coerência (chama de sódio), que permitia projetar as franjas “na mesma hora” (MICHELSON, 1881, p. 123). Apenas após esses procedimentos o lampião era posicionado, e o parafuso gentilmente girado até que as franjas reaparecessem.

com a chama filtrada por uma tela opaca com um pequeno furo²⁹⁴ posicionado no foco de uma lente colimadora, e também cobriu os braços do interferômetro com longas caixas de papel para protegê-los de variações de temperatura que pudessem introduzir erros devido a uma refração diferenciada do ar num e noutro feixe²⁹⁵.

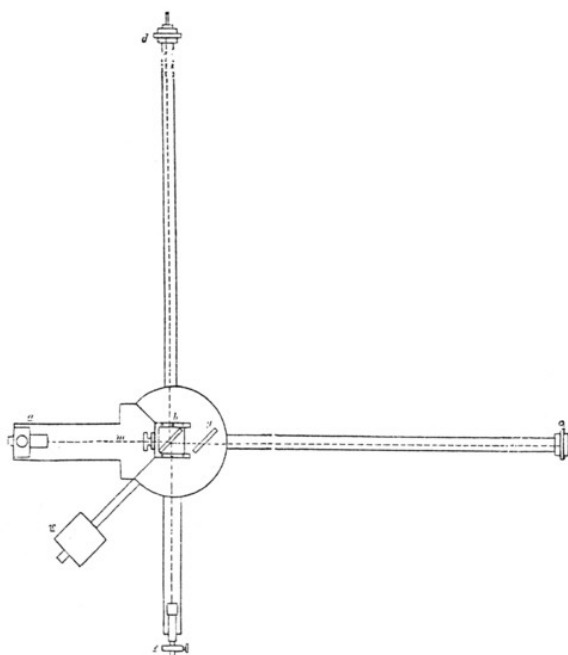


Fig. 7.4 – Vista superior do interferômetro de Michelson original. Os espelhos *c* e *d* podiam mover-se ao longo dos braços maiores, enquanto as placas estavam posicionadas sobre a base circular central. À esquerda, em *a*, era posicionado o lampião, e abaixo, em *e*, a lupa de observação (MICHELSON, 1881, pp. 123-124).

A observação das franjas era feita com uma luneta focalizada na superfície dos espelhos, “onde as franjas eram mais distintas” (MICHELSON, 1881, p. 123).

294 Operando como uma fonte puntiforme.

295 Para efeitos de cálculo, Michelson considerou a velocidade da luz no ar como muito próxima da velocidade da luz no vácuo, isto é, no éter livre de matéria, porém ele estava ciente das dificuldades que poderiam advir de variações na uniformidade da propagação real da luz no ar do laboratório. Por exemplo, Michelson calculou que, sendo de latão, os braços do interferômetro poderiam, ao se dilatar desigualmente por uma diferença de temperatura da ordem de um *centésimo* de grau, causar um efeito no deslocamento das franjas *três vezes maior* que o esperado pela rotação dos braços (MICHELSON, 1881, p. 125).

Também não escapou a Michelson que seu aparelho podia “facilmente servir como um ‘refrator interferencial’, e tinha as duas importantes vantagens de [apresentar] baixo custo e grande separação dos dois feixes”²⁹⁶ (MICHELSON, 1881, p. 124).

A extrema sensibilidade do aparelho a vibrações mecânicas²⁹⁷ impediu que ele pudesse ser usado em Berlim, mesmo à noite, quando, com os espelhos colocados

(...) a meio caminho nos braços, as franjas eram visíveis, mas sua posição não podia ser medida senão depois da meia-noite, e mesmo assim apenas em intervalos. Quando os espelhos eram movidos para as extremidades dos braços, as franjas eram visíveis apenas ocasionalmente (MICHELSON, 1881, pp. 124)[vii9].

Por causa disso, Michelson conseguiu que o experimento fosse transferido para o campus do *Astrophysicalisches Observatorium*, em Potsdam, pequena cidade próxima a Berlim. Porém mesmo na tranquilidade de Potsdam as bancadas de pedra comuns não foram suficientes para impedir que as vibrações prejudicassem a nitidez das franjas e o aparelho precisou ser finalmente albergado num porão de paredes circulares que constituía as fundações da cúpula de um telescópio equatorial²⁹⁸, levando Michelson a comentar que

[a]qui [em Potsdam], as franjas, em circunstâncias ordinárias, ficavam suficientemente quietas para medir, porém o instrumento era tão extraordinariamente sensível que batidas no calçamento, a cerca de 100 metros do observatório, faziam as franjas desaparecer completamente!

Se este era o caso com um instrumento construído com o objetivo de evitar sensibilidade, o que não se poderia esperar de um feito tão sensível quanto possível! (MICHELSON, 1881, pp. 124)[vii10].

296 Provavelmente em comparação com o interferômetro de Jamin.

297 Como as devidas ao tráfego de carruagens na rua ou ao caminhar das pessoas no assoalho do prédio.

298 Onde, a propósito, hoje repousa uma réplica do aparelho de Michelson, em mostruário.

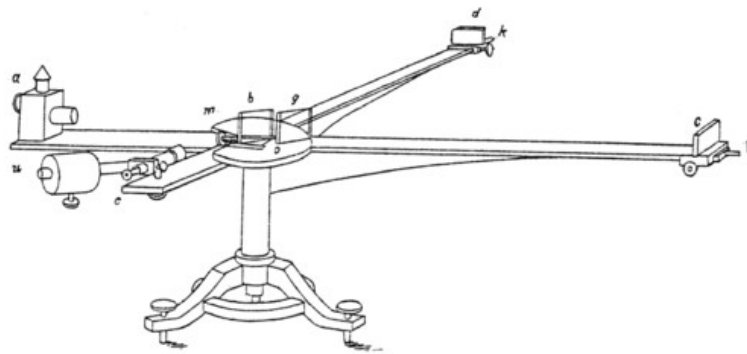


Fig. 7.5 – Vista em perspectiva do interferômetro de Michelson original, construído em latão pela firma Schmidt & Hænsch de Berlim²⁹⁹. Pode-se ver à esquerda o contrapeso que mantinha o equilíbrio mecânico do aparelho. O interferômetro como um todo também podia ser nivelado e girado em torno de um eixo vertical³⁰⁰ (MICHELSON, 1881, pp. 123-124).

De fato, a sensibilidade do aparelho era tão grande que o parafuso micrométrico de ajuste da mira de fio da luneta não pôde ser empregado, e em seu lugar foi utilizada uma placa de vidro com uma escala graduada, contra a qual eram estimadas as posições das franjas.

Considerando ainda que na época em que realizou as medições o movimento estimado do Sistema Solar na direção da constelação de Hércules coincidia grosseiramente com a direção do movimento orbital da Terra, e que ambas as componentes eram comensuráveis, Michelson estimou que o efeito sobre o deslocamento das franjas seria ainda maior, da ordem de um décimo da distância entre as franjas³⁰¹ (MICHELSON, 1881, p. 125).

No entanto, após quatro séries bem sucedidas de medidas, com cinco voltas do aparelho cada, e eliminação de uma deriva sistemática nas medidas, a análise dos resultados da

299 Pago graças ao crédito mantido nesta firma em nome de Michelson por ninguém menos que Alexander Graham Bell (1847-1922), o inventor do telefone, mostrando a importância de patrocinar projetos científicos (SWENSON, 1972).

300 O aparelho precisou ser retornado à Schmidt & Hænsch, no entanto, porque quando ele era girado os longos braços experimentavam uma torção suficientemente grande para aparecer como um erro sistemático nas medidas. Mesmo assim os resultados finais ainda apresentariam um efeito semelhante, embora menor (MICHELSON, 1881, p. 125).

301 Evidentemente, isto implicava a suposição adicional de que não apenas a Terra mas todo o Sistema Solar se movia em relação ao éter.

variação da posição da franja escura central com o azimute revelou-se desapontadoramente pequena, com valores máximos de $-0,004$ quando a luneta apontava na direção nordeste e $-0,015$ quando na direção sudoeste, contra variações esperadas de $\pm 0,050$ (ver figura 7.6 a seguir).

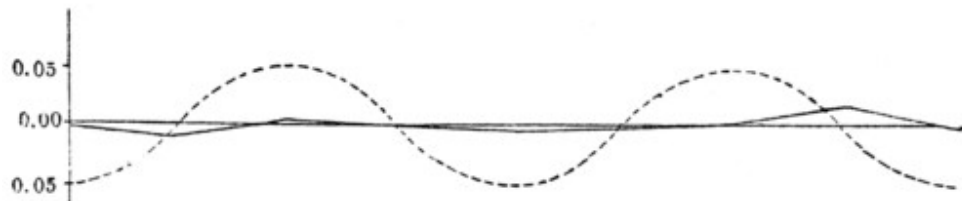


Fig. 7.6 – Gráfico comparando os valores esperados para a variação da posição da franja central do padrão de interferência em função do azimute (senóide tracejada) com os valores medidos (linha contínua) (MICHELSON, 1881, p. 128).

Michelson considerou os resultados obtidos como indistinguíveis de erros de leitura do aparelho, o que o levou a afirmar, um tanto categoricamente, que

A interpretação destes resultados é a de que não há deslocamento das franjas de interferência. O resultado da hipótese de um éter estacionário está portanto mostrada como sendo incorreta, e a conclusão necessária se segue de que a hipótese é errônea.

Esta conclusão contradiz diretamente a explicação do fenômeno da aberração que tem sido até agora geralmente aceita, e que pressupõe que a Terra se move através do éter, este último permanecendo em repouso (MICHELSON, 1881, p. 128)[vii11].

No penúltimo parágrafo de seu artigo, ao recuperar a longa citação em que Stokes lamentava não haver um teste possível para distinguir entre o seu modelo de éter e o de Fresnel, Michelson sugeria que não apenas seu experimento representava um tal teste, mas também que o resultado do teste favorecia o modelo do arrasto completo do éter pela Terra proposto por Stokes.

Porém o éter irrotacional de Stokes estaria em conflito mais tarde com a ideia de átomos de vórtices de éter aventada no final do século por lord Kelvin e outros. Outro problema do modelo, percebido por Planck e relatado por Lorentz em 1899, era o de que a irrotacionalidade não podia ser conciliada com a suposição de que o éter era arrastado com a mesma velocidade orbital da Terra ao longo de toda a superfície do planeta, a menos que se abrisse mão da suposição de uma densidade uniforme do éter. O modelo poderia ser salvo, no entanto, se se considerasse que a gravidade pudesse comprimi-lo localmente como a um gás (LORENTZ, 1899, p. 443)³⁰². Mais do que isso, seria necessário neste caso que a velocidade da luz fosse independente da densidade do éter, o que era outra coisa estranha. Para um modelo criado para prover uma ideia fisicamente mais aceitável do éter, as coisas estavam fugindo ao controle.

Lorentz (e Planck, a se fiar no relato de Lorentz) acreditavam que o modelo de Stokes era inferior ao de Fresnel por dois motivos. O primeiro é que seria preciso explicar consistentemente o coeficiente de Fresnel, um resultado já testado³⁰³ e consistente com o modelo do arrasto parcial de Fresnel. Além disso, “seria considerado estranho se por estes caminhos nós chegássemos precisamente ao valor requerido através de uma teoria errada” (LORENTZ, 1899, p. 447)³⁰⁴. Em segundo lugar, em se mantendo a esperança de algum dia explicar também os efeitos gravitacionais como uma ação do éter, seria natural supor que o éter

302 É curioso o ponto a que se chegava com esta hipótese, com o éter exibindo propriedades de todos os estados da matéria disponíveis, simultaneamente.

303 Pelo experimento de Fizeau de 1851 e por sua repetição por Michelson e Morley em 1886 (*cf.* capítulo 6).

304 Lorentz admitia, no entanto, que “não parece haver nada contra a suposição de que, embora o éter possa ser condensado pela gravidade, forças moleculares sejam incapazes de produzir este efeito. Assim seria explicado que pequenas massas, *e. g.* a água no experimento de Fizeau, não possam arrastar o éter consigo” (LORENTZ, 1899b, p. 448).

ele mesmo não estivesse sujeito a este tipo de força³⁰⁵.

Por si só, no entanto, os resultados obtidos por Michelson em Potsdam em 1881 talvez não tivessem sido capazes de gerar tamanha confusão. Ainda que não pesasse o fato de Michelson ter apenas 28 anos, pois ele já havia sido internacionalmente reconhecido em função da exatidão de suas medições da velocidade da luz poucos anos antes, a sensibilidade de seu método podia ser colocada em questão, dada a ignorância quanto às reais composições de movimentos da Terra em relação ao éter e do fato de Michelson ter negligenciado o deslocamento do interferômetro no cálculo do tempo de vôo da luz no braço perpendicular ao movimento, que causava uma redução por um fator de 2 na dimensão do efeito esperado³⁰⁶. Não se pode pleitear muito espanto, portanto, ao se tomar conhecimento de que lord Rayleigh teria, durante a reunião de 1884 da Associação Britânica para o Avanço da Ciência (BAAS, da sigla em inglês), instado Michelson a repetir o experimento de 1881³⁰⁷.

Michelson formou então a parceria com Morley, que ao cabo de três anos já teria testado experimentalmente, com exatidão amplificada, ambas as hipóteses do modelo de Fresnel para o éter através dos efeitos do *arrasto* (ver capítulo 6) e do *vento* de éter. Não houve novidades, porém, nos resultados obtidos.

No caso do experimento de 1887 com o vento de éter, Michelson e Morley em primeiro lugar refizeram suas estimativas corrigindo a geometria do experimento:

305 É evidente aqui a presença da tese da grande unificação.

306 O erro foi primeiro apontado pelo polímata francês Alfred Potier (1840-1905) ainda em 1881, e reanalisado, juntamente com todo o experimento, por Lorentz em 1886 (MICHELSON e MORLEY, 1887, pp. 334-335, ver notas de rodapé em ambas as páginas).

307 Como já dito no capítulo 6, a reunião foi realizada excepcionalmente em Montréal, no domínio britânico do Canadá, e atraiu portanto muitos cientistas norte-americanos, entre os quais Michelson e Morley.

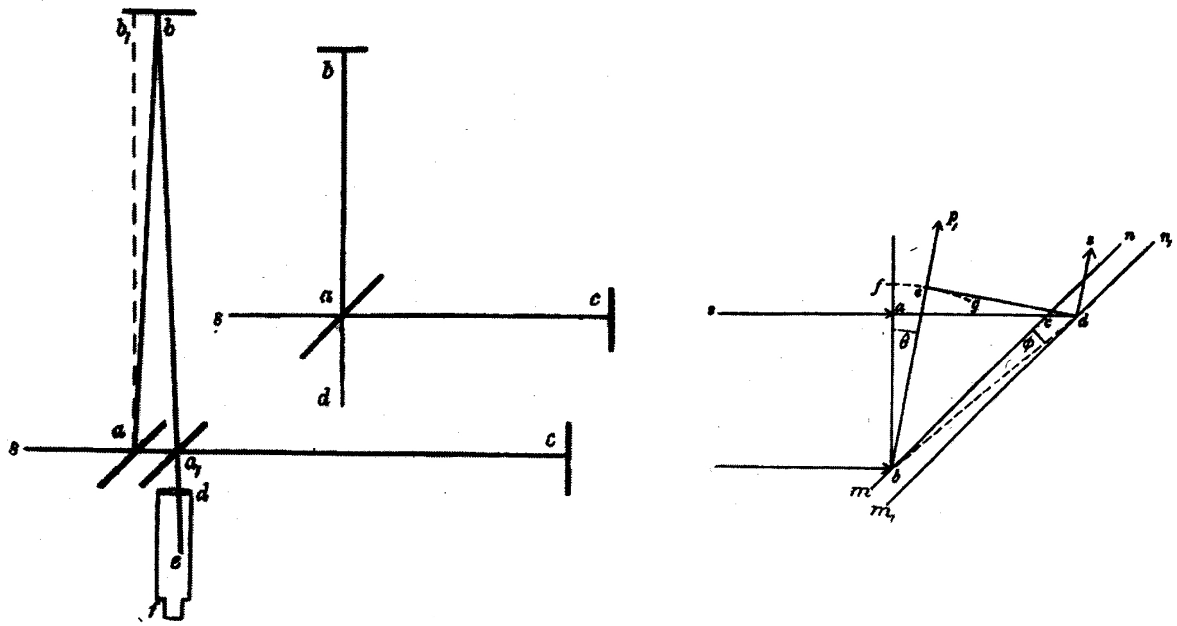


Fig. 7.7 – À esq., diagrama do experimento de Michelson-Morley com o percurso (corretamente) triangular para o feixe que se deslocava ao longo do braço perpendicular (agora rotulado ab) (MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 335). À direita, demonstração do desvio da frente de onda pela superfície refletora em movimento. A parte inferior da frente de onda é refletida pela superfície em b , quando a superfície está na posição mn , porém a parte superior da frente só a atinge, em d , quando ela já está na posição m_1n_1 (MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 343).

Agora o percurso no braço perpendicular era recalculado como:

$$2D\sqrt{1+\frac{v^2}{c^2}} \approx 2D\left(1+\frac{v^2}{2c^2}\right),$$

e a diferença entre os percursos seria então duas vezes menor que o calculado em 1881, isto é,

$$D\frac{v^2}{c^2},$$

um valor perigosamente próximo da resolução do aparelho conforme desenhado originalmente por Michelson.

Era necessário portanto estender o comprimento D dos braços do interferômetro, porém sem comprometer a sua estabilidade mecânica. Michelson e Morley resolveram a

questão através de um sistema de reflexões múltiplas que “alongavam” os caminhos ópticos muitas vezes sem implicar um braço mecânico maior³⁰⁸. Além disso, o problema das vibrações ocasionado pelos braços de latão do aparelho foi resolvido colocando-se o interferômetro sobre uma pedra massiva que flutuava sobre mercúrio líquido³⁰⁹, contido por uma calha circular de ferro apoiada sobre uma base octogonal oca de tijolos maciços. A base tinha dezesseis marcações equidistantes, e todo o aparato era girado tão suavemente (uma volta completa a cada 6 min) que era possível ajustar a mira de fio da luneta de observação para cada marcação da base. A posição do micrômetro de ajuste era anotada ao passar por cada marcação, ao longo de seis voltas completas³¹⁰ (ver figura 7.8 a seguir).

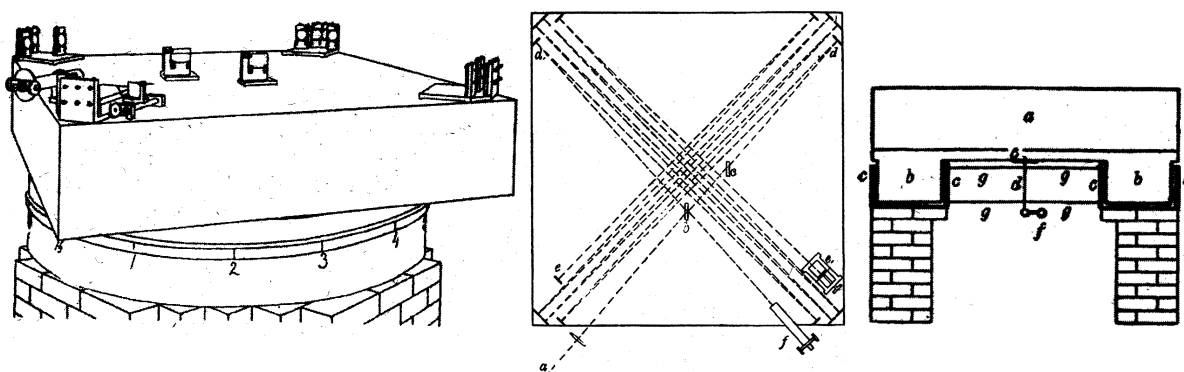


Fig. 7.8 – Desenho em perspectiva da montagem de Michelson e Morley de 1887, sem a cobertura de madeira utilizada durante os procedimentos de observação para controle da temperatura (à esq.) e diagrama em vista superior com o caminho óptico dos feixes ao longo das múltiplas reflexões desde a fonte *a* até a luneta de observação *f*. O uso de quatro espelhos em cada extremidade permitiu estender os braços do interferômetro para um comprimento *D* da ordem de 11 m (centro). À direita, corte transversal da estrutura da base, em que a pedra *a* mostra-se apoiada sobre uma

308 Os espelhos e outros componentes ópticos do interferômetro foram providenciados pelo astrônomo e fabricante de lentes e espelhos John Alfred Brashear, (1840-1920) de Pittsburgh, um artesão de equipamentos ópticos reconhecido como um ás em seu *métier* (SWENSON, 1972, p. 90).

309 Cerca de 100 kg, cuja compra consumiu a maior parte dos recursos conseguidos para o experimento (SWENSON, 1972, p. 93).

310 Michelson e Morley perceberam que era mais fácil fazer isso com o interferômetro em movimento uniforme do que tentar pará-lo a cada marca, o que introduzia tensões que acabavam por prejudicar a visibilidade das franjas (MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 339).

base de madeira b que “vestia” na calha de ferro c com uma pequena folga, preenchida por mercúrio, permitindo pivotá-la em torno de um eixo d praticamente sem resistência (MICHELSON e MORLEY, 1887, pp. 337, 338 e 339).

Usando uma fonte de luz amarela³¹¹, a diferença de fase correspondente seria dada por

$$2D \frac{v^2}{c^2} \approx 2 \times 11 \times \frac{2.000.000}{100.000.000} \approx \frac{4}{10} ,$$

ou seja, 40% da largura de uma franja – portanto plenamente observável.

Michelson e Morley perfizeram uma sequência totalizando seis séries de observações, nos dias 8, 9 e 11 de julho³¹².

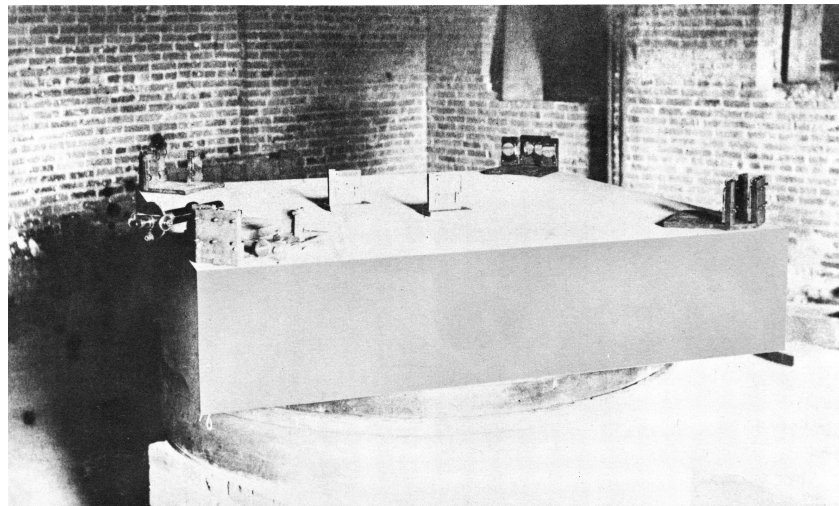


Fig. 7.9 – Fotografia da montagem de Michelson e Morley de 1887, albergada no porão do Adelbert Hall, na Western Reserve University³¹³ (SWENSON, 1972, 4ª página do encarte entre as páginas 106 e 107). Evidentemente esta foto, descoberta apenas muitos anos depois, serviu de modelo para a confecção do desenho em perspectiva da esquerda da figura 7.7.

311 De comprimento de onda médio $\lambda = 589$ nm (amarelo). Michelson e Morley usaram uma lâmpada de Argand especialmente projetada para queimar sal como fonte luminosa, e portanto a luz amarela do dubleto de sódio era a principal componente do padrão de franjas (SWENSON, 1972, p. 91).

312 Em cada dia era feita uma observação próxima ao meio-dia, girando o interferômetro no sentido anti-horário, e outra perto das seis horas da tarde, quando o sentido de giro era revertido. A última medição das 18 h foi feita no dia 12, e não no dia 11, no entanto (MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 340).

313 O prédio principal da vizinha Case School of Applied Science, onde ficava o laboratório de Michelson, foi vítima de um incêndio logo antes da realização do experimento (SWENSON, 1972, p. 91).

O resultado do experimento foi de que os deslocamentos observados não ultrapassaram 1% da largura das franjas, equivalendo à resolução do aparelho e portanto da ordem do erro experimental. Isto é, para todos os efeitos o resultado obtido por Michelson e Morley era *compatível* com um resultado nulo. Porém não foi exatamente esta a conclusão dos autores ao encerrar seu artigo. Em vez disso, eles escreveram esperançosamente que

(...), a velocidade da Terra com relação ao éter é provavelmente menor que um sexto da velocidade orbital da Terra, e certamente menor que um quarto.

(...) O experimento será repetido portanto em intervalos de três meses, e assim toda a incerteza será evitada³¹⁴ (MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 341) [vii12].

Pois havia ainda a questão da composição dos movimentos da Terra e do Sistema Solar em relação ao éter, uma eterna incógnita³¹⁵. Os resultados obtidos por Michelson e Morley permitiram algumas possíveis interpretações, de naturezas muito diferentes.

314 O que, aliás, nunca foi realizado a contento (MILLER, 1933, p. 206; SWENSON, 1972, p. 94), a despeito do que escrevem alguns autores (por exemplo, ZHANG, 1997, p. 140, que acredita que Michelson e Morley repetiram o experimento seis meses mais tarde). As razões para o abandono do programa podem estar relacionadas de um lado à crença dos autores de que o estudo preliminar (que acabou se transformando no trabalho “integral”) já era suficientemente concludente por não encontrar o efeito esperado, e de outro, talvez mais relevante, ao interesse despertado em ambos, e especialmente em Michelson, pela ideia do uso metrológico do interferômetro, projeto para o qual se voltaram praticamente imediatamente após o “fim” dos trabalhos com o experimento do vento de éter (*cf.* capítulo 9). Some-se a isso o envolvimento de ambos com a organização do encontro da Associação Estadunidense para o Avanço da Ciência (AAAS, da sigla em inglês), a se realizar justamente em Cleveland no ano seguinte (SWENSON, 1972, pp. 94-97).

315 Michelson e Morley propunham, no entanto, num suplemento do artigo, algumas ideias para medir em primeira ordem (v/c) o movimento da Terra em relação ao éter, algumas aparentemente partindo do mesmo raciocínio pelo qual os autores explicaram geometricamente o deslocamento angular da frente de onda que seguia o braço perpendicular do interferômetro quando se considerava o movimento do divisor de feixe. Michelson e Morley também perceberam que estes métodos envolviam percursos de “ida e volta” (*two-way*) para a luz, mas que avanços tecnológicos poderiam em tese permitir testes do tipo “apenas de ida” (*one-way*), uma distinção relevante no devir da teoria da relatividade no século XX. Além destes, Michelson e Morley lembravam três métodos astronômicos em que se depositava alguma esperança em função dos avanços obtidos com a então recente aplicação de métodos fotográficos às medidas astronômicas.

Na primeira delas, a Terra “arrastaria” o éter consigo em seu movimento, e portanto localmente não seria possível determinar, de sua superfície, a velocidade da Terra em relação ao éter do espaço; esta interpretação, é claro, significava um retorno ao arrasto total do éter proposto por Stokes. Esta havia sido a hipótese favorecida por Michelson na conclusão de seu artigo de 1881, porém agora ele e Morley pareciam mais cautelosos em suas conclusões, pois lembravam que

Stokes havia dado uma teoria da aberração que supõe o éter na superfície da Terra em repouso em relação a ela, requerendo apenas, suplementarmente, que a velocidade relativa tenha um potencial; mas Lorentz mostra que essas condições são incompatíveis (MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 341)[vii13].

Além disso, mesmo uma solução alternativa aventada por Lorentz parecia desacreditada pelos resultados experimentais:

Lorentz então propõe uma modificação que combina algumas ideias de Stokes e de Fresnel, e supõe a existência de um potencial, junto com o coeficiente de Fresnel. Se agora fosse legítimo concluir do presente trabalho que o éter está em repouso em relação à superfície da Terra, de acordo com Lorentz não poderia haver um potencial de velocidade, e sua própria teoria fracassa (MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 341)[vii14].

Michelson e Morley sugerem ao final do artigo³¹⁶, no entanto, que talvez o efeito do vento de éter pudesse começar a ser sentido a uma certa distância da superfície da Terra, e que talvez uma repetição do experimento no alto de uma montanha já produzisse resultados distintos dos obtidos pela dupla em Cleveland:

(...) não é impossível que mesmo a distâncias moderadas acima do nível do mar, por exemplo no cume de uma montanha isolada, o movimento relativo [entre o éter e a Terra] seja perceptível em um aparato como o utilizado neste experimento. Talvez se o experimento for algum dia tentado nestas circunstâncias a cobertura deva

316 Ao início da seção final, intitulada “Suplemento”, para sermos mais exatos.

ser de vidro, ou deva ser removida³¹⁷ (MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 341) [vii15].

Posteriormente surgiram outras hipóteses para explicar os resultados “nulos” do experimento. Uma delas, na contra-mão de décadas de domínio da teoria ondulatória³¹⁸, foi a hipótese de emissão (isto é, corpuscular) de 1908 do jovem³¹⁹ físico suíço Walther Ritz (1878-1909), segundo a qual a velocidade da luz dependeria da velocidade da fonte (MARTÍNEZ, 2004).

No entanto, talvez a mais controversa interpretação dos resultados de Michelson e Morley tenha sido a da *contração de FitzGerald-Lorentz*, de que os instrumentos de medição se contrairiam (isto é, se deformariam) no sentido do movimento *exatamente* na proporção necessária para compensar o efeito do movimento sobre a propagação do sinal. Embora proposta em 1892³²⁰ (LORENTZ, 1892), apenas a partir de 1895 com a(s) teoria(s) do elétron de Lorentz ela se inseriria matematicamente num quadro conceitual coerente³²¹ (LORENTZ,

317 Programa que seria eventualmente levado a cabo por Dayton Miller décadas depois (ver seção 7.5).

318 Porém num indício claro de que um modelo corpuscular da luz nunca saiu de cena completamente, permitindo compreender como a abordagem corpuscular de Einstein para o efeito fotoelétrico em 1905, não sendo o único precedente, pôde encontrar respaldo heurístico. Outro sinal é que Michelson e Morley, na abertura de seu artigo de 1887, ainda julgavam pertinente demonstrar como a teoria da emissão se via em maus lençóis para dar conta da imunidade da aberração estelar ao preenchimento de um telescópio com água (MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 333, ver especialmente a nota de rodapé).

319 Ritz contraíra uma doença respiratória, possivelmente tuberculose, em 1900 e viria a falecer nove anos depois, com apenas 31 anos.

320 E, depois se soube, previamente em 1889 por FitzGerald, numa carta ao editor da revista *Science* (FITZGERALD, 1889). Os detalhes deste episódio podem ser lidos em duas referências já clássicas (BORK, 1966; BRUSH, 1967), e uma diferenciação sutil entre as duas hipóteses pode ser encontrada em (BROWN, 2001).

321 O físico e matemático irlandês Joseph Larmor (1857-1942) também desenvolveu uma teoria do elétron, independente de Lorentz, que em 1897 também previa o resultado nulo do experimento de Michelson-Morley como uma consequência do efeito de contração pelo efeito sobre as forças de coesão de origem elétricas (MORUS, 2005, pp. 278-279). Outra teoria do elétron com preocupação semelhante era devida a

1899a; McCORMMACH, 1970), e talvez por isso tenha sido considerada tradicionalmente uma hipótese *ad hoc* (SWENSON, 1970, p. 60).

Finalmente, em 1905 Einstein propôs a teoria da relatividade restrita (EINSTEIN, 1905), para a qual o resultado do experimento de Michelson e Morley era uma consequência natural do postulado da constância da velocidade da luz para todos os referenciais inerciais, o que configurava uma nova e radical interpretação³²².

Diante destas dificuldades, torna-se mais fácil compreender a analogia proposta por Kelvin, pela qual o fracasso das teorias clássicas do éter em explicar o resultado do experimento de Michelson-Morley era comparado a uma “nuvem negra” no céu da física (KELVIN, 1904, especialmente pp. 486 a 491)³²³.

Alfred Heinrich Bucherer (1863-1927) (MARTINS, 2005, p. 20).

322 A possibilidade de verificação experimental do segundo postulado da teoria da relatividade, *i. e.*, da constância da velocidade da luz, foi analisada tanto nos Estados Unidos por Howard P. Robertson (1903-1961) quanto na Rússia por G. B. Malykin (ROBERTSON, 1949 e MALYKIN, 2004, respectivamente).

323 Incidentalmente, a única outra “nuvem negra” que lorde Kelvin via no céu azul da física tinha a ver com as previsões do teorema de equipartição de energia que iam de encontro a alguns resultados experimentais, problema cujo estudo levaria, no devido tempo, à mecânica quântica. É difícil evitar o comentário de que uma parte significativa dos físicos do século XX, com a vantagem da visão histórica, faria melhor em substituir o escárnio e ironia que por vezes reserva à análise de Kelvin por uma admiração pela clareza com que o cientista britânico percebia, “em tempo real”, o conjunto das grandes questões teóricas e experimentais da física de sua época e suas interrelações. Não se deve acreditar, no entanto, que os experimentos a respeito do vento de éter formaram o único lastro experimental da teoria da relatividade, que também é devedora de uma série de experimentos relacionados às variações de massa das partículas prevista pela teoria (por exemplo, ver LACKI e KARIM, 2005, e, para uma discussão mais geral, ZHANG, 1997).

7.4 O Interferômetro de Michelson

Um importantíssimo bônus ganho com os experimentos de Michelson (e, posteriormente, Morley) para detectar o vento de éter foi a invenção e aperfeiçoamento, no processo, do interferômetro de Michelson. Seu autor receberia o Nobel de física de 1907, tanto pela invenção em si quanto por suas aplicações em espectroscopia e metrologia (*cf.* capítulo 9) – e não pelo experimento de Michelson-Morley, como muita gente acredita³²⁴ (por exemplo, CREASE, 2011, p. 131).

Tanto quanto o interferômetro de Jamin, o interferômetro de Michelson permitia o uso de uma fonte extensa, e seus braços perpendiculares permitiam uma salutar separação entre os feixes interferentes, deixando espaço e flexibilidade para a manipulação de quaisquer elementos num braço sem maiores efeitos danosos ao feixe que se propagava no outro. Além disso, o interferômetro de Michelson era essencialmente simples, necessitando de não mais que dois espelhos e um divisor de feixe para sua montagem³²⁵. Mais do que isso, o interferômetro de Michelson era fundamentalmente um conceito (Frercks provavelmente diria um conjunto de “dispositivos imateriais” dispostos sempre de forma a atingir um objetivo semelhante (FRERCKS, 2007)), flexível o suficiente para permitir sua realização de diversas maneiras, e Michelson mostrou-se bastante criativo para imaginar diversas configurações possíveis para as mais variadas aplicações. Além de sua simplicidade e versatilidade, o aparelho

324 A propósito, eis aí o primeiro de diversos mitos amplamente propagados envolvendo o experimento. Veremos uma diversidade de outros na seção 7.5.

325 Ernst Mach argumenta ter tido a ideia do interferômetro de Michelson independentemente ao buscar uma solução experimental para o estudo de ondas no ar, porém abandonou-a quando o interferômetro de Jamin mostrou-se suficientemente adequado para aqueles estudos (MACH, 1926, p. 181).

apresentava ainda grande estabilidade, o que o recomendava para múltiplas aplicações em que medições extremamente acuradas eram necessárias.

Estas características do instrumento e a grande fama e reconhecimento científico alcançados por Michelson e seus trabalhos em óptica³²⁶ fizeram com que o interferômetro de Michelson viesse a gozar de grande popularidade, tornando possível mesmo afirmar que “[o] interferômetro de Michelson (...) é provavelmente o instrumento mais amplamente utilizado em interferometria” (STEEL, 1967, p. 8). De fato, é possível encontrar o interferômetro de Michelson aplicado a pesquisas em espectroscopia, metrologia (*cf.* capítulo 9), medição de diferenças diminutas no índice de refração de substâncias, análise de vibrações, e mais recentemente na detecção de ondas gravitacionais e na busca de planetas em estrelas próximas (*cf.* capítulo 10), e portanto “é provavelmente correto dizer que nenhum outro instrumento afetou mais profundamente a física moderna que o interferômetro de Michelson” (TOLANSKY, 1955, p. 84).

A forma das franjas na saída do interferômetro depende diretamente da inclinação relativa entre os dois espelhos. Quando ambos estão perfeitamente perpendiculares um ao outro, porém a distâncias ligeiramente distintas do semi-espelho, as imagens virtuais produzidas por cada um estarão ao longo do eixo óptico do instrumento, uma atrás da outra, e portanto as franjas aparecerão como círculos concêntricos.

326 Inicialmente os trabalhos em aplicações metrológicas, e posteriormente, talvez contrariamente ao apreço de seu autor, o próprio experimento de Michelson-Morley.

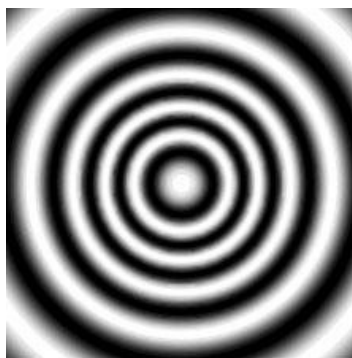


Fig. 7.10 – Franjas circulares num interferômetro de Michelson com os espelhos perfeitamente perpendiculares, iluminado com luz monocromática.

No caso de desvio da perpendicularidade, as imagens não mais estarão alinhadas com o eixo óptico do interferômetro, e portanto um observador verá seções hiperbólicas claras e escuras, tão mais retas quanto mais equidistantes os espelhos estiverem do semi-espelho, e tão mais largas quanto mais paralelos estiverem entre si³²⁷.

327 Para uma análise mais detalhada da formação e natureza das franjas de interferência no interferômetro de Michelson, ver JENKINS e WHITE, 1976, pp. 271-279. Para uma discussão sobre a exatidão alcançável com o instrumento, ver STEEL, 1967, pp. 133-135.

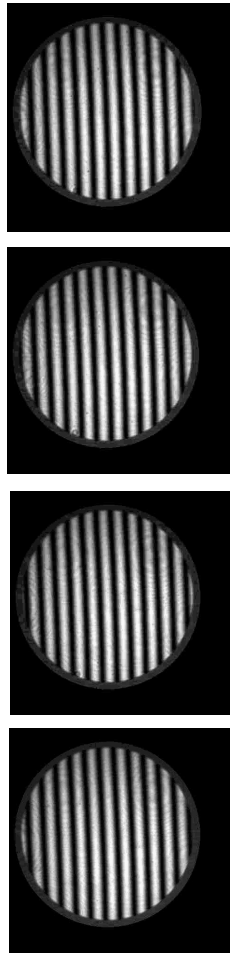


Fig. 7.11 – Efeito do deslocamento progressivo de um dos espelhos do interferômetro de Michelson quando os espelhos *não* estão perfeitamente perpendiculares um ao outro. Repare o deslocamento das franjas (neste caso) para a direita.

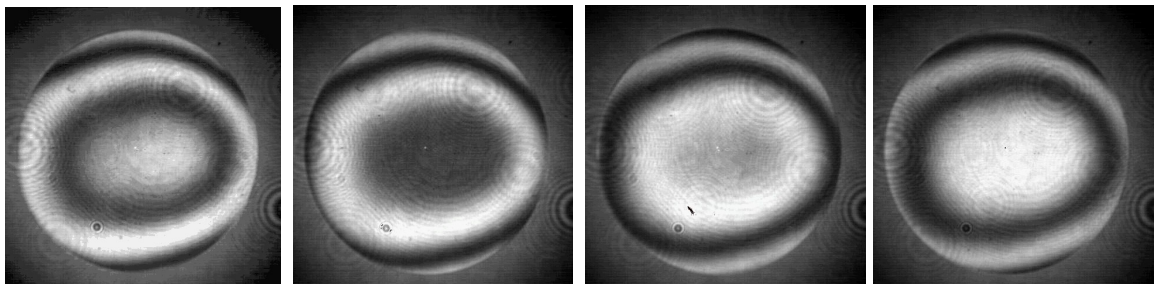


Fig. 7.12 – Efeito do deslocamento progressivo de um dos espelhos do interferômetro de Michelson quando os espelhos estão perfeitamente perpendiculares um ao outro. Note-se (neste caso) a convergência das franjas para o centro do padrão.

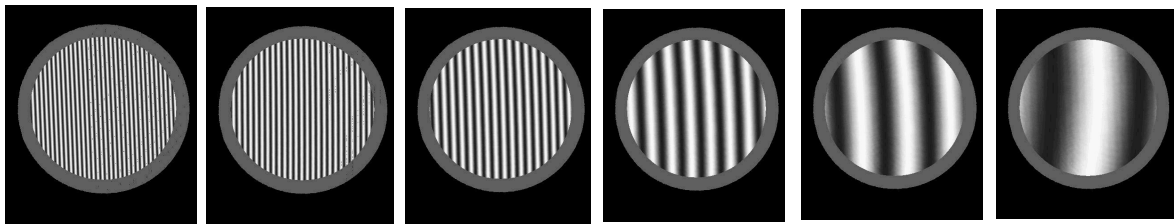


Fig. 7.13 – Efeito da inclinação progressivamente (neste caso) menor dos espelhos do interferômetro de Michelson um em relação ao outro. Quanto mais perto de estarem perpendiculares, mais próximas as imagens virtuais da fonte, e mais largas as franjas – e vice-versa.

7.5 A Base Empírica da Teoria da Relatividade

Há uma polêmica duradoura, acirrada recentemente pela efeméride do centenário do *annus mirabilis* de Einstein, no que diz respeito ao papel dos dados observacionais e experimentais no processo que levou ao triunfo da teoria da relatividade nas primeiras décadas do século XX, um dos eventos mais estudados da história da física (ver por exemplo ABIKO, 2003; DARRIGOL, 2005; KATZIR, 2005; MILLER, 1981; JANSSEN e STACHEL, 2004; HOLTON, 1969; WHITTAKER, 1910; entre outros). A situação é tão confusa que podemos encontrar num mesmo texto dois pontos de vista contraditórios a respeito, em particular em relação ao experimento de Michelson-Morley. Uma ilustração disso ocorre no autor estadunidense Morris H. Shamos, que se num momento afirma que,

diferentemente da sequência de eventos usual na física, *a relatividade não se baseou primariamente em experimentos (...)*; em vez disso foi o resultado de um exame crítico de princípios físicos bem conhecidos e amplamente aceitos (SHAMOS, 1959, p. 315, grifos nossos)[vii16],

a seguir defende que “o segundo postulado *essencialmente afirma um fato experimental*, qual seja,

o resultado [do experimento] de Michelson-Morley” (SHAMOS, 1959, p. 318, grifos nossos)³²⁸.

O que Einstein efetivamente escreveu em seu artigo de 1905 foi que

[e]xemplos de um tipo semelhante³²⁹, tais como as malsucedidas tentativas de substanciar o movimento da Terra em relação ao “meio luminífero”³³⁰, nos levam à suposição de que não apenas na mecânica, mas também na eletrodinâmica, nenhuma propriedade de fatos observados corresponde ao conceito de repouso absoluto; mas que para todos os sistemas de coordenadas para os quais as equações mecânicas valem, as equações eletrodinâmicas e ópticas também valem, como já foi demonstrado para magnitudes de primeira ordem. Na sequência nós fazemos essa suposição (que chamaremos daqui para a frente de Princípio da Relatividade) e introduzimos uma suposição subsequente (...) de que a luz se propaga no espaço vazio com uma velocidade c que é independente da natureza do movimento do corpo que a emite. (...) A introdução de um “éter luminífero” mostrar-se-á supérflua, (...). (EINSTEIN, 1905, *apud* SHAMOS, 1959, p. 319)[vii17],

e mesmo posteriormente não foi muito claro a respeito do papel desempenhado pelos dados experimentais na gênese da teoria da relatividade, por vezes se contradizendo ou alimentando ambiguidades (*cf.* STACHEL, 1982). Na maioria das vezes em que inquirido a respeito em anos subsequentes, Einstein afirmou que a gênese da teoria da relatividade deveria-se fundamentalmente à análise da assimetria entre as equações de Maxwell e a mecânica, como na primeira citação de Shamos, e que a *aberração* da luz estelar e o *experimento de Fizeau* do arrasto do éter pela água em movimento haviam sido “suficientes” como dados experimentais e

328 O mesmo texto perpetra ainda alguns outros erros grosseiros, como atribuir a Michelson e Morley a realização do “experimento *crucial*” em 1881 [!], bem como dizer que o resultado deste experimento *portanto* colocou em xeque todo o conceito de um éter (SHAMOS, 1959, p. 317).

329 À impossibilidade de detectar movimentos absolutos – Einstein se referia anteriormente à equivalência entre a corrente induzida pelo movimento de um ímã através de uma bobina em repouso e vice-versa.

330 Isto é, o éter. Shamos vê aqui uma referência ao experimento de Michelson-Morley, o que nos parece razoável (embora não a única interpretação possível). A referência a seguir sobre a impossibilidade de detectar o movimento da Terra em relação ao éter em primeira ordem deve se referir às demonstrações *matemáticas* (não experimentais) de que apenas efeitos de segunda ordem seriam mensuráveis (SHAMOS, 1959, p. 319).

observacionais relevantes (SHANKLAND, 1963 *apud* FERRARO e SFORZA, 2004, p. 1).

Entretanto, em uma palestra célebre na universidade de Leiden em 1920 (EINSTEIN, 1920), Einstein teria sugerido um papel mais relevante para as teorizações de Lorentz, e portanto indiretamente para o experimento de Michelson-Morley. Também numa de suas locuções mais famosas, desta vez em Kyoto, no Japão, em 1922, Einstein teria afirmado que quando estudante teria tomado conhecimento do “experimento de Michelson” (*apud* KOSTRO, 2000, p. 16), e que teria intuído que, a se partir de seu resultado como um fato, a ideia de um movimento da Terra em relação ao éter era um erro, e este pensamento teria sido “a primeira estrada que me levou ao que agora chamamos de princípio da relatividade especial” (*apud* van DONGEN, 2009). Porém, tanto num caso quanto no outro, há questões externas a se considerar³³¹.

De toda maneira não há como negar ao experimento de Michelson-Morley, se não um papel inspirador, um papel fundamental na difusão e aceitação da teoria da relatividade, em especial nos Estados Unidos, onde, à época, ainda mais do que na Europa, grassava uma visão eminentemente empírica de ciência, e portanto uma nova teoria científica não poderia ser aceita como tal sem uma “base empírica” que lhe desse lastro³³². Como a segunda citação de

331 Por exemplo, no caso da palestra de Kyoto, é preciso considerar que todos os registros que se tem do evento decorrem da tradução das transcrições do alemão para o japonês feitas por um dos presentes (van DONGEN, 2009). Quanto ao seminário de Leiden, *alma mater* do já falecido Lorentz, a quem Einstein “admirava e amava mais do que qualquer outra pessoa que conheceria” (COHEN, 2005, p. 222), é possível que Einstein tenha feito concessões poéticas – por exemplo se permitido referir-se ao “éter da relatividade geral” (EINSTEIN, 1920). A ambiguidade neste sentido é ainda ampliada por outros eventos (van DONGEN, 2009). Uma compilação de menções de Einstein à questão entre 1905 e 1922 é apresentada e discutida por J. Stachel num interessante artigo (STACHEL, 1982).

332 E por isso afirmações como a de Minkowski, numa palestra em 1909, de que “as visões de espaço e tempo que eu gostaria de apresentar a vocês *brotaram do solo da física experimental*, e aí reside sua força”, ou análises

Shamos ao início desta seção deixa claro, o experimento de Michelson-Morley proveu justamente esta base empírica. Na primeira metade do século XX, marcada por um nacionalismo pronunciado, o fato do experimento ter sido realizado nos Estados Unidos, e por dois cientistas estadunidenses, bem como o asilo e a recepção de Einstein nos Estados Unidos já com a pecha (amplificada posteriormente pela propaganda estadunidense) de celebridade mundial, podem também ter ajudado a elevar o *status* tanto da teoria quanto do experimento, criando toda uma mitologia de pré-concepções e falsas histórias a respeito, por vezes mesmo contraditórias.

Por exemplo, dois mitos contraditórios que estranhamente parecem coexistir até hoje em parte da comunidade científica³³³ são, respectivamente, o de que o experimento de Michelson-Morley, com sua “comprovação” da constância da velocidade da luz, foi a principal inspiração para a criação da teoria da relatividade restrita (mito 1), e o de que Einstein sequer estava ciente do experimento de Michelson-Morley quando da criação da teoria, que portanto não deveu nada àquele resultado (mito 2). Ambas as versões parecem ser exageradas e incorretas. A despeito da ambiguidade de algumas declarações posteriores de Einstein, o principal raciocínio que levou Einstein a formular a teoria da relatividade parece ter sido mesmo de natureza heurística, relacionado portanto às questões de simetria de referenciais (ABIKO, 2003). No entanto também não parece ser possível que Einstein desconhecesse por completo os resultados obtidos por Michelson e Morley, não apenas pela referência indireta

como a de J. J. Laub, em seu artigo “*Alicerces Experimentais do Princípio da Relatividade*”, do ano seguinte (*apud* KOSTRO, 2000, pp. 42 e 44, grifos nossos), parecem fazer sentido.

333 Isto no entanto pode ser decorrente justamente de duas visões epistemológicas distintas, que atribuem diferentes papéis aos resultados experimentais na formulação de modelos científicos.

que parece fazer no texto do artigo de 1905, mas também porque em particular Lorentz fazia uma análise detalhada do experimento em sua teoria do elétron, desenvolvida a partir de 1892, e é inegável que Einstein conhecia bastante bem a obra de Lorentz³³⁴.

Associado aos dois primeiros mitos há por vezes uma menção ao experimento de Michelson-Morley como um *experimentum crucis* (mito 3). Isto talvez decorra menos de uma incorreção histórica do que de um erro interpretativo do que venha a ser um *experimentum crucis*. Ao acreditar na relevância do experimento de Michelson-Morley para a teoria da relatividade, seja como inspiração ou como fator de aceitação, é fácil defender que o mesmo foi um experimento “crucial”³³⁵ para o desenvolvimento da teoria. Entretanto, tradicionalmente um *experimentum crucis* é, necessariamente, um experimento proposto originalmente para distinguir entre duas teorias rivais que para ele produzem previsões distintas³³⁶, e o experimento de Michelson-Morley não visava distinguir entre duas teorias rivais, mas sim detectar um efeito previsto por uma teoria já estabelecida. Ao contrário, a sua falha em detectar o efeito previsto justamente criou uma espécie de vácuo explicativo não preenchido por teoria alguma durante pelo menos sete anos. Aqueles que eventualmente julgam o experimento de Michelson-Morley como um *experimentum crucis* propriamente fazem-no

334 Havia outros textos acessíveis a Einstein que também mencionavam os resultados de Michelson e Morley, por exemplo um artigo de autoria do físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928) mencionado por Einstein numa carta de 1899 para sua então noiva Mileva Marić (1875-1948). Este e muitos outros detalhes referentes à questão encontram-se bem descritos por Jeroen van Dongen em seu artigo (DONGEN, 2009).

335 Apenas no sentido de “fundamental” ou “muito importante”. Uma discussão muito mais aprofundada sobre a “crucialidade” do experimento de Michelson-Morley para a relatividade pode ser lida em (HOLTON, 1969).

336 Como por exemplo o experimento de Foucault que mostrou que a velocidade da luz na água era *menor* do que no ar, distinguindo entre as previsões contraditórias da teoria da emissão e da teoria ondulatória em favor da última (FOUCAULT, 1853).

acreditando (muito desinformadamente) que seu resultado distinguira entre a teoria da relatividade e alguma teoria de um éter imóvel, em que a velocidade da luz medida dependia da velocidade do observador. Nada pode estar mais distante da verdade, obviamente, já que o advento da teoria da relatividade restrita, que previa (ou se baseava em, dependendo da interpretação) um resultado nulo para o experimento, só aconteceria dezoito anos depois da realização do experimento³³⁷.

Outro mito relacionado proximamente ao mito do papel fundamental do experimento de Michelson-Morley na gênese da relatividade é o de que ele teria sido reconhecido *instantaneamente* como um resultado empírico fundamental (mito 4). Os possíveis impactos dos resultados do experimento de Michelson-Morley foram eclipsados pelos resultados dos experimentos de Hertz comprovando a existência de ondas eletromagnéticas, iniciados no mesmo ano (1887). Havia portanto, paradoxalmente, novos dados experimentais corroborando (Hertz) e colocando em xeque (Michelson-Morley) o modelo da teoria ondulatória da luz baseada em um éter com propriedades eletromagnéticas e em sua relação com a matéria ponderável (SWENSON, 1972, p. 101-102). O reconhecimento da importância do experimento de Michelson-Morley veio apenas com as tentativas de conciliar seu resultado com um modelo teórico, a partir dos esforços de lord Kelvin, Lorentz, FitzGerald e outros alguns anos mais tarde, e apenas com o triunfo da teoria da relatividade seria alçado ao panteão dos “grandes experimentos” dignos de nota nos textos didáticos de física.

337 Há portanto um problema de causalidade nesta interpretação, o que ironicamente viola justamente o segundo postulado da relatividade! Entretanto esta interpretação equivocada pode ter sua origem na importância que tiveram as *reproduções* do experimento de Michelson-Morley em anos posteriores à divulgação da teoria da relatividade.

Talvez o mito mais difundido seja, no entanto, o de que o experimento de Michelson-Morley teria “provado” que o éter não existia (mito 5). A teoria do elétron de Lorentz, por exemplo, dava conta do resultado do experimento de Michelson-Morley a partir do efeito hoje conhecido como “contração de FitzGerald-Lorentz”. O efeito é considerado comumente (mito 6) uma hipótese *ad hoc* introduzida na teoria para “salvar os fenômenos”, *i. e.*, o resultado do experimento de Michelson-Morley. No entanto, na visão de Lorentz, e mesmo no relato sumário de Larmor da sugestão previamente feita por FitzGerald³³⁸, o efeito de contração do comprimento dos objetos rígidos não era *ad hoc* estritamente, mas decorria da compreensão de que a dimensão de um corpo deveria claramente depender das forças (de coesão) eletromagnéticas entre as partículas que o constituíam, forças estas que estariam sujeitas ao estado de movimento do éter que as propagava.

Tornou-se costumeiro, largamente devido à história de Sir Edmund Whittaker, encarar a hipótese da contração de FitzGerald-Lorentz como uma interpretação estritamente *ad hoc* do experimento de Michelson [*sic*]. Não se pode negar que foi isto que ela se tornou depois que a teoria da relatividade especial atraiu seguidores. Depois de 1905 tornou-se claro que a sugestão avançada por FitzGerald e Lorentz tinha o efeito de uma dispensa especial das leis da mecânica de Newton. Mas em 1895, e ainda mais quando primeiramente sugerida, era ainda bastante possível que a contração material pudesse ser trabalhada nas teorias mecânicas clássicas (SWENSON, 1972, p. 110)[vii18].

Não havia portanto como concluir do experimento de Michelson-Morley que o éter não existia.

Nem era este o objetivo do experimento, conforme muitos acreditam (mito 7). Aliás, nada mais longe da verdade. Michelson (ou Morley) nunca deixou de acreditar na existência real do éter luminífero, e maldisse por décadas a polêmica gerada pelo resultado do

338 Daí o nome “contração de FitzGerald-Lorentz”.

experimento, deixando explícito seu constrangimento em ser associado à destituição do éter.

Há também quem acredite que a teoria da relatividade restrita foi imediatamente aceita pela comunidade dos físicos já a partir de sua publicação, em 1905 (mito 8). Claro que as coisas não se passaram assim³³⁹. A teoria da relatividade restrita era motivo de debates até pelo menos 1919, quando a previsão da teoria da relatividade *geral*³⁴⁰ quanto à curvatura dos raios luminosos durante um eclipse do Sol foi bombasticamente verificada pelo astrônomo britânico Arthur Eddington (1882-1944) e sua equipe em uma expedição dupla à cidade de Sobral, no sertão cearense, e à ilha de Príncipe, em São Tomé e Príncipe, na costa ocidental da África. Apenas a partir daí pode-se dizer que as teorias da relatividade de Einstein passaram a fazer parte do *mainstream* da física³⁴¹.

Um outro mito relacionado é o de que o experimento de Michelson-Morley teria sido desprezado a partir da aceitação da teoria da relatividade restrita (mito 9), o que não é verdade de nenhum ponto de vista. Do ponto de vista dos defensores da relatividade, longe de ser considerado um resultado supérfluo e óbvio, o experimento foi muito utilizado como argumento empírico a favor da teoria. Do ponto de vista dos partidários do éter, tampouco o experimento foi arquivado. Novas versões foram postas em prática levando em conta variações de altitude e efeito das paredes da sala sobre o éter, por exemplo (mais a respeito ainda nesta seção).

Ao ser apresentada pela primeira vez à teoria da relatividade, a maioria dos físicos fica com a impressão de que o experimento de Michelson-Morley foi o *único* experimento

339 Como aliás, via de regra, nenhuma teoria científica é aceita acriticamente e instantaneamente.

340 Desenvolvida por Einstein alguns anos antes.

341 E mesmo assim com uma certa reserva, dado que a análise dos dados de Eddington foi sujeita a críticas.

realizado para tentar medir os efeitos do “vento de éter” (mito 10). Poucos têm a sorte de ouvir falar na série de experimentos de outros tipos tentados com o mesmo propósito, anteriores e posteriores, *viz.*, o experimento de Fizeau da rotação do plano de polarização de um raio luminoso ao atravessar um material refringente em movimento³⁴² (FIZEAU, 1860); o experimento de Fizeau da esperada variação de intensidade percebida no calor radiante de uma fonte contra e a favor do movimento do éter (ver FRERCKS, 2007, pp. 95-97, ou ACLOQUE, 1984); os experimentos de Rayleigh e Brace tentando detectar a birrefringência induzida em materiais ópticos comuns em função do vento de éter (RAYLEIGH, 1902; BRACE, 1904 *apud* SWENSON, 1972) ou de variações do efeito Faraday ou do efeito Kerr (BRACE, 1905); o experimento de Sagnac do deslocamento das franjas num interferômetro cíclico em rotação³⁴³ (SAGNAC, 1913a e 1913b); o experimento da força induzida sobre um capacitor elétrico carregado em movimento de Trouton-Noble³⁴⁴ (TROUTON e NOBLE, 1903), sugerido inicialmente por FitzGerald; o experimento Kennedy-Thorndike, uma versão modificada do experimento de Michelson-Morley para testar a dilatação temporal (KENNEDY e THORNDIKE, 1932); entre outros.

Um dos experimentos mais interessantes desta lista, e que também fez uso de uma

342 Este, a propósito, um experimento de resultado *positivo*, que no entanto nunca foi reproduzido nas repetições do experimento, e portanto reputou-se-o a um erro experimental qualquer da parte de Fizeau. Apesar disso, houve sempre quem considerasse o efeito real (ver, por exemplo, DRYSDALE, 1934, p. 835).

343 Outro experimento com resultado positivo. Mais a respeito na seção 7.6.

344 Este programa de pesquisa teve continuidade com o experimento de Trouton-Rankine, em que se buscou medir o efeito da contração de FitzGerald-Lorentz na variação da resistência elétrica de resistores espirais configurados numa ponte de Wheatstone que era girada de 90° (TROUTON e RANKINE, 1908). Curiosamente, um dos objetivos de Trouton com os experimentos era não apenas detectar o efeito, mas averiguar “a possibilidade aventada por Larmor de que [uma quantidade] inexaurível [de] energia pudesse ser minerada a partir do éter desta maneira” (MORUS, 2005, p. 279).

montagem interferométrica sofisticada, foi o experimento de Lodge do arrasto do éter por discos massivos em rotação (LODGE, 1909). Conforme o relato de Lodge, o experimento foi motivado pela situação aparentemente paradoxal causada pela certeza com que o efeito da aberração estelar era considerado e pela incapacidade de se determinar experimentalmente o vento de éter³⁴⁵:

O balanço das evidências neste estágio parece favorecer o sentido de que não há um vento de éter, que o éter próximo à Terra está estagnado, [e] que a Terra carrega consigo todo ou a maior parte do éter circumvizinho – uma visão que, se verdadeira, deve complicar de maneira singular a teoria ordinária da aberração astronômica (...).

Porém agora coloque a questão de uma outra forma. *Pode* a matéria carregar o éter circumvizinho consigo quando se move? Abandone a Terra completamente; seu movimento é muito rápido porém incontrolável, e sempre dá resultados negativos. Tome um pedaço de matéria com o qual você pode lidar, e veja se ele puxa algum éter ao longo [de seu movimento].

Eis o experimento que me propus realizar, e que no curso dos anos 1891-97 realizei (LODGE, 1909, p. 70, grifo no original)[vii19].

O experimento consistiu basicamente em posicionar um interferômetro cíclico entre dois discos massivos que podiam ser postos em rotação em grande velocidade em um ou outro sentido. Lodge esperava que, caso o éter fosse arrastado total ou parcialmente pelo movimento da matéria maciça dos discos, um deslocamento das franjas de interferência poderia ser detectado (ver figura 7.14 a seguir). De fato, inicialmente Lodge observou um deslocamento das franjas que parecia acusar um arrasto equivalente à metade da velocidade dos próprios discos, porém ao reverter o sentido do movimento de giro dos discos o deslocamento das franjas manteve-se para a mesma direção, indicando portanto um efeito espúrio, que Lodge

345 De onde se vê que Lodge desconhecia ou, o que é mais provável, já desconsiderava a explicação adiantada por Stokes para a aberração por um éter completamente arrastado em virtude das críticas de Lorentz e outros.

percebeu decorrer da intensa corrente de ar produzida pelo giro rápido dos discos. A seguir efeitos relacionados às variações de temperatura experimentados pelo interferômetro no processo também tiveram que ser considerados, e assim por diante, até que Lodge concluiu não ser capaz de observar nenhum efeito que ele pudesse atribuir legitimamente a um arrasto do éter pelos discos em movimento, mesmo que os discos fossem “auxiliados” através da aplicação de campos elétricos ou magnéticos³⁴⁶ (LODGE, 1909, pp. 70-87).

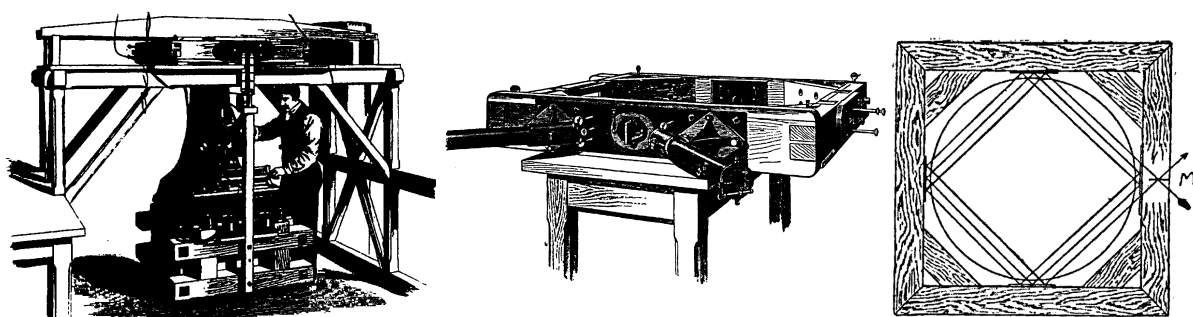


Fig. 7.14 – Experimento de Lodge. À esquerda, ilustração em corte transversal do motor com os discos e o interferômetro colocado entre os discos, logo acima do operador (ANDERSON, BILGER e STEDMAN, 1994, p. 977); ao centro, visão em perspectiva do interferômetro, com as lunetas para observação e para a introdução do feixe incidente (LODGE, 1909, p. 79); e à direita diagrama em visão superior do caminho óptico no interior do interferômetro, marcando a posição do semi-espelho M (LODGE, 1909, p. 72).

Novas montagens do experimento de Michelson-Morley foram realizadas ao longo de décadas, em particular porque, ao contrário do que a maior parte das pessoas acredita, o experimento de Michelson-Morley, conforme planejado, nunca foi completado (mito 11). Michelson e Morley se propuseram a medir os deslocamentos das franjas em diferentes épocas do ano para levar em conta possíveis combinações de movimentos que gerassem uma velocidade relativa entre a Terra e o éter muito baixa, mas, como vimos, estas outras medições nunca chegaram a ser realizadas. As únicas medições feitas foram as do meio-dia dos dias 8, 9

346 De fato o que Lodge concluiu foi que “a velocidade da luz entre duas placas de aço (...) não era aumentada nem diminuída por sequer 1/1.000” de seu valor (LODGE, 1909, p. 77).

e 11 de julho e as feitas nas noites de 8, 9 e 12 de julho.

O experimento de Michelson-Morley também não deu um resultado estritamente *nulo*. Michelson e Morley encontraram deslocamentos de 1% de franja, muito abaixo do valor esperado (~40%) e dentro da faixa de erro do próprio instrumento, mas ainda ligeiramente distinto de zero³⁴⁷.

Finalmente, há um mito implícito de que o experimento de Michelson-Morley foi um único experimento, realizado em 1887 (mito 12). Esta é uma compreensão errônea do experimento, como já vimos sem talvez chamar a devida atenção, pois, em primeiro lugar, o experimento fazia parte de um *programa* para testar as duas hipóteses de Fresnel sobre a natureza do éter: (1) a de que o éter no interior da matéria transparente era parcialmente arrastado com ela – testada pela reprodução do experimento de Fizeau por Michelson e Morley em 1886; e (2) a de que o éter livre (no espaço, por exemplo) era estacionário e a Terra se movia em relação a ele – esta, sim, testada pelo experimento de Michelson-Morley de 1887. Em segundo lugar, o experimento de Michelson-Morley de 1887 nada mais era que uma reprodução mais acurada do experimento realizado por Michelson em Potsdam em 1881. Ele foi ainda repetido através de versões aprimoradas ao longo das décadas seguintes, pelo menos até 1930, especialmente pelo próprio Michelson, por Morley e por Dayton Miller, no que constituem portanto uma espécie de continuidade do programa, levando o historiador da ciência Lloyd Swenson a se referir coletivamente a todas elas como “os experimentos de Michelson-Morley-Miller” (SWENSON, 1972).

347 Para sermos rigorosos devemos dizer portanto que os resultados encontrados por Michelson e Morley são *compatíveis* com um resultado nulo.

Acreditamos que a origem destes mitos³⁴⁸ pode ser explicada por pelo menos quatro fatores diferentes. Um primeiro fator pode ser resumido pelo velho adágio de que “quem conta um conto aumenta um ponto”. Ao recontar a sequência de eventos e arrolar os elementos relevantes nos processos que levaram a um evento na história da ciência, são introduzidos “erros” (ou “mutações”, para usar uma analogia biológica). Aqueles erros que fazem mais sentido para um determinado grupo ou num determinado contexto tendem a ser preservados e passados adiante, e um mecanismo de seleção entra em jogo. Um outro fator pode ser o fato de que a história é contada pelos vencedores. Dissidentes e defensores de teorias superadas são banidos ou calados ao perder espaço e reconhecimento científico³⁴⁹ e perde-se com o tempo o próprio sentido do debate que levou à aceitação da teoria vencedora, infantilizando a ciência precedente e deturpando a história da própria evolução da teoria corrente³⁵⁰. Um terceiro fator pode estar relacionado à tendência cultural de simplificar ao difundir, bem como à simplificação necessária aos objetivos pedagógicos de ensinar a nova teoria. Finalmente, uma mudança de paradigma tende a apagar as questões que explicariam as complexidades envolvidas na sua própria aceitação, especialmente as “mal resolvidas”³⁵¹ (KUHN, 1992).

De toda maneira, na teoria da relatividade o resultado “nulo” do experimento de

348 Num total de 13, se somarmos aos 12 listados aquele relacionado ao Nobel de Michelson citado na seção 7.4.

349 Ou simplesmente vêm a falecer e deixam a velha teoria sem ninguém para ensiná-la ou defendê-la, como percebeu Planck.

350 Eis aí um papel relevante para a história da ciência, portanto.

351 Tudo isso nos leva a tirar pelo menos três “lições” úteis para qualquer trabalho em história da ciência: (1) um experimento que “não dá certo” (como os estudantes costumam dizer) é tão importante quanto qualquer outro, senão mais importante – ele está na base da ideia de Kuhn de revolução científica; (2) quem conta uma história via de regra projeta em seus personagens suas próprias ideias para dar sentido aos eventos (a partir de seu próprio ponto de vista e contexto); (3) os eventos históricos são *sempre* muito mais complicados e complexos do que nos contam ou do que achamos.

Michelson-Morley era uma decorrência natural do postulado da constância da velocidade da luz. De fato, a teoria da relatividade obrigava qualquer experimento realizado com o objetivo de medir o “vento de éter” a falhar *necessariamente*. Daí a relativa preocupação manifestada por Einstein com o anúncio de um resultado positivo publicado por Dayton Miller em 1933 (MILLER, 1933), e que condensava vinte anos de pesquisa, em que o físico estadunidense determinava uma velocidade efetiva em relação ao éter da ordem de 208 km/s numa direção quase perpendicular ao plano da órbita da Terra³⁵². Estes resultados de Miller coroavam décadas de reproduções frustradas do experimento de Michelson-Morley, cada qual tentando endereçar uma objeção diferente aos detalhes do experimento.

No entanto, as duas primeiras remontagens do interferômetro de Michelson com propósitos relacionados aos do experimento de 1887 não buscaram exatamente refiná-lo ou mesmo buscar um vento de éter.

Em 1897-1898 Morley havia finalmente conseguido retornar a um tema de seu interesse, relacionado ao efeito que um campo magnético estático teria sobre a velocidade de propagação da luz. Unindo forças com Dayton Miller, Morley utilizou a montagem do interferômetro de Michelson, agora com um dos feixes atravessando um campo magnético estático ao longo de um dos braços. Nenhum deslocamento de franjas maior que 5% foi reportado, no entanto (MORLEY e MILLER, 1898 *apud* SWENSON, 1972, p. 117).

Uma outra “quase-reprodução” da montagem foi realizada também em 1897 pelo próprio Michelson, já em Chicago, com o objetivo de verificar se o arrasto de Stokes diminuía com a altura. Michelson fez instalar tubos ao longo do comprimento e da altura da parede do

352 Na direção da constelação do Dragão.

prédio do laboratório Ryerson, na universidade de Chicago, montando um enorme interferômetro de Michelson vertical alinhado no plano leste-oeste que tinha um braço vertical de 50 pés de altura (pouco mais de 15 m). Os tubos foram evacuados até uma pressão de 0,01 atm, para evitar os efeitos de diferenças de pressão com a altura, mas ainda assim Michelson foi forçado³⁵³ a concluir que “se existe algum deslocamento das franjas ele é menor que 1/20 de uma franja” e que portanto “a influência da Terra sobre o éter [deve ser] estendida até distâncias da ordem do diâmetro da Terra” (MICHELSON, 1897 *apud* SWENSON, 1972, pp. 117-118). Este experimento portanto não buscava detectar exatamente um vento de éter, mas um indício da “atmosfera” de éter que poderia ser arrastada junto com a Terra até uma determinada altura acima do chão³⁵⁴.

A primeira repetição *stricto sensu* do experimento de Michelson-Morley foi iniciada por Morley e Miller em 1902, portanto 15 anos depois do experimento original. A motivação para tanto parece estar ligada a críticas tanto à sensibilidade real do método interferométrico quanto às análises de Michelson e Morley³⁵⁵. A dupla construiu um grande interferômetro em

353 Muito a contragosto, pois lhe parecia que o resultado quase obrigava a abrir mão da hipótese de Stokes e retornar ao éter de Fresnel e a partir dele tentar salvar o resultado do experimento de Michelson-Morley (SWENSON, 1972, p. 118).

354 É no entanto curioso que Michelson se mostrasse frustrado ao não detectar um tal efeito tão próximo ao chão quando havia sugerido, ao final de seu artigo de 1887 com Morley, subir uma montanha alta para testá-lo. Ele possivelmente acreditava que a altura já seria suficiente para detectar um pequeno gradiente.

355 Em particular o físico australiano de origem escocesa William Sutherland (1859-1911) havia sugerido em 1898 que o deslocamento lateral do olho do observador ao alinhar a escala ou a mira de fio contra o padrão de franjas já causaria um erro maior do que o efeito esperado; posteriormente em 1902 o físico britânico William Mitchinson Hicks (1850-1934) reanalisou o experimento, questionando as modificações produzidas na frente de onda pelas superfícies refletoras em movimento (Hicks posteriormente se retrataria do artigo, reconhecendo um erro algébrico em sua análise). Ao mesmo tempo Lorentz dava cursos em Leiden especificamente sobre o problema do éter, em que o experimento de Michelson-Morley era escrutinado, e também Kelvin, Larmor e outros cientistas pareciam ainda intrigados com seus resultados. Morley e Miller

forma de cruz a partir de uma moldura em pinho com braços de 4,3 m de comprimento. Tendo trabalhado no interferômetro nos verões de 1902 e 1903, Morley e Miller concluíram que as dificuldades introduzidas pela impossibilidade de controlar adequadamente a temperatura e, especialmente, a umidade do ar eram insuperáveis e seus efeitos sobre a dilatação da moldura de pinho tornavam inviáveis quaisquer medições do tipo proposto com o aparelho. Passaram então a um projeto mais robusto em aço, encomendado ao engenheiro mecânico da Case School, F. H. Neff. Em 1904 o equipamento, que permitia um caminho óptico de mais de 64 m em cada braço, estava pronto, e em julho, quando a folga do calendário escolar coincidia com a época de efeito máximo da composição dos supostos movimentos do Sistema Solar e orbital e rotacional da Terra em relação ao éter, Morley e Miller anotaram dados de 260 voltas do interferômetro, para 16 azimutes cada. O objetivo inicial do experimento era testar possíveis variações do efeito de contração de FitzGerald-Lorentz para diferentes materiais, e por isso 8 longos bastões de pinho guardados por tubos de latão eram usados para definir a separação entre espelhos em posições opostas no interferômetro, de modo que “as distâncias entre os sistemas de espelhos opostos dependia apenas [do comprimento] dos bastões de pinho, enquanto todo o sistema óptico estava adequadamente apoiado pela cruz de aço”. Morley e Miller concluíram que não havia efeito distinguível, e que seu novo experimento apenas corroborava as conclusões de Michelson e Morley em 1887, em particular propondo-se repetir o experimento no alto de uma montanha para testar a diminuição do arrasto com a altitude (SWENSON, 1972, pp. 143-146).

estavam presentes à apresentação de Kelvin no Congresso Internacional de Física durante a exposição universal de Paris de 1900, e a seguir foram por ele “fortemente instados” a repetir o experimento de Michelson-Morley de 1887 com um instrumental mais poderoso (SWENSON, 1972, pp. 141-142).

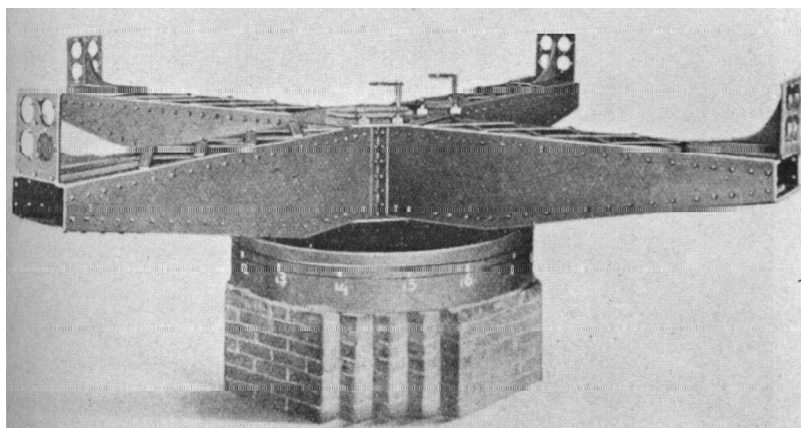


Fig. 7.15 – Interferômetro em aço utilizado por Morley e Miller em substituição à moldura de pinho no período 1903-1904. Note-se que o aparelho foi colocado sobre a mesma calha circular e base de tijolos maciços do experimento original³⁵⁶. Apenas a quantidade de mercúrio utilizada foi muito aumentada devido ao enorme peso (quase uma tonelada) da estrutura em aço (SWENSON, 1972, 5ª página do encarte entre as páginas 106 e 107).

Em 1905 Morley e Miller cumpriram a promessa e levaram seu interferômetro, agora já sem os (comprovadamente desnecessários) bastões de pinho, para uma colina a cerca de dois quilômetros ao sul do campus, e a uma altitude de 870 pés (265 m) acima do nível do mar³⁵⁷. Lá fizeram construir uma base de cimento para o interferômetro, em torno da qual ergueram um abrigo temporário com paredes de vidro por toda a volta na altura do aparelho³⁵⁸. A estabilidade da temperatura durante as observações, condição já difícil de obter nas condições controladas do laboratório no porão da Case, era um desafio no pequeno abrigo no alto do morro; a solução encontrada por Miller foi recobrir todo o caminho óptico por uma estrutura

356 Toda a parte óptica do experimento original já havia sido canibalizada, no entanto, e novos componentes (placa semi-espelhada, placa compensadora e 16 espelhos planos) tiveram que ser encomendados, desta feita a um técnico de origem francesa residente em Chicago, Octave Leon Petitdidier (1853-1918), possivelmente por indicação de Michelson (SWENSON, 1972, p. 144), com quem ele já havia colaborado no desenvolvimento do espectroscópio de *échelon*.

357 Embora apenas 300 pés (91 m) acima do lago Erie, nível aproximado em que foi realizado o experimento de 1887 (SWENSON, 1972, p. 151).

358 Uma das críticas metodológicas às versões anteriores do experimento era a de que, tendo sido realizadas no porão de um prédio, a alvenaria do entorno poderia alterar significativamente, ou mesmo impedir, o fluxo de éter.

de vidro³⁵⁹. Morley já estava com 67 anos, a apenas um ano de se aposentar, de modo que praticamente todo o trabalho de medição coube a Miller e alguns de seus alunos, enquanto Morley se consolava em tabular os dados à medida que lhe eram transmitidos. Até novembro, depois de computadas mais de 230 voltas do interferômetro, eles já tinham dados suficientes para apresentar um novo resultado nulo³⁶⁰ (SWENSON, 1972, pp. 151-152).

Talvez o assunto tivesse terminado aí, não fosse por toda a badalação em torno da teoria da relatividade. A partir da divulgação dos resultados da expedição de Eddington de 1919, e na esteira do fim da mais terrível guerra já vista até então, Einstein e a relatividade tornaram-se icônicos de uma “nova ordem” e uma nova visão de mundo, e uma onda de livros e palestras divulgando a relatividade, em todos os níveis e de todas as qualidades, empestearam o início da década de 1920, levando alguns cientistas mais diretamente envolvidos na questão e mais apegados à interpretação clássica, como Dayton Miller e Oliver Lodge, a lastimar a maneira pouco rigorosa como eram tratados o experimento de Michelson-Morley e o próprio conceito de éter na maioria destes relatos³⁶¹ (SWENSON, 1972, pp. 190-192; LODGE, 1921), ou pelo menos a endereçar o tema novamente (LORENTZ, 1921).

No verão de 1920, o então diretor do observatório de Mount Wilson, na Califórnia,

359 A montagem contava ainda com uma lâmpada de acetileno de bicicleta como fonte de luz e uma luneta de ampliação de 35 vezes (SWENSON, 1972, p. 152).

360 Miller (muito) posteriormente lembraria que embora os números fossem muito pequenos eles representavam definitivamente um efeito positivo, que Morley no entanto creditava “certamente” a algum efeito de variação de temperatura (SWENSON, 1972, pp. 152-153 e 192-193).

361 Uma das melhores frases contra a destituição do éter talvez tenha sido produzida por Lodge, que em 1921 se lastimava ao sentir que a atitude corrente com relação ao éter era equivalente a de “peixes abissais inteligentes que desacreditassem a água” (SWENSON, 1972, p. 201).

George Ellery Hale³⁶² (1868-1938), convidou Miller a reproduzir o experimento de Michelson-Morley na altitude de Mount Wilson – 5.715 pés (1.742 m). Ao aceitar, encorajado por Michelson e Morley, Miller se propôs endereçar finalmente as principais dúvidas remanescentes do experimento: se o efeito aparente do arrasto do éter pela Terra próximo a sua superfície diminuiria com a altitude, e, perfazendo o experimento em diferentes épocas do ano, se haveria algum efeito sazonal decorrente das composições dos movimentos da Terra e do Sistema Solar em relação ao éter. Em abril de 1921 toda a montagem estava pronta, protegida por um abrigo de paredes de lona e apoiada sobre quatro bases de concreto, o que permitiu a Miller tomar dados sistematicamente do dia 8 ao dia 21 de abril³⁶³. A análise preliminar destes valores experimentais deram a Miller “definitivamente uma forte indicação de deslocamentos quatro vezes maiores que os de Cleveland, porém acompanhados de distúrbios inexplicados que previnem conclusões até (...) mais tarde no ano”³⁶⁴ (MILLER, 1922, pp. 407-408 *apud* SWENSON, 1972, p. 194).

Após conversar a respeito tanto com Michelson e Lorentz quanto com o próprio Einstein³⁶⁵, Miller ficou convencido de que o efeito observado poderia decorrer de um efeito magnético ou térmico devido à estrutura metálica do interferômetro, e portanto ordenou a

362 Hale viria a ter ainda outra participação em experimentos interferométricos, como veremos no capítulo 8.

363 Miller anotou também todos os dados das condições meteorológicas no momento de cada medição, para futura comparação (SWENSON, 1972, p. 194).

364 Logo a seguir, no entanto, Miller levaria uma ducha de água fria ao constatar que um erro de cálculo o havia feito superestimar o efeito, que seria apenas três vezes maior, e não quatro, e, o que era muito pior, o efeito ocorria apenas uma vez a cada volta do interferômetro, e não duas, como seria de se esperar se o efeito se devesse de fato ao vento de éter (SWENSON, 1972, p. 195).

365 Que visitara a Case School em 25 de maio de 1921 para conhecer o local do experimento de Michelson-Morley e conversar com Miller – Einstein praticamente não falava inglês a esta época, mas Miller falava bem alemão (SWENSON, 1972, p. 195).

construção de uma nova estrutura em concreto e a reconstrução de todas as outras partes metálicas em materiais de pequena expansão, como latão ou alumínio (SWENSON, 1972, p. 196). Assim, em novembro de 1921 Miller estava de volta à montanha para testar seu novo equipamento³⁶⁶. A enorme cruz de concreto, no entanto, mostrou-se tão complicada na questão da rigidez quanto a estrutura de pinho de 1902. De qualquer maneira, como era mais estável em relação a variações de temperatura, as 153 voltas do interferômetro anotadas por Miller entre 4 e 11 de dezembro, em condições meteorológicas favoráveis, produziram um conjunto de dados com os quais Miller pôde trabalhar. Sua análise revelou, no entanto, praticamente os mesmos resultados obtidos com o interferômetro em aço, com deslocamentos periódicos de no máximo quatro centésimos de franja, em média³⁶⁷ (SWENSON, 1972, pp. 199-200).

Foi apenas em 1923 que Miller retomou seus esforços para medir o vento de éter interferometricamente³⁶⁸, passando o ano em um árduo estudo dos efeitos de diversos fatores

366 Curiosamente, Michelson também estava lá nesta época, cuidando de dois outros projetos interferométricos.

Um deles era diretamente relacionado ao experimento de Miller, pois tratava-se de uma tentativa de determinar se a *rotação* (e não a *translação*) da Terra em relação ao éter seria capaz de gerar um efeito mensurável (*cf.* seção 7.6); o outro era de uma natureza inteiramente distinta, e será tratado em detalhes no capítulo 8.

367 Esta análise inicial parece ter frustrado Miller, que escreveu em seu caderno de trabalho: “todos os efeitos são provavelmente devidos ao instrumento. É o fim!” (SWENSON, 1972, p. 200). No entanto, no início de 1922 Miller pareceu ter mudado de atitude ao reportar “definitivamente um deslocamento, periódico a cada meia revolução do interferômetro, do tipo a ser esperado, mas tendo uma amplitude de um décimo da quantidade esperada” (MILLER, 1922, p. 496 *apud* SWENSON, 1972, p. 201).

368 A saída de Hale do cargo de diretor de Mount Wilson pode ter contribuído também para o desânimo de Miller em dar continuidade ao projeto em 1922. Miller teria voltado à ação talvez motivado por uma visita de Lorentz à Case School em 5 de abril de 1922 e à percepção do grande fosso que já havia entre a física teórica e a experimental quando o (talvez) maior físico teórico de sua época confessou, ao ser apresentado a elas pela primeira vez no próprio interferômetro de Miller, nunca antes ter *visto* as franjas de interferência (SWENSON, 1972, p. 204, ver também nota de rodapé).

sobre os deslocamentos das franjas, principalmente efeitos de variações de temperatura, com o objetivo de eliminar qualquer objeção a um possível resultado positivo³⁶⁹.

Miller retornou a Mount Wilson em meados de 1924. Selecionou criteriosamente um novo local, mais afastado da borda do penhasco, e ali fez construir um novo abrigo em lona e madeira. As primeiras observações foram feitas em 4, 5 e 6 de setembro, mostrando um pequeno porém periódico deslocamento das franjas de interferência, levando Miller à confiante conclusão preliminar de que “os efeitos mostraram-se reais e sistemáticos, além de qualquer questionamento” (MILLER, 1933, p. 221 *apud* SWENSON, 1972, p. 206). Miller retornou em intervalos de três meses, aproximadamente, até setembro de 1925, finalmente completando o primeiro levantamento anual do experimento de Michelson-Morley³⁷⁰, e obtendo valores consistentes com os iniciais, o que o fez anunciar um arrasto do éter pela Terra da ordem de 30% do valor esperado – e portanto apontando para alguma espécie de arrasto parcial³⁷¹.

A grande reputação de Miller fez com que o anúncio fosse levado a sério³⁷², e quase instantaneamente diversos novos experimentos buscando reproduzir o efeito foram realizados. Nos Estados Unidos, Roy J. Kennedy, estimulado por Robert Millikan, repetiu o experimento, tanto em seu laboratório no California Institute of Technology quanto no topo de Mount

369 Incidentalmente, ao realizar experimentos utilizando a luz do Sol como fonte, Miller pôde demonstrar a inadequação da teoria de emissão de Ritz como explicação do resultado do experimento de Michelson-Morley de 1887, antecipando-se em alguns meses ao físico experimental alemão Rudolf Tomaschek (1895-1966), a quem o feito é geralmente atribuído (SWENSON, 1972, p. 205).

370 Prometido desde o experimento original.

371 Entretanto Miller só publicaria um estudo definitivo de todos os dados em 1933 (MILLER, 1933).

372 Cf. SWENSON, 1972, p. 215 para uma lista de reações ao anúncio, mostrando o quanto os resultados positivos obtidos por um cientista do peso de Miller não puderam ser ignorados pela comunidade científica.

Wilson, encontrando em ambos os casos resultados “nulos” – na verdade menores que um quarto dos reportados por Miller, e sem nenhuma orientação preferencial³⁷³. O mesmo equipamento, ligeiramente reduzido em tamanho, foi usado em 1927 por K. K. Illingworth numa sala de temperatura controlada, obtendo pouco mais de um décimo do arrasto anunciado por Miller. Na França, em 1926, o físico e aventureiro suíço Auguste Piccard (1884-1962) e Ernest Stahel fizeram diversas observações com um balão contendo um pequeno interferômetro, alcançando altitudes ainda maiores que as de Mount Wilson, porém não encontrando nenhum efeito positivo de um vento de éter. Em 1927, a dupla subiu o monte Rigi (1.797 m), na Suíça, e realizou o experimento próximo a um de seus picos, novamente obtendo resultados nulos (SWENSON, 1972, pp. 213-217).

Também o próprio Michelson, embora envolvido ao longo de 1926 com sua eterna obsessão, *i. e.*, uma nova determinação da velocidade da luz, sentiu-se forçado a endereçar o assunto após novo anúncio de observações de Miller feitas em fevereiro de 1926 reafirmando o efeito anunciado no ano anterior. Michelson e Francis G. Pease (1881-1938) planejaram construir o maior interferômetro jamais construído, com um caminho óptico de cerca de 55 pés (quase 17 m), mas o projeto era tão complexo que teve de ser várias vezes refeito e corrigido, e os resultados foram publicados apenas em 1930, depois de o experimento ser realizado também na altitude de Mount Wilson sem quaisquer resultados próximos aos de Miller (PEASE, 1930 *apud* SWENSON, 1972, pp. 214, 216-217, 219-221 e 225).

A despeito das diversas confirmações independentes da teoria da relatividade já acumuladas até então, o tema ainda era quente o suficiente para promover um encontro

373 No entanto ambos os experimentos foram realizados *dentro* de prédios de alvenaria.

especialmente dedicado ao problema do vento de éter em fevereiro de 1927. A conferência foi realizada em Mount Wilson, para onde Lorentz, Michelson, Miller, Kennedy e outros cientistas envolvidos acorreram para dois dias de apresentações e debates – aparentemente infrutíferos.

Enquanto isso, em Jena, na Alemanha, Georg Joos (1894-1959), em cooperação com a Zeiss, havia desenvolvido um interferômetro com caminhos ópticos de 21 m, completamente automático, e coletado dados ao longo de um ano inteiro. O resultado, publicado em setembro de 1930, esclarecia que “medidas microfotométricas das fotografias tiradas [pelo interferômetro] mostram que, supondo a presença de um vento de éter, qualquer efeito é menor que 1/1.000 da largura de franja”, isto é, um vento de éter menor que 1,5 km/s (SWENSON, 1972, p. 225-226).

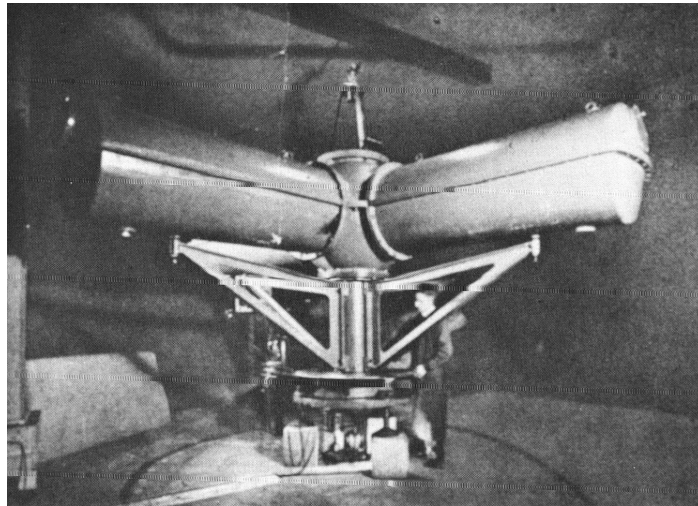


Fig. 7.16 – Interferômetro automático de Joos construído na fábrica da Zeiss em Jena. Os braços operavam imersos em hélio e as franjas eram fotografadas automaticamente (SWENSON, 1972, 11ª página do encarte entre as páginas 106 e 107).

Sobrepondo-se ao período de análise dos resultados finais de Miller, Kennedy e Edward M. Thorndike deram início (em 1930) aos seus estudos de dois anos buscando comprovar experimentalmente a dilatação temporal utilizando um interferômetro de

Michelson com braços deliberadamente desiguais (KENNEDY e THORNDIKE, 1932). O trabalho da dupla parece ter sido a motivação para uma longa análise de Herbert E. Ives (1882-1953) sobre os experimentos do tipo Michelson-Morley ao longo de seis artigos publicados no período 1937-1938, e mesmo para o experimento realizado por Ives em conjunto com G. R. Stilwell em 1938 confirmando o efeito Doppler transversal e clamando “mais evidência para a teoria de Larmor-Lorentz”, isto é, de um éter³⁷⁴ (SWENSON, 1972, p. 237).

Em 1935, no entanto, Gustaf Wilhelm Hammar (1895-1964) testou os resultados encontrados por Miller e sua interpretação de uma outra maneira. Hammar usou um interferômetro cíclico *à la* Fizeau, que continha um trecho em que os dois feixes luminosos eram obrigados a atravessar um tubo blindado por material maciço e com tampas de chumbo apenas com orifícios para passagem do feixe, de modo que um feixe o fazia no sentido do movimento de translação da Terra, enquanto o outro no sentido contrário. Caso o argumento de Miller contra as análises dos resultados dos experimentos de Michelson e Pease e de Joos de que a matéria maciça no entorno do interferômetro blindava o efeito do vento de éter valesse, Hammar deveria observar um deslocamento nas franjas ao girar o interferômetro. Nenhum efeito semelhante foi observado (HAMMAR, 1935).

Depois da morte de Miller em 1941, seus resultados foram desacreditados pelo físico estadunidense Robert Shankland (1887-1968), que havia herdado tanto o cargo quanto as anotações de Miller referentes ao experimento³⁷⁵. Após minuciosa análise, Shankland e seus

374 E portanto Miller não estava sozinho como o último dos que ainda se agarravam ao éter, mesmo em 1938.

375 Num trabalho publicado em 1955 apenas. Shankland teve no entanto a atenção especial de enviar em 1954 um relato detalhado de sua análise para Einstein, que portanto pôde agradecer ao colega a explicação daquele

colaboradores atribuíram o efeito a variações de temperatura e erros na análise estatística de Miller (SHANKLAND, McCUSKEY, LEONE e KUERTI, 1955), mas o assunto ainda provoca uma polêmica subterrânea à margem do *mainstream* científico até hoje³⁷⁶.

7.6 Rotações no Éter e o Interferômetro de Sagnac

Em 1913, o físico francês Georges Sagnac (1869-1928) realizou experimentos interferométricos nos quais detectou fotograficamente e explicou, em termos da teoria clássica do éter, um deslocamento mensurável das franjas num interferômetro cíclico *em rotação* uniforme, em comparação com o mesmo interferômetro em rotação em sentido contrário (SAGNAC, 1913a; SAGNAC, 1913b). O deslocamento Δ das franjas entre as duas situações já havia sido relacionado por Sagnac à frequência de rotação f e à área S definida pelo caminho óptico do ciclo como sendo

$$\Delta = \frac{16\pi f S}{\lambda c} ,$$

onde λ era o comprimento de onda médio da luz utilizada e c a velocidade de propagação da luz no vácuo. No caso do experimento original de Sagnac, o interferômetro era girado com

até então misterioso resultado ainda alguns meses antes de falecer (SHANKLAND, 1973).

376 Uma análise *muito* aprofundada de todo o episódio envolvendo a recepção dos resultados positivos de Miller para o vento de éter pode ser encontrada na tese de doutorado de Roberto Lalli, ou em seu artigo de revisão no *Annals of Science* (LALLI, 2012).

uma frequência de 2 Hz, e um feixe de luz índigo percorria o interferômetro circunscrevendo uma área de 860 cm², gerando um deslocamento da ordem de 7% da largura da franja (SAGNAC, 1913a, p. 710).

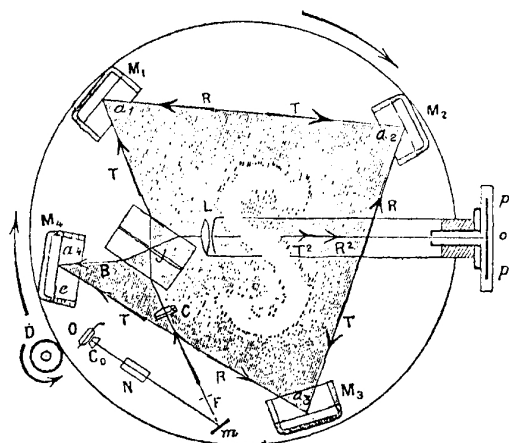


Fig. 7.17 – Interferômetro de Sagnac original. Um relativamente complexo interferômetro cíclico projetava na placa fotográfica PP' os dois feixes de luz oriundos da fonte em O e que percorriam um polígono fechado de área S em sentidos opostos (POST, 1967, p. 476).

No entender de Sagnac, “o efeito interferencial observado é bem o efeito óptico de turbilhonamento devido ao movimento do sistema em relação ao éter, e *manifesta diretamente a existência do éter*, suporte necessário das ondas luminosas de Huygens e de Fresnel” (SAGNAC, 1913a, p. 710, grifos nossos) e de fato o efeito constituiu durante algum tempo um argumento utilizado por partidários do éter contra a teoria da relatividade³⁷⁷.

Apenas com a análise do também físico francês Paul Langevin (1872-1946) o “efeito Sagnac” ganharia uma explicação no contexto da teoria da relatividade, que previa exatamente o mesmo deslocamento para as franjas de interferência. De fato, “uma classe diferente de

³⁷⁷ Até mesmo em 1937, como provava a reprodução do experimento de Sagnac feita naquele ano por Alexandre Dufour e Fernand Prunier, numa forma modificada. O trabalho de Sagnac com o interferômetro giratório (o interferômetro de Sagnac) seria ainda bastante reconhecido na academia. Curiosamente, Sagnac também aplicou princípios interferométricos à acústica na busca de um método para identificar e localizar a origem de sons, numa espécie de “radar interferométrico” para, por exemplo, orientar navios em tempo brumoso, ou localizar aviões inimigos nas nuvens a partir de seu som (ACADÉMIE DES SCIENCES, 1919).

experimentos relativísticos são aqueles projetados para detectar rotações por interferometria. Para estes, tanto a teoria clássica quanto a relativística predizem um deslocamento de franjas e isto tem sido confirmado” (STEEL, 1967, p. 154).

No entanto, tanto a previsão teórica clássica quanto o experimento em si já existiam desde antes da realização do experimento de Sagnac. O experimento já havia sido sugerido por Michelson como uma possível montagem capaz de detectar o movimento relativo ao éter (MICHELSON, 1904 *apud* ANDERSON, BILGER e STEDMAN, 1994, p. 975), e também já havia sido realizado como parte da tese de doutorado de um aluno alemão chamado Franz Harress em Jena ao longo de 1909-1911. O trabalho de Harress tinha como objetivo estudar o arrasto parcial do éter por blocos de vidro em movimento, isto é, eram semelhantes aos trabalhos de Zeeman com o arrasto parcial por sólidos, desenvolvidos nos últimos anos da mesma década, porém Harress utilizou um movimento giratório como meio de dar velocidade aos blocos, e portanto para todos os efeitos realizou a primeira versão conhecida do experimento de Sagnac. No entanto nem Michelson ligou a sua previsão teórica a nenhum resultado experimental, nem Harress ligou seu experimento à rotação propriamente do interferômetro no sentido do efeito Sagnac, de modo que foi mesmo apenas com Sagnac, que aparentemente desconhecia ambas as contribuições anteriores, que o efeito passou a ser conhecido e discutido no contexto do debate da existência do éter e da teoria da relatividade (ANDERSON, BILGER e STEDMAN, p. 975).

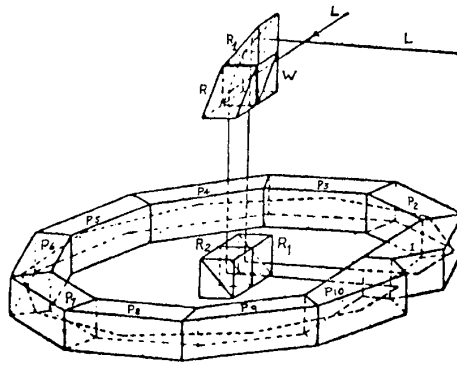


Fig. 7.18 – Interferômetro cíclico de Harress, no qual um anel de blocos de vidro era colocado em movimento giratório (POST, 1967, p. 477).

Mesmo a explicação relativística do efeito também é anterior ao experimento de Sagnac, tendo sido adiantada por von Laue desde pelo menos 1911 (LAUE, 1920, p. 449).

Entre 1923 e 1925, Michelson, Henry G. Gale (1874-1942) e Pearson finalmente conseguiram criar uma montagem para pôr à prova a ideia de Michelson de 1904 de usar a rotação da Terra para causar um deslocamento nas franjas de um interferômetro cíclico. No entanto, como não podiam reverter a rotação da Terra, como no experimento de Sagnac ou de Lodge³⁷⁸, os autores tiveram que lidar com o problema de distinguir entre um efeito sensível e um viés permanente³⁷⁹. A elegante solução foi construir um segundo interferômetro, acoplado ao primeiro, no qual os feixes perfaziam um circuito de área menor, e a comparação entre os dois sistemas de franjas assim gerados permitia determinar o efeito devido à rotação da Terra.

378 É possível mesmo que o experimento de Lodge dos discos em rotação constituísse um antecessor do experimento de Michelson-Gale-Pearson (ou simplesmente “Michelson-Gale”), devido às discussões que Lodge e Larmor tiveram sobre o papel do movimento de rotação da Terra (e o efeito Sagnac daí decorrente) no atraso nos feixes, e conseqüentemente no deslocamento das franjas, de seu interferômetro cíclico (ANDERSON, BILGER e STEDMAN, p. 983).

379 Dilema que o físico estadunidense nascido na Hungria Valentine L. Telegdi (1922-2006) apelidou de “o diabo” (apud ANDERSON, BILGER e STEDMAN, p. 976).

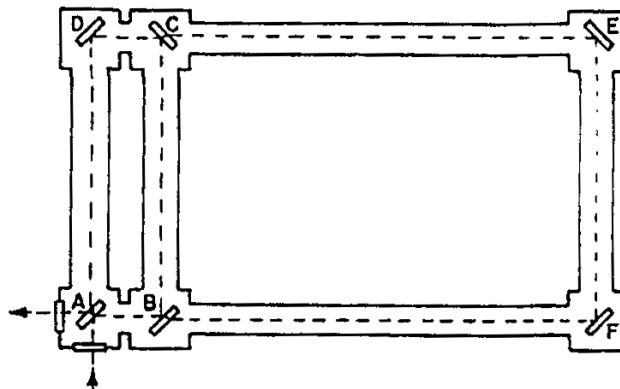


Fig. 7.19 – Vista superior da montagem dos dois interferômetros cíclicos acoplados (ADCBA e ADEFA, respectivamente) do experimento de Michelson-Gale-Pearson. (SHANKLAND, 1973, p. 2286).

Para todos os efeitos, no entanto, o interferômetro de Michelson-Gale-Pearson se comportava como um equivalente interferométrico do pêndulo de Foucault, colocando em evidência o movimento de rotação da Terra para um observador solidário ao planeta.

8 Interferometria e Astronomia

*“A more ambitious problem, which may not be entirely hopeless, is that of measuring the diameter of the stars themselves.”*³⁸⁰

A. A. Michelson

8.1 Primeira Menção ao Possível Uso Astronômico da Interferometria

Nenhuma disciplina teve sua evolução tão ligada aos desenvolvimentos em óptica quanto a astronomia. O que não deve causar surpresa, uma vez que até bem pouco tempo toda a informação que se tinha dos corpos celestes derivava da luz que recebemos deles³⁸¹. Como vimos nos capítulos anteriores, algumas das questões fundamentais da física do século XIX envolviam de alguma forma o movimento da Terra e do sistema solar em relação ao éter, o que de uma maneira ou de outra trazia à baila questões e técnicas da astronomia. Foi a partir de uma sugestão feita *en passant* por Fizeau em 1868, no entanto, que a interferometria começou a ingressar no rol das técnicas à disposição dos astrônomos para a obtenção de dados observacionais de relevância para a astronomia em si.

A questão envolvida não poderia ser mais desafiadora: a medição do tamanho de uma estrela. O problema já havia sido atacado sem sucesso por pelo menos um astrônomo célebre, William Herschel. Em 1804, no contexto da descoberta e do estudo do tamanho da “estrela de

380 “Um problema mais ambicioso, o qual talvez não seja totalmente destituído de esperanças, é o de medir o diâmetro das estrelas propriamente” (MICHELSON, 1903, p. 143, tradução nossa).

381 Isto continua sendo verdadeiro para a astronomia estelar, se considerarmos “luz” no seu sentido mais abrangente, de forma a abarcar todo o espectro eletromagnético, e não apenas sua parcela visível.

Harding”, isto é, do asteróide recém-descoberto Juno (os dois primeiros foram Ceres e Pallas), Herschel buscou distinguir o “diâmetro espúrio” visto ao telescópio do diâmetro real de objetos estelares, concluindo que não era possível estimar os ângulos (reais) subentendidos pelas estrelas ainda que se levasse em conta a questão da abertura do telescópio (HERSCHEL, 1805).

A questão continuava sem solução em 1868, quando Fizeau já era um investigador reconhecido. Ele era membro da *Académie des Sciences*, para a qual fora escolhido em 1860 superando Foucault e Edmond Becquerel (1820-1891), pai de Henri Becquerel (1852-1908), o famoso descobridor da radioatividade do urânio (ACADÉMIE DES SCIENCES, 2010). Em 1866 Fizeau havia sido agraciado pela *Royal Society* com a medalha Rumford por seus trabalhos em óptica, especialmente por suas investigações a respeito do efeito do calor sobre o poder refrativo dos corpos transparentes (ROYAL SOCIETY, 2010). Não é surpresa, portanto, que Fizeau estivesse na comissão encarregada de avaliar e entregar o prêmio Bordin de 1867, outorgado aquele ano pela *Académie des Sciences* ao trabalho que “executasse ou propusesse um experimento decisivo que permitisse dirimir de uma vez por todas a questão já várias vezes estudada da direção das vibrações do éter na luz polarizada” (FIZEAU, 1868, p. 932). Fizeau era o relator da comissão, que aparentemente precisou julgar apenas uma monografia inscrita. Ao autor (não nomeado) a comissão recomendou atribuir um prêmio de dois mil francos em reconhecimento ao mérito de fornecer uma proposta de experimento em princípio capaz de lançar luz à questão.

Desde os anos 1820s já se considerava que a onda luminosa era transversal à sua direção de propagação. No entanto não era possível decidir se a perturbação do éter se dava no mesmo plano da polarização da luz ou num plano perpendicular a ela (e, claro, em ambos os casos ainda perpendicular à direção de propagação da luz)³⁸². A monografia apresentada propunha que se fizesse interferir dois feixes luminosos fazendo com que se encontrassem numa região do espaço formando um ângulo de 90° entre si. Além disso, os feixes deveriam poder ser polarizados de forma idêntica, fosse paralelamente ao plano formado pelos feixes, fosse perpendicularmente a ele. Com este procedimento podia-se prever como os efeitos de interferência seriam afetados pela direção *real* de vibração das ondas luminosas em cada caso. Por exemplo, se, conforme defendia Fresnel, as vibrações se dessem na direção perpendicular à direção de polarização, e tomando o caso em que os raios eram polarizados no plano definido por suas direções de propagação (*i. e.*, o plano horizontal em perspectiva na fig. 8.1 a seguir), ter-se-ia que na região de intersecção dos feixes as vibrações do éter necessariamente se dariam numa mesma direção para ambos os feixes, produzindo assim os efeitos de interferência ordinários (fig. 8.1a). Caso se considerasse que as vibrações do éter se davam na mesma direção da polarização, a geometria do experimento faria com que as vibrações oriundas de um

382 A discussão a este respeito ao longo do século é por si só bastante rica e longa. Basta-nos no entanto mostrar que mesmo ao escrever o artigo para o verbete “Éter” da Enciclopédia Britânica de 1878, o próprio Maxwell a mencionaria, citando tanto Fresnel, que era da opinião de que as vibrações do éter se davam numa direção perpendicular à da polarização da luz, quanto James Macculagh e Carl Neumann, que favoreciam a opinião contrária, isto é, de que as vibrações se davam na mesma direção da polarização da luz. Peculiar é a observação seguinte de Maxwell no mesmo texto, fazendo ver que qualquer que seja o caso “o processo pode, entretanto, ser eletromagnético, e como neste caso o deslocamento elétrico e a perturbação magnética são perpendiculares entre si, pode-se supor que qualquer deles esteja no plano de polarização” (MAXWELL, 1878).

e de outro feixe se dessem em direções perpendiculares entre si, e portanto não produzindo nenhum padrão de interferência (fig. 8.1b).

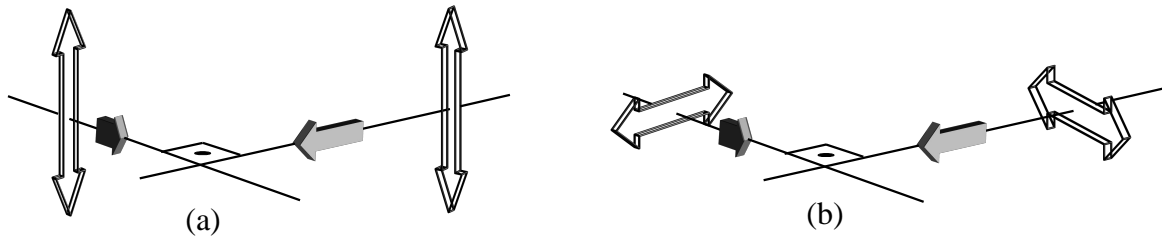


Fig. 8.1 – Proposta de experimento para determinação da direção real de oscilação do éter na luz polarizada através da interferência de dois feixes perpendiculares entre si (a) quando as direções de vibração do éter (setas vazadas) são perpendiculares ao plano definido pelas direções de propagação dos feixes (setas cheias); e (b) quando as direções de vibração do éter estão contidas neste mesmo plano.

Fizeau relatava ainda que o autor da monografia não se deteve em apenas propor o princípio geral do experimento, mas estudou em detalhes os problemas técnicos e dificuldades envolvidos em sua realização. Em particular, ao analisar a sugestão do autor de fazer uso de técnicas fotográficas, Fizeau destacava “a extrema finura das franjas que devem ser produzidas nestas circunstâncias e que não poderão ser percebidas senão com a ajuda do microscópio” (FIZEAU, 1868, p. 934), bem como

(...) a intensidade luminosa extremamente fraca que, mesmo com o uso da luz solar, deve resultar das dimensões minúsculas que se faria necessário atribuir à fonte de luz destinada a servir de ponto de partida comum aos raios interferentes (FIZEAU, 1868, p. 934)[viii1].

E foi no parágrafo seguinte do relatório, ao discutir esta questão, que Fizeau se permitiu a digressão que esconde o germe da interferometria estelar:

Existe, de fato, para a maioria dos fenômenos de interferência, tais como as franjas de Yung [*sic*], aquelas dos espelhos de Fresnel e aquelas que, segundo Arago, dão origem à cintilação das estrelas, uma relação notável e necessária entre a dimensão das franjas e aquela da fonte luminosa, de modo que franjas de uma extrema tenuidade não podem surgir senão quando a fonte de luz tem dimensões

angulares quase que insensíveis; de onde, diga-se de passagem, é talvez permitido esperar que, apoiando-se sobre este princípio e formando-se, por exemplo por meio de duas fendas largas bem distantes uma da outra, franjas de interferência no foco de grandes instrumentos destinados a observar as estrelas, será possível obter alguns dados novos sobre os diâmetros angulares destes astros (FIZEAU, 1868, p. 934, grifo nosso)[viii2].

Fizeau não mencionou a origem da idéia, mas pode-se especular (ACADÉMIE DES SCIENCES, 2010) que ela tenha surgido de seus trabalhos com a chama de sódio aproximadamente quatro anos antes (FIZEAU, 1864).

8.2 Primeiras Tentativas de Medir o Diâmetro de uma Estrela Interferometricamente

De qualquer modo, foi apenas a partir do interesse do astrônomo e então diretor do Observatório de Marselha Édouard Stéphan (1837-1923) que a idéia de Fizeau começou a ser posta em prática. Stéphan dedicou-se à tarefa entre 1872 e o início de 1873. Na carta que Stéphan enviou para Fizeau relatando suas tentativas, reproduzida nos *Comptes Rendus* da *Académie* no primeiro semestre de 1873, é apresentada uma primeira descrição detalhada do método:

Cubramos a objetiva de uma luneta com uma tela vazada com duas fendas paralelas A e B, colocadas simetricamente em relação ao centro óptico da objetiva, e que suponho momentaneamente reduzidas a duas linhas infinitamente finas. Sabe-se que, se se faz incidir sobre a tela raios paralelos emitidos de uma mesma fonte, obtém-se no foco franjas de Young, e que o ângulo sob o qual é vista a distância entre as duas primeiras franjas escuras, a partir do centro óptico da objetiva, é expressa, em segundos de arco, pela fórmula simples:

$$x = \frac{103,1}{l}$$

onde l representa a distância entre as fendas A e B, avaliada em milímetros³⁸³; isto é, e este é o ponto capital, o ângulo x é inversamente proporcional à distância entre as duas fendas, qualquer que seja a luneta empregada.

Se se mira uma estrela cujo diâmetro é nulo, as franjas sempre ocorrerão, e, para fazê-las aparecer será suficiente empregar uma ampliação maior; porém, se a estrela tem um diâmetro sensível, isto é, se ela envia à tela feixes de raios em direções um pouco diferentes, a cada direção corresponde um sistema de franjas; estes diversos sistemas sobrepõem-se uns aos outros, e, para que as franjas desapareçam completamente, é suficiente que o diâmetro da estrela seja igual³⁸⁴ ao ângulo x .

O fenômeno se produz ainda quando, em vez de duas fendas muito estreitas, aplica-se à tela aberturas de uma largura bastante grande.

Encontramo-nos então de posse de um procedimento de medição cuja sensibilidade cresce com a separação entre as fendas, isto é, com a abertura da luneta; porém, o fenômeno sendo negativo, uma experiência não se tornará comprobatória senão quando, a disposição experimental restando a mesma, certas estrelas dão lugar a franjas enquanto outras, em condições completamente análogas, não (STÉPHAN, 1873, pp. 1009-1010)[viii3].

Stéphan equipou uma “luneta ordinária” com uma máscara em que fez duas fendas estreitas e paralelas, distantes 15 cm uma da outra³⁸⁵. Com este instrumento Stéphan passou uma noite observando as franjas formadas por algumas das estrelas mais brilhantes do céu. Sua escolha das estrelas não foi justificada ou detalhada no texto da carta, merecendo apenas a menção lacônica de que “é evidente que deve-se inicialmente se endereçar às *belles étoiles*”, *i.e.*, às estrelas mais brilhantes do céu. Para todas as estrelas estudadas Stéphan observou a formação de franjas de interferência intensas, mesmo para Sírius, embora um pouco menos

383 Stéphan considerava o comprimento de onda efetivo igual a 0,0005 mm (STÉPHAN, 1874).

384 Isto não é estritamente verdadeiro, devido à simetria circular da fonte (disco da estrela), mas uma análise matemática mais rigorosa do método teria que esperar os trabalhos de Michelson e do astrônomo francês Maurice Hamy (1861-1936) sobre o tema, como se verá na seção 8.4.

385 Stéphan aqui se referia talvez à distância não entre os centros das fendas, mas entre suas bordas mais próximas. Ele não explicita a dimensão da largura das fendas, que podemos supor relativamente pequena em comparação com a distância entre ambas.

intensas no caso desta estrela (STÉPHAN, 1873, p. 1010)³⁸⁶.

A partir da noite seguinte, Stéphan, aparentemente convencido das possibilidades que o método oferecia, passou a utilizar o telescópio de 80 cm do observatório de Marselha³⁸⁷, que recobriu com uma máscara munida de duas fendas simétricas em forma de gomos, posicionadas nas extremidades de um mesmo diâmetro, e cujas bordas interiores distavam 50 cm uma da outra (fig. 8.2).

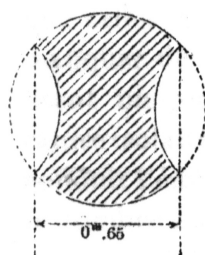


Fig. 8.2 – Máscara utilizada por Stéphan sobre o tubo do telescópio Foucault de 80 cm de diâmetro em Marselha (STÉPHAN, 1874). A distância entre os centros das fendas em forma de gomos é de 65 cm, o que resulta numa largura máxima de 15 cm na região central das fendas.

Desta vez, com o novo sistema, Stéphan não obteve franjas ao observar Sírius, apesar de ter buscado ampliações da ordem de mil vezes. A princípio julgou que isto ocorria devido à posição de Sírius, já muito baixa no céu, e portanto mais suscetível às oscilações atmosféricas que ordinariamente afetam as observações telescópicas; no entanto as estrelas de Órion, pouco acima, produziram franjas bem nítidas³⁸⁸. Isso o levou a acreditar, como escreveu para Fizeau,

386 O interesse de Stéphan pelas *belles étoiles*, e por Sírius em particular, se explica pela suposição de que as estrelas de maiores diâmetros angulares seriam naturalmente as de maior magnitude (brilho) aparente, fosse pela menor distância ao observador ou pelo maior diâmetro real da estrela. Sírius, localizada na constelação do Cão Maior, é a estrela mais brilhante do céu.

387 Um telescópio em geral é descrito em termos do diâmetro de sua abertura. Curiosamente, este telescópio foi construído por Foucault. Seu espelho de 80 cm fazia dele o maior telescópio refletor do mundo em seu tempo (LAWSON, 2000), e portanto provavelmente o mais adequado para a aplicação do método interferométrico.

388 É um pouco irônico que a primeira medição bem-sucedida do diâmetro de uma estrela utilizando o método interferométrico tenha sido feita justamente com Betelgeuse, a estrela mais brilhante da constelação de Órion.

que, apesar de considerar que seus resultados preliminares estavam longe de ser definitivos, “pela maneira através da qual *as franjas persistem, qualquer que seja a ondulação das imagens* [devido aos efeitos de turbulência do ar], o desaparecimento das franjas de Sírius não se dá unicamente por uma influência atmosférica” (STÉPHAN, 1873, grifo nosso)³⁸⁹, e que portanto, seria possível mostrar que as dimensões de Sírius não são desprezíveis.

Stéphan passou boa parte dos doze meses seguintes estudando criteriosamente as franjas projetadas por estrelas brilhantes (de 1ª a 3ª grandeza, e mesmo algumas de 4ª grandeza), e no início de 1874 apresentou uma memória sobre o tema à *Académie*. Nela não apenas demonstrou matematicamente que as fendas empregadas podiam ser bem largas, desde que fossem simétricas e que sua largura fosse pequena em comparação com a separação entre seus centros³⁹⁰, mas também estabeleceu como limite mínimo para a resolução angular do instrumento o valor de λ/l (= 0,158 segundos de arco, em seu caso). Do fato de que todas as estrelas estudadas (mesmo Sírius) apresentaram franjas de interferência de mesmo aspecto e discerníveis apenas a partir de uma mesma ampliação (600 vezes) Stéphan concluiu que o diâmetro aparente das estrelas examinadas era não apenas inferior ao limite de resolução do aparelho, mas “uma fração muito pequena do número precedente” (STÉPHAN, 1874).

A crença de que não seria possível construir um aparelho de abertura suficiente para discernir diâmetros angulares supostamente tão pequenos parece ter feito com que o método tenha sido abandonado até sua provável reinvenção por Michelson cerca de 17 anos depois.

389 Retornaremos a esta passagem no relato de Stéphan quando, na seção 8.3, discutirmos a possível influência de Stéphan e Fizeau em Michelson.

390 No caso da máscara utilizada por Stéphan (fig. 8.2), estas grandezas valiam, respectivamente, 15 e 65 cm.

8.3 A Provável Reinvenção do Método Interferométrico por Michelson

Em 1889, Michelson e outros cientistas de vanguarda em suas respectivas áreas foram recrutados pela recém-fundada Universidade de Clark, em Worcester, Massachusetts. Tendo para ali levado seu “comparador interferencial” (*i. e.*, seu interferômetro), Michelson passou a dedicar-se a novas aplicações para o instrumento. Uma delas, a ser detalhada no próximo capítulo, estava ligada à medição de comprimentos de onda com grande exatidão, o que levaria à redefinição do metro e à utilização de seu interferômetro em espectroscopia, rendendo-lhe em última instância o prêmio Nobel, em 1907. Uma outra aplicação importante dizia respeito a um possível uso do interferômetro para a medição de dimensões de objetos celestes além da resolução dos telescópios astronômicos. A este respeito escreveu numa carta para Morley em 6 de março de 1890:

(...) Estou trabalhando na aplicação de métodos interferenciais a medições astronômicas e estou confiante de que serei capaz de *medir discos* com uma exatidão de aproximadamente um ou dois por cento onde um telescópio por pouco quase não *mostra* um disco (LIVINGSTON, 1973, p. 146, grifos no original)[viii4].

Não parece haver um registro de como Michelson se interessou pelo tema. De todo modo, neste ponto de sua carreira Michelson parecia estar empenhado em descobrir novas aplicações para seu aparelho – muitas das quais sintetizadas posteriormente em sua famosa série de palestras “Light Waves and Their Uses” (MICHELSON, 1903). Tampouco há um consenso sobre se Michelson tinha ou não conhecimento da sugestão de Fizeau e dos trabalhos inconclusivos de Stéphan obtidos entre 1872 e 1874. Embora não fosse exatamente uma extensão óbvia dos trabalhos com o interferômetro, a medição das dimensões de objetos

celestes através do método interferométrico não chegava a ser uma aplicação impensável, em particular para Michelson, que tinha grande facilidade para inventar montagens interferométricas para os mais diversos fins.

Os defensores de que Michelson possivelmente teria conhecimento dos trabalhos anteriores apontam para o período que Michelson passou em Paris no inverno de 1881-82, como parte de seu período de estudos de pós-graduação na Europa. Ali, não apenas ele pôde travar contato com a nata da óptica francesa, como participou de pelo menos uma sessão da *Académie des Sciences*, que havia sido presidida por Fizeau apenas três anos antes, e da qual Fizeau ainda era um membro ativo. Como Michelson, Fizeau havia se interessado em diferentes momentos de sua carreira pela medição da velocidade da luz e pela medição do movimento relativo do éter, portanto havia tanto oportunidade quanto motivos para que Michelson buscasse um contato com Fizeau ou, no mínimo, se inteirasse de sua obra. Em trabalhos posteriores Michelson não escondeu sua admiração por Fizeau (por exemplo em MICHELSON e MORLEY, 1886), portanto seria pouco provável que desconhecesse a sugestão de Fizeau para o uso astronômico do método interferométrico e os trabalhos de Stéphan feitos a partir dela. Por exemplo, David DeVorkin (1944-), historiador da astronomia³⁹¹, dá a entender que:

(...) Possivelmente ele primeiro tomou conhecimento da idéia de Fizeau enquanto na Europa nos primeiros anos da década de 1880. Michelson estava profundamente envolvido nos estudos de interferometria na Alemanha e na França, e, caracteristicamente, as medições inconclusivas de Stéphan podem tê-lo fascinado e o estimulado a reexaminar o problema (DeVORKIN, 1975, p. 1)[viii5].

391 Com quem incidentalmente tivemos contato por ocasião da realização da reunião da União Astronômica Internacional (IAU/UAI) em 2009 no Rio de Janeiro, e, posteriormente, durante a reunião anual da History of Science Society em 2010 em Montréal, no Canadá, onde também discutimos brevemente o tema.

O físico estadunidense e também prêmio Nobel Robert A. Millikan (1868-1953), responsável pela memória biográfica de Michelson perante a *National Academy of Sciences*, nela advoga que foi justamente o estudo detalhado da obra de Fizeau que teria *dado início* à obra da vida de Michelson em interferometria (MILLIKAN, 1938, p. 134). Embora não mencione especificamente a questão do método interferométrico aplicado à medição das dimensões dos objetos celestes, a afirmativa de Millikan parece corroborar a tese de que Michelson conhecia a ideia de Fizeau. O astrônomo francês Antoine Labeyrie (1943-) foi mais além e citou especificamente que Michelson foi *trabalhar* com Fizeau em Paris e também se interessou por interferometria estelar (LABEYRIE, 1982, p. 338)³⁹². Finalmente, um argumento original que pode ser adiantado neste sentido envolve a menção de Stéphan ao fato de que o método interferométrico contornava o problema das turbulências atmosféricas que afeta usualmente as observações telescópicas tradicionais. Antes mesmo de suas primeiras observações dos satélites galileanos de Júpiter com o interferômetro estelar, Michelson adiantava que o método teria esta mesma vantagem, opinião modificada após estas observações (DeVORKIN, 1975, p. 2).

Por outro lado, é possível reverter o argumento de que Michelson cita Fizeau como influência em trabalhos posteriores: se Michelson não deixou de mencionar os trabalhos de Fizeau quando estes eram de seu conhecimento, por que haveria de esconder sua influência no caso da ideia para a medição das dimensões dos objetos celestes? Juntamente com uma série de outros argumentos mais ou menos convincentes, este raciocínio ajuda a estabelecer como razoavelmente provável que Michelson desconhecesse *esta* ideia específica de Fizeau. Embora

³⁹² Inquirido a respeito da origem da informação, no entanto, Labeyrie não soube responder de onde a havia tirado quando escreveu seu artigo (LAWSON, 2000, p. 329, veja nota de rodapé), portanto o mais provável é que ele estivesse apenas dando eco a um desses “mitos” da história da ciência.

seja crível que Michelson tenha estudado os artigos de Fizeau sobre interferometria, é possível, ou mesmo provável, que não tivesse visto o relatório teoricamente burocrático no qual Fizeau fez sua digressão *en passant* sobre o método. Também é razoável que as comunicações de Stéphan tenham passado despercebidas a Michelson, uma vez que o astrônomo não fazia parte da comunidade dos físicos envolvidos nas pesquisas em óptica que Michelson teve mais interesse em contactar em 1881-82³⁹³. Com relação à indiferença do método para com as turbulências atmosféricas, citada por Stéphan em sua carta a Fizeau de 1873 (STÉPHAN, 1873), é preciso observar que em sua comunicação seguinte (STÉPHAN, 1874, p. 1011) Stéphan chamava a atenção justamente para a possibilidade de que uma atmosfera turbulenta fosse a causa de um desaparecimento inicial das franjas no caso de Sírius. Portanto é mais provável que Michelson acreditasse inicialmente na imunidade do método às turbulências atmosféricas mais por uma análise da óptica envolvida no processo do que por uma leitura dos trabalhos anteriores do astrônomo francês. No entanto o argumento mais convincente a favor da reinvenção do método por Michelson diz respeito à ausência de *qualquer* menção aos trabalhos de Fizeau e Stéphan nos trabalhos feitos em interferometria estelar nos Estados Unidos. Isto perdurou até a publicação de um trabalho de revisão na área de interferometria de estrelas binárias pelo astrônomo (e inventor³⁹⁴) belgo-canadense François Charles Pierre Henroteau (1889-1951) para a seção “Double and Multiple Stars” do volumoso *Handbuch der*

393 Por outro lado, também é preciso que Michelson não tenha ficado sabendo da memória de Hamy sobre a medição de pequenos diâmetros (HAMY, 1893), em que os trabalhos de Michelson de 1890 e 1891 são citados após a análise da sugestão de Fizeau e dos trabalhos de Stéphan. Como o artigo de Hamy foi publicado em francês num periódico talvez não muito conhecido fora da França, a possibilidade ainda é verossímil.

394 Incidentalmente, Henroteau desenvolveu e patenteou, entre outras coisas, diversos aprimoramentos para a câmera de TV na década de 1930.

Astrophysik de 1928³⁹⁵. Este foi o primeiro artigo em língua inglesa³⁹⁶ que mencionou os trabalhos pioneiros de Fizeau e Stéphan na área, que a partir desta revisão passaram a ser citados como tal pelos astrônomos estadunidenses (LAWSON, 2000, p. 326, veja também a nota de rodapé). Outro argumento consiste no fato de que a principal biografia de Fizeau, escrita por Émile Picard (1856-1941) em 1924, *i. e.*, posteriormente (como se verá) à primeira medição bem-sucedida do diâmetro de uma estrela por Michelson e pelo astrônomo estadunidense Francis Gladheim Pease (1881-1938), fazia referência à sugestão original de Fizeau, mas não mencionava qualquer encontro entre este e Michelson, o que seria evidentemente relevante no contexto e dificilmente poderia deixar de ser registrado por Picard (LAWSON, 2000, p. 329, veja a nota de rodapé).

Ao rerepresentar o método, Michelson referiu-se a um artigo anterior (MICHELSON, 1890a) no qual ele contrastava as limitações intrínsecas (pela difração) de microscópios e telescópios com as possibilidades abertas pelo refratômetro, e mostrava que limitar a passagem da luz por uma objetiva apenas aos extremos de um de seus diâmetros fazia com que na prática o instrumento se comportasse como um “refratômetro”, *i. e.*, um interferômetro, ganhando (“de dez a cinquenta vezes”) em exatidão para a medição das dimensões da fonte luminosa o que perdia em resolução e nitidez da imagem da mesma. Michelson tratava ainda questões importantes para a análise de situações reais de medição, como a não-uniformidade espacial da fonte luminosa³⁹⁷ e o caso de duas fontes luminosas circulares muito próximas uma da outra.

395 Henroteau trabalhou no Observatório de Marselha, onde é razoável supor que tenha sabido das tentativas de Stéphan e da sugestão de Fizeau.

396 A compilação de artigos de revisão de que se constituíam os diversos tomos do *Handbuch* era bilíngüe, trazendo uma maioria de seções em alemão e outras (como a de Henroteau) em inglês.

397 Michelson visava não apenas as diferenças de intensidade ao longo do disco de uma estrela mas também a

Michelson percebeu ainda que ao utilizar o refratômetro o método prescindia do uso de uma objetiva real:

Devido à fineza das franjas de interferência quando um corpo minúsculo é examinado, o método de obtenção destas franjas (por um par de fendas ajustáveis defronte à objetiva do telescópio) pode sofrer objeções, das quais o método refratométrico está completamente isento. Mais que isso, esta última modificação torna possível estender a abertura efetiva do telescópio equivalente de maneira ilimitada. Assim, enquanto seria impraticável para todos os propósitos construir objetivas muito maiores do que as atualmente em uso, não há nada que impeça aumentar a distância entre os dois espelhos do refratômetro em até dez vezes este tamanho. Se entre as estrelas fixas mais próximas houver alguma tão grande quanto nosso sol, ela subentenderia um ângulo de cerca de um centésimo de segundo de arco; e a distância correspondente requerida para observar este pequeno ângulo é de 10 metros, uma distância que, ainda que totalmente fora de questão no que se refere ao diâmetro de uma objetiva telescópica, é ainda perfeitamente factível com um refratômetro (MICHELSON, 1890b, p. 21)[viii6].

Portanto tendemos a concordar com Peter Lawson quanto à maior probabilidade de que Michelson desconhecesse a sugestão de Fizeau e os trabalhos pioneiros de Stéphan, e tenha efetivamente reinventado o método.

possibilidade de uso do método para determinação da distribuição da intensidade luminosa em aglomerados globulares, o que poderia fornecer dados observacionais a respeito da distribuição de temperatura e densidade nestes objetos então pouco conhecidos (MICHELSON, 1890c, p. 220).

8.4 A Análise do Método e os Testes Iniciais Feitos por Michelson

Como quer que as coisas tenham se passado, Michelson reapresentou a ideia em 1890, junto com uma análise muito mais aprofundada das relações matemáticas envolvidas (MICHELSON, 1890b e 1890c).

Michelson contrapunha o método interferométrico ao método micrométrico tradicional, que consistia em estimar o diâmetro de um objeto visto através do telescópio medindo-se a distância entre dois fios finos paralelos colocados de forma a tangenciar duas extremidades opostas do disco que constituía a imagem do objeto. A incerteza associada a este procedimento era bastante grande, no entanto, em particular devido a dois fatores: (1) as condições atmosféricas, uma vez que as turbulências causadas pelo aquecimento desigual do ar afetavam diferentemente a luz que o atravessava em diferentes direções, prejudicando a nitidez e a estabilidade da imagem projetada, e (2) a difração devida à abertura (finita) do tubo ou lente do telescópio, que fazia com que a imagem não tivesse uma borda precisa, mas consistisse em anéis concêntricos progressivamente mais apagados, e conseqüentemente tornando a avaliação de qual parte do padrão de difração correspondia efetivamente à “borda” da imagem um tanto subjetiva. Dependendo da relação entre o tamanho aparente do objeto e a abertura do instrumento de observação, o erro percentual na medição do diâmetro de um objeto celeste poderia chegar mesmo a 30% (MICHELSON, 1903, p. 131). O caso de uma estrela binária é particularmente instrutivo nesse sentido. Quando a separação aparente entre as duas constituintes do par é muito pequena, os padrões de difração se superpõem, e torna-se mais difícil medir a distância entre os centros de cada objeto. Um telescópio com uma abertura

ainda menor, nas mesmas condições, não seria capaz de distinguir um padrão do outro, e nestes casos se dizia que o instrumento não era capaz de “resolver” a estrela binária em suas constituintes.

Se, no entanto, se obstruísse a abertura do instrumento com uma máscara opaca que permitisse apenas a passagem da luz através de duas fendas retangulares relativamente compridas, a imagem obtida seria ainda bastante luminosa, e consistiria em uma tarja brilhante ladeada de tarjas progressivamente menos brilhantes (o padrão de difração para uma abertura retangular), sobre as quais apareceria sobreposto um padrão mais fino de franjas de interferência claras e escuras igualmente espaçadas (decorrente da presença de *duas* fendas retangulares)³⁹⁸. O *espaçamento* destas franjas de interferência depende fundamentalmente do comprimento de onda da luz e da distância entre os centros das fendas, mas, o que é mais importante, a *visibilidade* destas franjas depende diretamente do tamanho do objeto, ou, no caso de estrelas binárias, da separação entre suas constituintes.

Para explicar e testar inicialmente o método, Michelson supôs uma fonte luminosa de extensão linear a paralela a e a uma distância d das fendas do interferômetro, por sua vez afastadas uma da outra de uma distância b (fig. 8.3).

398 Para uma apresentação didática do efeito de difração por fendas e aberturas, referir-se ao livro “Optics” de E. Hecht (HECHT, 1990). Uma apresentação bastante mais rigorosa e abrangente pode ser encontrada no clássico “Principles of Optics” de E. Wolf e M. Born (BORN e WOLF, 1991). Finalmente, uma apresentação mais contextualizada pode ser lida em “The Principles of Physical Optics”, de E. Mach (MACH, 1926). Thomas Preston chama a atenção para o fato de que o efeito da máscara de duas fendas pode ser analisado como uma rede de difração de apenas duas aberturas (PRESTON, 1928, p. 332).

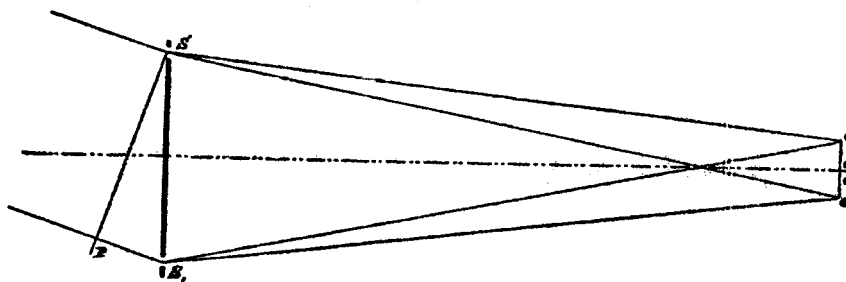


Fig. 8.3 – Esquema para a dedução da largura a de uma fonte luminosa extensa através do desaparecimento das franjas de interferência. Na prática a fonte era uma fenda de largura variável. (MICHELSON, 1890b, p. 2).

Michelson definiu a visibilidade das franjas matematicamente pela razão

$$V = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} ,$$

onde I_1 era a intensidade luminosa observada no centro de uma banda clara e I_2 no centro de uma banda escura. Assim, o módulo de V estava necessariamente contido entre zero e um³⁹⁹.

Michelson mostrou que a intensidade numa direção γ em relação ao eixo de simetria do sistema, integrada para toda a extensão da fonte (fenda de largura a), era

$$I = a + \frac{\lambda d}{\pi b} \sin \frac{\pi b}{\lambda d} a \cos \frac{2\pi \gamma}{\lambda} b ,$$

com λ sendo o comprimento de onda⁴⁰⁰.

399 Michelson admitia, no entanto, que uma definição melhor para V seria dada por $V = \left(\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \right)^2$,

evitando a possibilidade de valores negativos para a visibilidade do sistema de franjas. Porém, como seu interesse específico era determinar para que valores a visibilidade se anulava, isso não fazia muita diferença (MICHELSON, 1890b, p. 4, nota de rodapé).

400 Evidentemente, uma superposição ideal dos padrões de interferência só se daria no caso de uma fonte estritamente monocromática. A policromia de fontes reais teria o efeito de permitir uma pequena visibilidade residual mesmo quando V se anulasse para um determinado comprimento de onda, o que Michelson verificou experimentalmente (MICHELSON, 1890b, p. 4).

Os valores máximo e mínimo da intensidade correspondiam portanto aos valores máximo e mínimo do cosseno, respectivamente:

$$I_1 = a + \frac{\lambda d}{\pi b} \sin \frac{\pi b}{\lambda d} a$$

e

$$I_2 = a - \frac{\lambda d}{\pi b} \sin \frac{\pi b}{\lambda d} a ,$$

fazendo com que

$$V = \frac{\sin \frac{\pi b}{\lambda d} a}{\frac{\pi b}{\lambda d} a} .$$

Zeros da visibilidade ocorreriam portanto toda vez que a/d fosse um múltiplo inteiro de λ/b (grandeza que Michelson chamou de “limite de resolução” do telescópio, ou, por extensão, do interferômetro a ele acoplado). O gráfico da figura 8.4 mostra a plotagem manual para os valores que a visibilidade assume para diferentes valores de a .

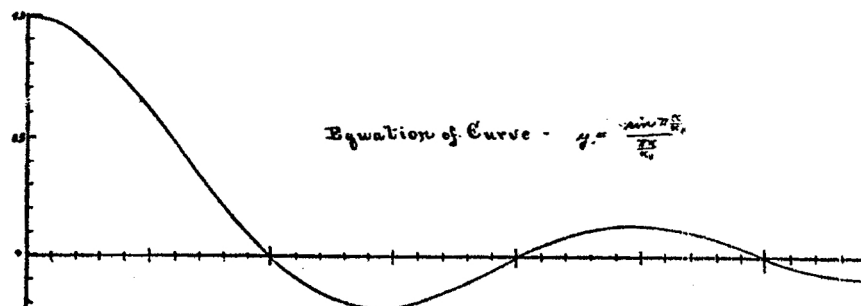


Fig. 8.4 – Plotagem da visibilidade do padrão de franjas em função da largura da fonte. Note-se que as franjas desaparecem e reaparecem (menos brilhantes) repetidamente, a cada vez que a/d é um múltiplo inteiro de λ/b . Os valores correspondentes aos máximos de $|V|$ são +1,000; -0,210; +0,130; -0,091; ... (MICHELSON, 1890b, p. 4).

Michelson realizou seu primeiro teste apontando uma luneta obstruída por uma máscara com fendas a 45 mm de distância uma da outra (distância centro a centro) para uma fenda regulável a 10 m de distância, iluminada por uma fonte intensa. À medida que Michelson aumentou a largura da fonte (fenda regulável), as franjas ficaram progressivamente menos visíveis, praticamente desaparecendo quando a largura da fonte passou de 0,08 para 0,14 mm, mas reaparecendo novamente à medida que a fonte era alargada mais ainda (MICHELSON, 1890b, p. 2). Numa série controlada de dados experimentais realizados com a fenda de largura variável e utilizando ora luz solar ($\lambda_{\text{médio}} = 550 \text{ nm}$), ora uma linha do cálcio ($\lambda = 570 \text{ nm}$) e ora luz vermelha ($\lambda = 623 \text{ nm}$)⁴⁰¹, Michelson pôde demonstrar o bom acordo das observações com as previsões teóricas (MICHELSON, 1890b, p. 5).

Uma vez estabelecida a relação entre a visibilidade do padrão de franjas, a extensão da fonte luminosa e a distância entre as fendas, era possível inverter a abordagem: dada uma fonte com uma certa extensão fixa, a visibilidade do padrão de franjas podia ser diminuída até zero através do controle da separação entre as fendas do interferômetro, que, medida, permitia então estimar a extensão da fonte.

Michelson prontamente derivou as relações para a visibilidade das franjas supondo a fonte luminosa extensa porém com outras geometrias. De particular interesse, evidentemente, eram os casos de um disco uniformemente iluminado, como no caso de objetos celestes não-luminosos, como os planetas e satélites (MICHELSON, 1890b, pp. 6-7)⁴⁰²; de um disco

401 No caso da luz vermelha, a relativa monocromaticidade alcançada permitiu a Michelson observar até oito desaparecimentos sucessivos das franjas.

402 Aqui surgia um fator de correção geométrico que levava os zeros da função para $a/d = 1,22 \lambda/b$; com a

luminoso não uniforme, como era o caso do Sol e, por analogia, das estrelas (MICHELSON, 1890b, pp. 8-9); e finalmente de uma fonte dupla formada por dois discos iluminados idênticos, como no caso (aproximado) das estrelas duplas (MICHELSON, 1890b, pp. 9-13).

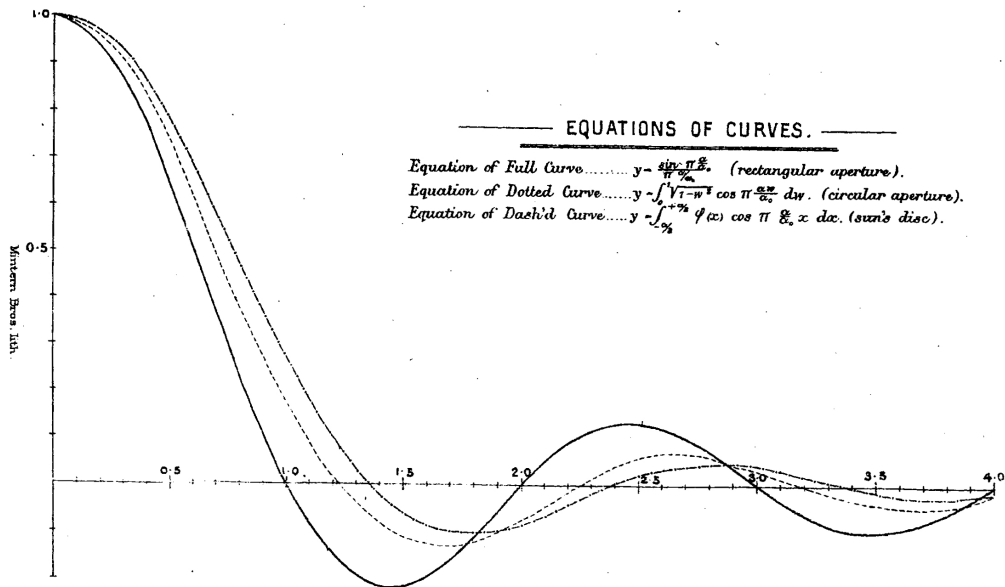


Fig. 8.5 – Plotagem da visibilidade do padrão de franjas em função da extensão da fonte para os casos de uma abertura retangular (linha contínua); de um disco iluminado uniformemente (linha tracejada); e de um disco de luminosidade não homogênea de maneira semelhante ao Sol (linha picotada) (MICHELSON, 1890b, prancha I).

Novamente as previsões teóricas bateram bem com os valores obtidos por Michelson em laboratório usando aberturas de diâmetros diferentes, com erros médios da ordem de 12%, e que poderiam ser ainda menores realizando-se um número maior de medições. De qualquer maneira, mesmo este valor já representava a promessa de uma melhora por um fator de quase três sobre os erros obtidos em medições telescópicas tradicionais, o que recomendava a sequência do estudo e sua aplicação a problemas reais da astrometria.

aproximação agora de que a equivalia ao diâmetro do disco.

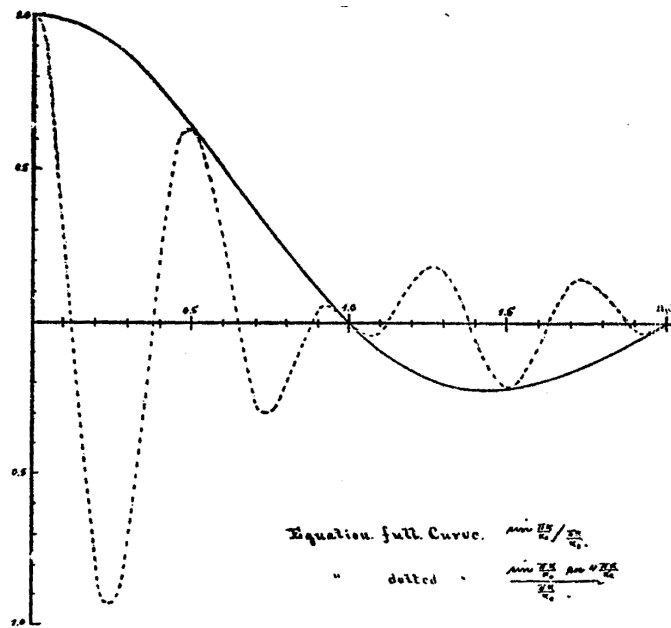


Fig. 8.6 – Plotagem da visibilidade do padrão de franjas devido a dois discos iluminados idênticos separados de uma distância s perpendicular à direção da maior extensão das fendas do interferômetro, em função do diâmetro dos discos e da separação entre seus centros (linha tracejada). A linha contínua mostra o envelope, que depende apenas do diâmetro dos discos. (MICHELSON, 1890b, p. 12).

A aparelhagem utilizada por Michelson nos estudos em laboratório é representada na figura 8.7 a seguir. As fendas reguláveis eram colocadas à frente de um telescópio refrator de 4 polegadas, e próximo à ocular o observador dispunha de uma barra rosqueada que permitia variar a separação entre as fendas enquanto se observava as franjas. Uma pequena luneta auxiliar lateral ao telescópio permitia a leitura direta da separação entre as fendas numa escala.

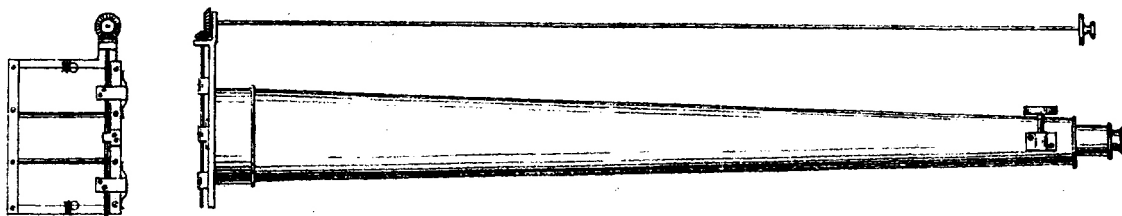


Fig. 8.7 – Vistas frontal rebatida (à esq.) e superior (à dir.) da montagem para o teste do método interferométrico para a medição de pequenas dimensões angulares utilizando uma fenda dupla de separação regulável à frente de um telescópio (MICHELSON, 1890b, prancha II).

No entanto, Michelson percebeu uma grande desvantagem deste tipo de montagem: quando a dimensão angular a ser medida era muito pequena, era preciso afastar progressivamente mais as fendas, fazendo com que as franjas geradas ficassem progressivamente mais finas, exigindo um sistema de grande magnificação para sua observação e tornando-se portanto pouco brilhantes (MICHELSON, 1890b, p. 18).

Ato contínuo, Michelson sugeriu utilizar uma montagem alternativa baseada em duas montagens por ele já imaginadas anteriormente (MICHELSON, 1890a, placa III), que evitava a necessidade do uso de fendas, substituindo-as por superfícies refletoras, num passo semelhante ao dado por Jamin em relação ao duplo tubo de Arago (ver fig. 8.8). Uma grande vantagem permitida por este tipo de montagem foi o fato de manter constante a largura das franjas, independentemente da separação entre os espelhos (MICHELSON, 1890b, p. 19).

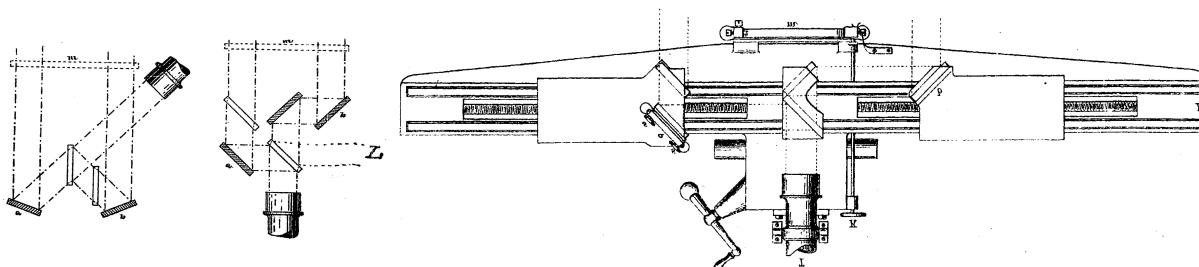


Fig. 8.8 – À esq., duas montagens alternativas propostas por Michelson para transformar um telescópio em um “refratômetro”. Os espelhos são representados por retângulos hachurados, enquanto retângulos vazados representam divisores de feixe ou placas compensadoras (MICHELSON, 1890b, p. 18). Michelson deu preferência ao segundo *setup*, que incorporou num desenho técnico mais minucioso (dir.). Os espelhos estão marcados *a* e *b*, e podiam ser separados ou aproximados um do outro pelo observador enquanto observava na ocular (MICHELSON, 1890b, prancha II, girada em relação à original para efeito de comparação).

Michelson ainda especularia sobre a possível utilidade do método interferométrico para a astronomia de posição, concluindo que com o método “um refrator de uma polegada poderia fazer o trabalho então requerido de um de dez polegadas” (MICHELSON, 1890b, p. 20).

Logo antes da publicação de seu artigo sobre a aplicação do método interferométrico à medição das dimensões de objetos astronômicos em julho de 1890, Michelson obteve acesso ao telescópio de 15 polegadas do Harvard College Observatory em Cambridge, Massachusetts, através de seu diretor, Edward C. Pickering (1846-1919), com vistas a testar o método. Pickering pode ter se interessado pelo assunto por conta de trabalhos anteriores em que se envolveu com a medição das dimensões de discos estelares por métodos fotométricos indiretos (DeVORKIN, 1975, p. 2). Michelson teria então aproveitado a situação para se retirar de Worcester, onde a universidade vivia um período politicamente turbulento, e dedicar-se ao projeto. No entanto, as dificuldades operacionais de traslado do equipamento e acomodação de tempo de telescópio atrasaram as observações, que finalmente se mostraram impraticáveis devido às condições atmosféricas locais (LIVINGSTON, 1973, pp. 156-159).

8.5 A Medição Interferométrica dos Diâmetros dos Satélites Galileanos

Michelson propôs então a Edward S. Holden (1846-1914), à época diretor do Lick Observatory, em Mt. Hamilton, Califórnia, dar continuidade ao projeto naquele observatório, onde possivelmente as condições atmosféricas seriam melhores. Depois de uma longa troca de cartas entre ambos, ficou estabelecido que Michelson teria à sua disposição o telescópio refrator de 12 polegadas⁴⁰³ (e não o de 36) e o novo objetivo seria medir os diâmetros dos

403 Anos mais tarde Michelson referiu-se ao mesmo telescópio como sendo um refrator de 11 polegadas em sua

satélites internos de Júpiter, cujos valores obtidos pelos métodos tradicionais apresentavam razoável dispersão (*cf.* tabela 8.1). O projeto portanto serviria como teste para o método interferométrico, comparando os valores eventualmente encontrados com os conhecidos (DeVORKIN, 1975, p. 2). Michelson precisou das dimensões exatas do telescópio, porque o interferômetro a ser acoplado a ele pesava sozinho 20 libras (pouco mais de 9 kg), o que implicava compensar o peso na outra extremidade do telescópio para não afetar sua operação (LIVINGSTON, 1973, p. 160)⁴⁰⁴.

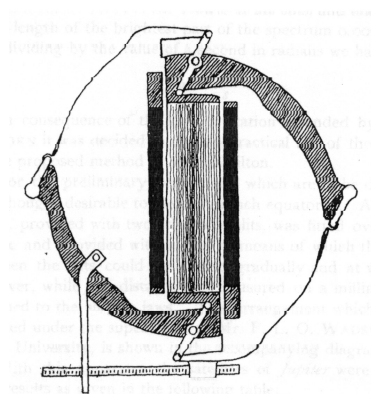


Fig. 8.9 – Máscara/sistema mecânico de “mandíbulas deslizantes” para variar e medir a separação entre as fendas construído para Michelson para a medição dos diâmetros dos satélites galileanos (a ser acoplado sobre a objetiva do telescópio equatorial de 12 polegadas). Novamente uma barra rosqueada (não mostrada na figura) permitia ao observador variar a separação entre as fendas enquanto observava pela ocular (MICHELSON, 1891, p. 276).

Apesar das expectativas em contrário, as condições atmosféricas em Mt. Hamilton não foram as melhores, e das três semanas que Michelson passou no Lick Observatory apenas quatro noites mostraram-se favoráveis à observação – as noites de 2, 3, 6 e 7 de agosto de 1891 (DeVORKIN, 1975, p. 3). Entretanto a noite de 7 de agosto estava praticamente perfeita para observações, e a maior parte das utilizadas por Michelson na sua análise final derivaram desta

série de palestras “Light Waves and Their Uses” (MICHELSON, 1903, p. 142).

404 Aparentemente Michelson não deve ter tido tempo de construir um interferômetro utilizando espelhos em vez de fendas, pois, como vimos, em 1890 já havia concluído pelo melhor desempenho do primeiro.

data (LIVINGSTON, 1973, p. 161; e MICHELSON, 1891, p. 277).

satélite	A. A. M.	Eng.	St.	Ho.	Bu.	valor médio (Eng./St./Ho./Bu.)	dispersão σ_{n-1}
I (Io)	1,02	1,08	1,02	1,11	1,11	1,08	$\pm 0,04$
II (Europa)	0,94	0,91	0,91	0,98	1,00	0,95	$\pm 0,05$
III (Ganimedes)	1,37	1,54	1,49	1,78	1,78	1,65	$\pm 0,15$
IV (Calisto)	1,31	1,28	1,27	1,46	1,61	1,40	$\pm 0,16$

Tabela 8.1 – Valores em segundos de arco para os diâmetros angulares corrigidos dos satélites galileanos de Júpiter conforme medidos por Michelson (A. A. M.) pelo método interferométrico, em comparação com as medições contemporâneas obtidas pelo método micrométrico tradicional respectivamente por Engelmann, Struve, Hough e Burnham e seus valores médios (com as respectivas dispersões). Note-se que as medições micrométricas de Burnham foram realizadas em paralelo com as de Michelson na noite de 7 de agosto de 1891, no mesmo local, com o telescópio de 36 polegadas (MICHELSON, 1891, p. 277).

Os valores obtidos por Michelson com o auxílio de William Wallace Campbell (1862-1938) mostraram-se razoavelmente consistentes com os valores obtidos por métodos tradicionais. Michelson afirmou ainda que “os resultados pelo método da interferência estão próximos da média dos outros resultados, e que os resultados obtidos pelo outro método diferem largamente entre si” (MICHELSON, 1903, p. 143), o que não era exatamente verdadeiro – talvez apenas para Europa, e, com muita boa vontade, também para Calisto. Certamente não o era para Io e Ganimedes, onde os valores encontrados por Michelson eram consideravelmente baixos em comparação com a média dos outros valores. A conclusão de Michelson só pode ser entendida diante de sua insinuação de que as medições de Engelmann eram especialmente mais confiáveis⁴⁰⁵ (MICHELSON, 1891, p. 278).

⁴⁰⁵ Evidentemente, é lícito especular que talvez Michelson considerasse as medições de Engelmann particularmente mais confiáveis *justamente* por concordarem melhor com seus próprios valores.

Importante salientar que os valores obtidos interferometricamente derivaram do desaparecimento das franjas quando as fendas estavam a cerca de (apenas) 4 polegadas uma da outra. Como Michelson prontamente percebeu, isto equivalia a dizer que o método interferométrico permitia realizar, com um telescópio de, digamos, 6 polegadas, observações tão (ou provavelmente mais) exatas quanto as realizadas através dos maiores telescópios do mundo por outros métodos. De posse de um telescópio maior, como o equatorial de 36 polegadas do Lick Observatory, Michelson esperava conseguir estimar as distâncias para as quais as franjas desapareceriam e reapareceriam, sucessivamente, e produzir a partir daí valores muito mais exatos. De fato, Michelson teria feito construir uma máscara para o telescópio de 36 polegadas, que teria chegado ao Lick Observatory em dezembro daquele ano, e anunciava-se a esperança de que uma montagem como esta seria capaz de realizar a medição do diâmetro do disco de uma estrela.

No entanto, o projeto em última instância acabou sendo deixado de lado. Os motivos para o abandono do programa parecem ter diferentes origens. Em primeiro lugar, Michelson havia sido convidado para trabalhar no *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) na determinação interferométrica do metro, projeto que tinha como mais alta prioridade, e do qual só retornou em 1893 para assumir seu novo posto na universidade de Chicago. Michelson teria então sugerido a Holden que Campbell assumisse o projeto, porém as pressões para uso de tempo de telescópio devido a estudos sobre Marte parecem ter tido um efeito impeditivo no projeto. De qualquer modo a factibilidade da técnica já havia sido demonstrada, e talvez a mecânica necessária para operar interferometricamente em telescópios maiores, hospedados

em cúpulas, com separações de fendas da ordem de dez metros, se mostrasse muito complicada. Finalmente, a década de 1890 testemunhou um período de depressão econômica em Chicago, o que cortou orçamentos generalizadamente, inclusive os projetos acadêmicos que implicavam modificações custosas de equipamentos (DeVORKIN, 1975, p. 4).

Curiosamente, trinta anos depois, quando da retomada do projeto do interferômetro estelar, o motivo alegado por Michelson para o abandono do projeto era de outra natureza:

Este método simples e belo foi aplicado com sucesso pelo autor em 1891 para a medição acurada do tamanho dos satélites de Júpiter, mas não foi testado em objetos estelares, *provavelmente porque se supunha requerer condições de visibilidade*⁴⁰⁶ *ideais*. No ano passado, entretanto, o autor descobriu através de testes no observatório de Yerkes e em Mount Wilson que mesmo quando a “visibilidade” era ruim, franjas nítidas e relativamente estáveis podiam ser obtidas (MICHELSON, 1920, p. 257, grifo nosso) [viii7].

Se contrastamos esta afirmação de Michelson com sua observação no artigo de 1891 de que embora as condições de visibilidade nas três primeiras noites tivessem sido consideradas pobres, os valores obtidos para os diâmetros dos satélites não desviaram muito dos obtidos na noite (de visibilidade ideal) do dia 7 – o que insinuava portanto o conhecimento de que o método era robusto quanto às condições atmosféricas desde 30 anos antes – não podemos senão conjecturar quanto ao motivo da contradição. Tendemos a acreditar que Michelson por um lado tenha querido evitar qualquer constrangimento com relação ao fato de Holden e Campbell não terem conseguido dar continuidade ao projeto, e portanto não tenha mencionado os motivos mais concretos do abandono, e por outro lado

406 Aqui Michelson não se refere à visibilidade V das franjas conforme definido anteriormente, mas à qualidade da visibilidade das imagens telescópicas de uma forma geral por causa da umidade do ar, da névoa, variações de temperatura em diferentes camadas do ar ou de outros efeitos atmosféricos, que parecem fazer a imagem final, magnificada, “ferver” (a qualidade desta visibilidade era avaliada pelos astrônomos subjetivamente em escalas de 0 a 5 ou de 0 a 10).

tenha mesmo se esquecido ou mudado de opinião quanto à questão, bastante subjetiva, do grau de visibilidade das franjas em relação à qualidade das condições atmosféricas, o que, como já vimos, também já havia levado Stéphan à contradição. De fato, em uma carta escrita por Michelson a George Hale em 8 de maio de 1919, Michelson anexou uma cópia de uma carta sua a Robert S. Woodward (1849-1924), então presidente da Carnegie Institution, aceitando uma bolsa para a medição de diâmetros estelares em Mount Wilson, mas também expressando uma “profunda preocupação” com os efeitos da turbulência atmosférica (DeVORKIN, 1975, p. 7).

8.6 A Retomada do Interesse pela Medição do Diâmetro de Estrelas

Quase trinta anos se passaram sem que os trabalhos de Michelson de aplicação da interferometria à astronomia tivessem qualquer repercussão expressiva. Como escreveu DeVorkin, “o problema da determinação do diâmetro de uma estrela era um problema isolado, não explicitamente relacionado a outros problemas em astronomia. Além disso, acreditava-se que as estrelas fossem todas de tamanhos similares” (DeVORKIN, 1975, p. 5).

As coisas começaram a mudar lenta porém sistematicamente a partir de 1905, quando o químico (e astrônomo amador) dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873-1967) mostrou que havia dois tipos muito distintos de estrelas vermelhas, com diâmetros muito diferentes, baseado na lei de irradiação estabelecida pelo físico alemão Max Planck (1858-1947) alguns

anos antes⁴⁰⁷ e no meticuloso esquema de classificação espectral de estrelas brilhantes completado em 1897 em Harvard⁴⁰⁸. Embora o trabalho de Hertzsprung tenha sido largamente ignorado à época, já havia ficado claro que algumas das estrelas vermelhas teriam que ser gigantes em comparação com o Sol para obedecer a lei de irradiação de um corpo negro (DeVORKIN, 1975, pp. 5-6). Os trabalhos do astrônomo estadunidense Henry Norris Russell (1877-1957) sobre um método para determinação da densidade de estrelas binárias eclipsantes, especialmente no período 1910-1913, levariam a conclusões semelhantes, permitindo pelo menos uma estimativa para o diâmetro de uma gigante vermelha⁴⁰⁹ como sendo da ordem do diâmetro da órbita da Terra em torno do Sol, senão maior.

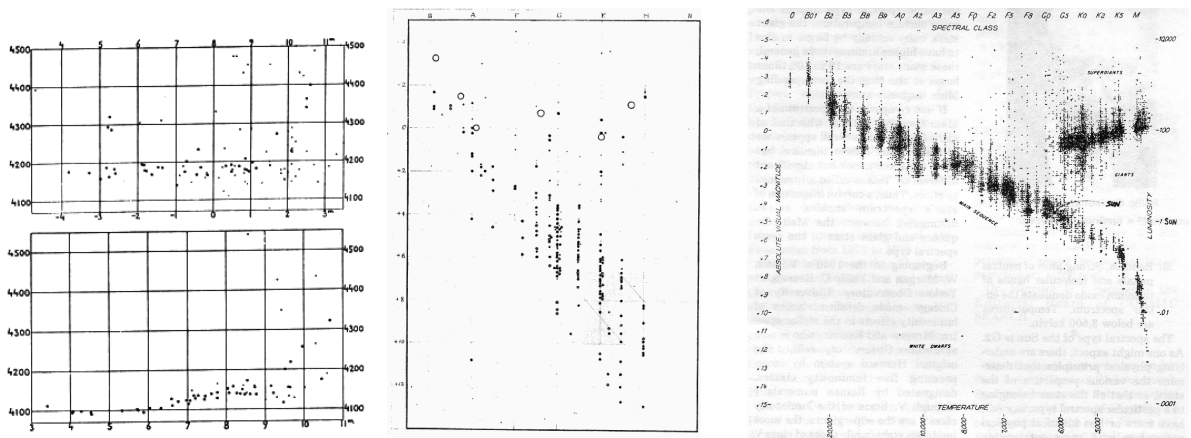


Fig. 8.10 – Esquema de classificação de estrelas de acordo com seu brilho e tipo espectral segundo os originais de Hertzsprung (esq.), para as estrelas das Híades (em cima) e das Plêiades (em baixo), e de Russell (centro), ambos de 1911. Esta maneira de plotar as estrelas, chamada de “diagrama H-R” pelas iniciais de Hertzsprung e Russell, passou a ser intimamente relacionada com a teoria da evolução estelar. À dir., uma plotagem mais recente do diagrama H-R⁴¹⁰.

407 Hertzsprung tinha a vantagem de ter tido uma formação acadêmica prévia em fotoquímica (DeVORKIN, 1975, p. 6).

408 A magnitude aparente de uma estrela está relacionada ao produto de sua irradiância (potência radiante efetiva por unidade de área) por sua área de superfície aparente. Se, então, se dispusesse de dados sobre a distribuição espectral da luz irradiada, era possível determinar a área de superfície aparente, e, daí, o diâmetro angular da estrela (DeVORKIN, 1975, p. 5).

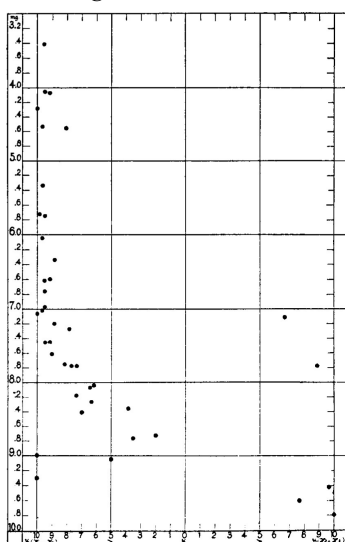
409 Antares, na constelação do Escorpião.

410 Como sói acontecer, o diagrama H-R também parece ter sido antecipado pelo trabalho do astrônomo alemão

Após o anúncio de Russell de sua teoria da evolução estelar na Inglaterra em 1913, causando grande interesse na comunidade astronômica, o tópico do tamanho das estrelas retornou à baila. Em maio de 1914 um dos estudantes de Russell, Harlow Shapley (1885-1972), trabalhando em Mount Wilson, escreveu para Russell relatando ter discutido longamente a questão dos dois tipos distintos de estrelas vermelhas e a teoria da evolução estelar de Russell com George Hale, que aparentemente tornou a se interessar pelo problema dos diâmetros estelares. Foi graças a um convite de Hale, renovado finda a Primeira Guerra Mundial, que Michelson retornou ao tema, podendo dispor do recém-completado telescópio de 100 polegadas de Mount Wilson (DeVORKIN, 1975, p. 7).

Em sua série de palestras de 1903 (MICHELSON, 1903), Michelson já falava que uma aplicação importante da técnica interferométrica seria o de conseguir medir o diâmetro de uma estrela, e que talvez isso fosse possível pelo método interferométrico porque (1) talvez não fosse preciso fazer com que as franjas desaparecessem completamente e porque (2) talvez algumas estrelas fossem muito maiores do que o Sol. Mas isso não queria dizer que Michelson

Hans Rosenberg (1879-1940) – cujas iniciais são, adequadamente, H. R.! –, que um ano antes teria publicado o diagrama abaixo classificando as estrelas das Plêiades de maneira semelhante (ROSENBERG, 1910).



estava a par, portanto, das idéias de Russell e Hertzsprung. De fato, mesmo ao final da década de 1910, Michelson aparentemente não estava a par de toda a confusa série de estimativas dos diâmetros de algumas estrelas realizada até então, e possivelmente acreditava que os valores fossem muito abaixo do teorizado à época, tendo mesmo escrito a Hale em novembro de 1919 lembrando que mesmo que as 100 polegadas não fossem suficientes para fazer desaparecer as franjas uma diminuição de pelo menos 15% na visibilidade das franjas (o que deveria poder ser detectado visualmente) já daria algum resultado experimental quanto à ordem de magnitude dos diâmetros (DeVORKIN, 1975, p. 8).

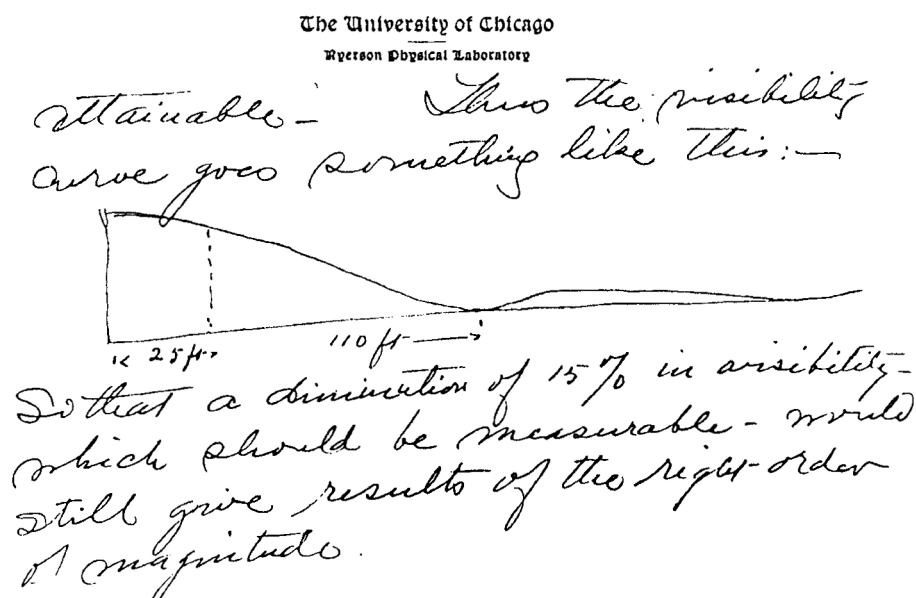


Fig. 8.11 – Trecho da carta de Michelson a Hale em que explica como uma mera diminuição da visibilidade das franjas poderia produzir um valor para o diâmetro de uma estrela no telescópio de 100 polegadas (DeVORKIN, 1975, p. 9).

À esta época, no entanto, a grande motivação de Hale para com o projeto interferométrico tinha outra origem: no final de 1919 e início de 1920 o pessoal de Mount Wilson, sob a liderança⁴¹¹ de John August Anderson (1876-1959), havia conseguido adaptar a técnica interferométrica de Michelson para a medição bem-sucedida da distância entre as

411 Indicada por Hale.

componentes de estrelas binárias⁴¹².

8.7 A Medição Interferométrica da Separação entre Estrelas Binárias

Fazendo observações interferométricas em condições de visibilidade atmosférica consideradas ruins, Michelson testou no Yerkes Observatory e em Mount Wilson a robustez do método interferométrico com respeito à turbulência atmosférica, um problema que já havia levado previamente tanto ele quanto Stéphan à contradição. Anderson, por sua vez, fez outro teste aquecendo o ar à frente de um pequeno telescópio equipado com um interferômetro, concluindo que o sistema de franjas continuava disponível e estável (DeVORKIN, 1975, p. 10), e que portanto mesmo quando a visibilidade do céu era pobre era possível utilizar o método.

Um outro efeito espúrio a ser levado em conta era a dispersão da luz pela atmosfera em observações não-zenitais⁴¹³, porém Anderson não apenas mostrou que o efeito da dispersão sobre o sistema de franjas era apenas o de deslocar lateralmente o centro do sistema, como também percebeu a possibilidade de justamente utilizar o método interferométrico para,

412 A possibilidade de uma medição interferométrica da separação angular entre estrelas binárias já havia sido aventada também pelo astrônomo e físico alemão Karl Schwarzschild (1873-1916), no final do século dezanove (SCHWARZSCHILD, 1896).

413 Por exemplo, as realizadas por Anderson em plena luz do dia em 23 de abril de 1920. A maior dispersão da luz azul afetou significativamente (em cerca de 10%) o valor obtido para a separação das componentes de Capela (ANDERSON, 1920, p. 268). Ver também tabela 8.2 a seguir.

anotando os diferentes deslocamentos dos sistemas de franjas exibidos por estrelas a diferentes distâncias do zênite, medir com grande sensibilidade o efeito da dispersão atmosférica sobre a luz estelar (ANDERSON, 1920, p. 263).

Conforme Michelson já havia demonstrado teoricamente, o método interferométrico se prestava facilmente à determinação da distância entre dois discos luminosos idênticos (MICHELSON, 1890b, pp. 9-13). Anderson selecionou Capela, uma estrela binária considerada próxima o suficiente para que uma comparação com estimativas baseadas na sua paralaxe e órbita espectroscópica pudesse ser feita⁴¹⁴ (ANDERSON, 1920, p. 264). Além disso, as componentes de Capela são praticamente idênticas, tornando a escolha particularmente feliz⁴¹⁵.

Anderson fez uma pequena modificação no sistema interferométrico proposto por Michelson originalmente: as duas fendas retangulares não ficavam mais à frente da lente objetiva do telescópio, mas a uma longa distância atrás dela, antes de seu foco (ver figura 8.12). A máscara com as fendas podia ser girada ao longo do eixo de simetria do telescópio, de maneira a alinhar as fendas adequadamente, e como de costume a distância entre as fendas também podia ser variada à conveniência do observador.

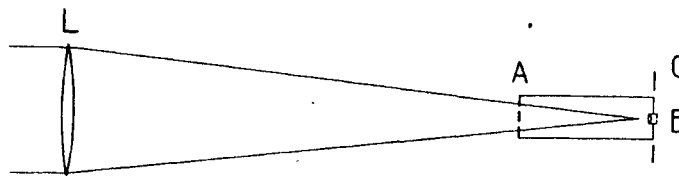


Fig. 8.12 – Montagem de Anderson para a determinação da separação entre as componentes de

414 De fato, suspeitava-se que a separação angular entre suas componentes fosse da ordem de $1/20$ segundos de arco.

415 Não por acaso Capela ganharia rapidamente o epíteto “amiga dos interferometristas”, pela facilidade em utilizá-la para calibrar interferômetros estelares.

Capela. As fendas retangulares em A projetavam um padrão de interferência observado por uma lente de grande ampliação em E. Toda a máscara contendo as fendas podia ser girada, e a separação entre as fendas variada (ANDERSON, 1920, p. 265).

Simplificando o raciocínio de Michelson, Anderson mostrou que os padrões de interferência devidos a uma e outra componente quando as fendas estavam alinhadas com as componentes, isto é, quando a maior dimensão das fendas estava numa direção perpendicular à da linha que unia os centros das duas componentes, se anulavam para uma separação angular igual a qualquer múltiplo inteiro de $\lambda/2D$, D sendo a separação entre os centros das fendas⁴¹⁶. Esta relação foi efetivamente testada por Anderson utilizando uma simulação com estrelas binárias “de laboratório”. Foi possível assim testar também os efeitos do não-alinhamento das fendas com as componentes e das diferenças em tamanhos relativos entre uma e outra componente, como se verá mais à frente.

O método de alinhamento era essencialmente simples, uma vez que o sistema de franjas em qualquer circunstância se anulava completamente quando as fendas eram alinhadas perpendicularmente às componentes, o que permitia um alinhamento com erros da ordem de 3° , embora Anderson acreditasse ser possível reduzir este erro para até 1° tendo um observador treinado (ANDERSON, 1920, p. 267).

Os valores finais obtidos por Anderson para a separação entre as componentes de Capela foram:

⁴¹⁶ Podia-se dizer, portanto, que o interferômetro era capaz de *resolver* duas fontes luminosas a uma distância angular equivalente a $\lambda/2D$. Isto devia ser comparado ao cálculo do poder de resolução (devido à difração) de um telescópio de diâmetro equivalente à distância entre as fendas, da ordem de $1,22 \times \lambda/D$. Portanto um interferômetro apresentava um poder de resolução mais de duas vezes superior ao de um telescópio de abertura equivalente.

Data G. M. T.	Separação angular medida interferometricamente (em segundos de arco)	Separação angular calculada (em segundos de arco)
30/12/19	0,0418	0,04180
13/02/20	0,0458	0,04583
14/02/20	0,0451	0,04506
15/02/20	0,0443	0,04430
15/03/20	0,0505	0,05050
23/04/20	[0,0402]	0,04391

Tabela 8.2 – Comparação entre os valores obtidos por Anderson interferometricamente para a separação angular entre as componentes de Capela e os valores calculados a partir de elementos espectroscópicos nas mesmas datas. Observe-se que em 23 de abril a dispersão atmosférica afetou significativamente a medição feita à luz do dia, produzindo um resultado aproximadamente 10% menor que o esperado (ANDERSON, 1920, p. 275).

Anderson mostrou, utilizando estrelas binárias “de laboratório”, que as fendas podiam ter sua largura bastante aumentada sem perda de nitidez na imagem das franjas, o que, com o telescópio de 100 polegadas, deveria permitir a observação até mesmo de estrelas de magnitude 13, em condições ideais (ANDERSON, 1920, pp. 271-272).

Finalmente, Anderson percebeu ainda que o efeito produzido por uma diferença em brilho entre as componentes era o de fazer desaparecer mais prontamente (ou proximamente) as franjas de interferência no lado da componente menos brilhante. Assim, por exemplo, se a componente à direita era mais brilhante que a da esquerda, as franjas continuariam visíveis ao centro, mas desapareceriam em algum ponto entre o centro e o lado esquerdo. Isto permitiu a Anderson imaginar a possibilidade de utilizar o registro interferométrico para a determinação da diferença em brilho das componentes de uma binária (ANDERSON, 1920, p. 273 e

prancha XIV), proposta corroborada por Michelson (MICHELSON, 1920, p. 257).

8.7 A Medição Interferométrica do Diâmetro de α -Orionis (Betelgeuse)

Impelido pelo sucesso da aplicação do método a estrelas binárias e pela disponibilidade do telescópio Cassegrain de 100 polegadas, Michelson propôs a Hale sua antiga ideia de usar, em vez da máscara sobre a abertura do telescópio, um jogo de espelhos deslizantes sobre uma barra que permitia afastá-los de até 20 pés (pouco mais de 6 metros), na prática transformando o telescópio num interferômetro de resolução efetiva muito maior ainda⁴¹⁷. Além disso, testes preliminares feitos com a máscara utilizada no ano anterior por Anderson para o estudo de Capela haviam mostrado que, quando configurada para a maior separação possível entre as fendas (equivalente ao diâmetro do telescópio, 100 polegadas), o interferômetro mostrava já um decréscimo sensível na visibilidade das franjas projetadas por Betelgeuse, o que ocorria igualmente para qualquer giro da máscara, mostrando que a estrela não era um binária e que portanto a redução da visibilidade das franjas deveria ser causada pelo diâmetro estelar propriamente (MICHELSON e PEASE, 1921, p. 258)⁴¹⁸.

A construção da estrutura do interferômetro teve início no final de junho de 1920, e lá

417 Michelson queria 25 pés (7,65 m), porém Hale relatou haver problemas de peso com a montagem da estrutura no telescópio, e que 20 pés era o limite (DeVORKIN, 1975, p. 10).

418 Curiosamente o nome de Anderson não aparece no trabalho final publicado em 1921, assinado apenas por Pease e por Michelson (que acabou participando mais como um supervisor, à distância).

pelo meio do verão Michelson e Pease já estavam testando o equipamento, obtendo boa visibilidade e estabilidade para as franjas com os espelhos ao longo de toda a extensão da barra.

Ao retornar para Chicago para lecionar no outono, Michelson soube por Hale que

As estimativas de Eddington para os diâmetros estelares em seu pronunciamento na Associação Britânica (Nature, Sept. 2) são tão grandes que estamos planejando medir Betelgeuse com o [telescópio de] 100 polegadas tão logo quanto possível. O Dr. Anderson fará a tentativa muito em breve, e eu relatarei a você os resultados (*apud* DeVORKIN, 1975, p. 11)[viii8].

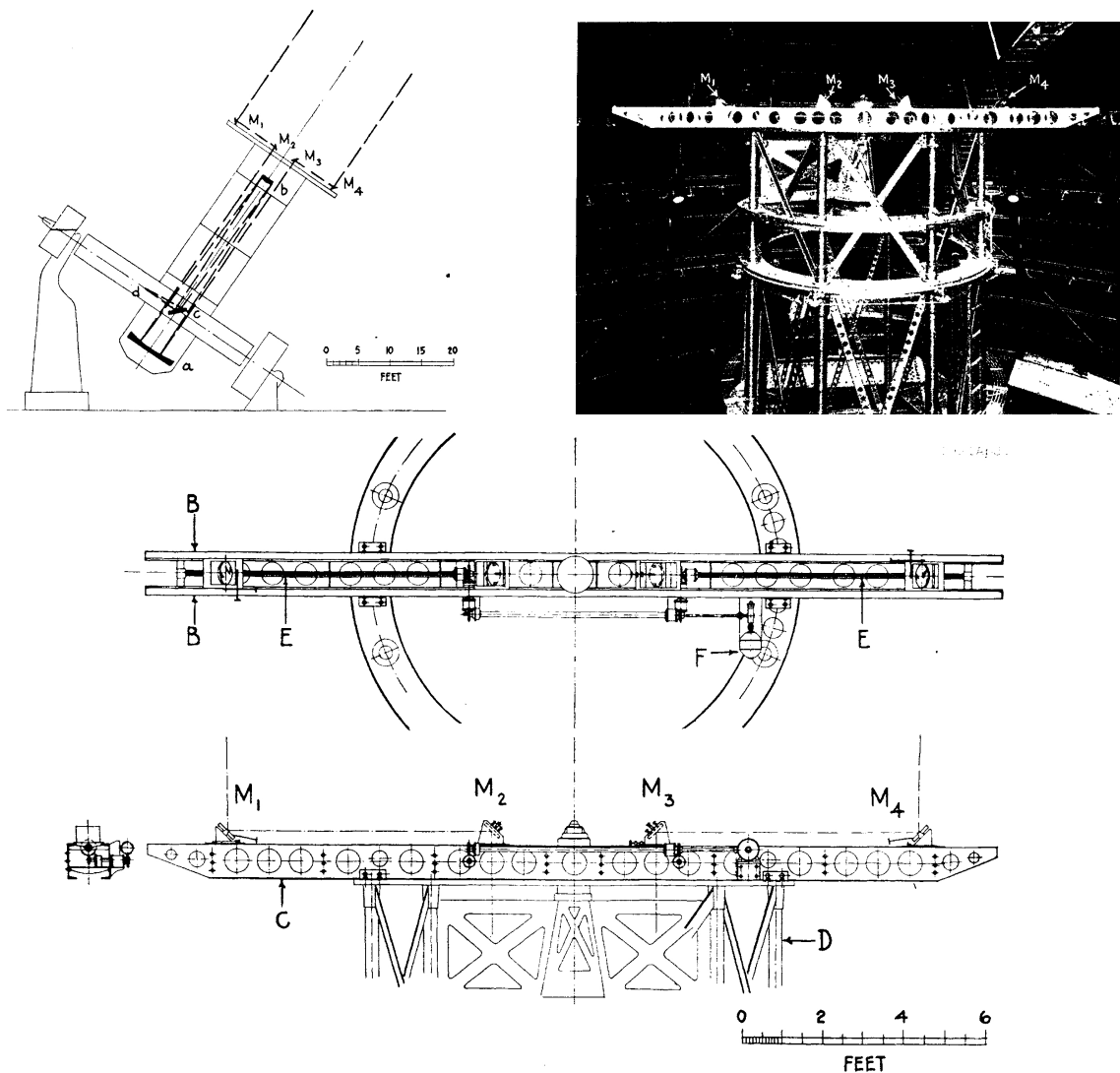


Fig. 8.13 – Diagrama com o posicionamento dos espelhos (M_1 a M_4) do interferômetro estelar para a medição do diâmetro de Betelgeuse por Pease e Anderson (em cima, à esq.), com detalhamento técnico (vistas superior e lateral) da barra/linha de base ao longo da qual deslizavam os espelhos (em baixo). Foto da base montada sobre o tubo do telescópio, com posições dos 4

espelhos marcadas (em cima, à dir.) (MICHELSON e PEASE, 1921, pp. 250-251).

Porém, como os espelhos deslizantes não eram continuamente ajustáveis, e era preciso adicionar placas compensadoras e cunhas de vidro para fazer o ajuste fino quando os espelhos já se encontravam próximos à posição adequada, a operação do interferômetro requereu duas pessoas, uma das quais numa posição peculiar. Como Pease descreveu numa carta a Eddington, “no memorável [dia] 13 nós [Pease e Anderson] cobrimos o final do tubo [do telescópio] com lona, exceto nas aberturas necessárias, e colocamos uma tábua através do final do tubo para o assistente ali sentar e ajustar os espelhos” (*apud* DeVORKIN, 1975, p. 11).

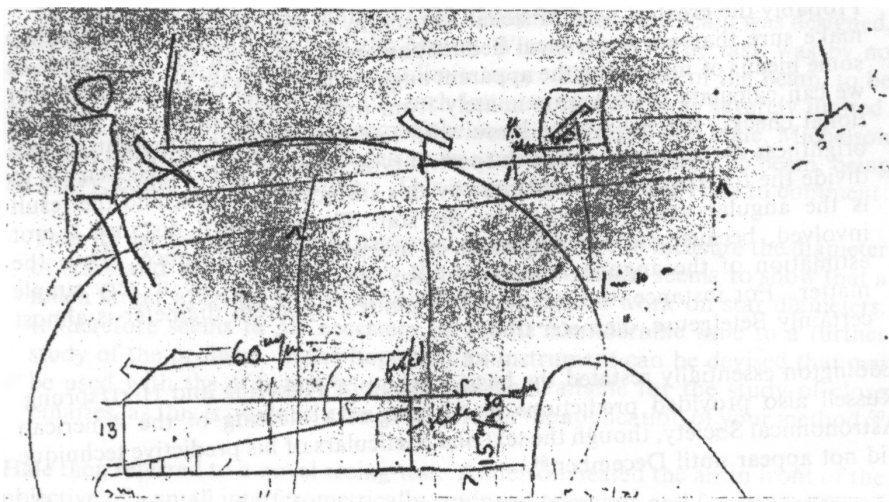


Fig. 8.14 – Rascunho do caderno de trabalho de Pease retratando a posição do assistente sobre o final do tubo do telescópio para o ajuste dos espelhos durante a medição do diâmetro de Betelgeuse na noite de 13 de dezembro de 1920 (DeVORKIN, 1975, p. 12).

O telescópio foi apontado para Betelgeuse, e quando os espelhos foram posicionados a uma distância de 121 polegadas (aproximadamente 3,07 m) as franjas desapareceram. Com os espelhos travados na mesma posição, o telescópio foi apontado para outras estrelas próximas e as franjas ressurgiram, comprovando que o efeito se devia de fato à extensão de Betelgeuse.

Para estimar o diâmetro de Betelgeuse, Michelson e Pease assumiram que (1) o comprimento de onda efetivo da luz da estrela era de 575 nm; e (2) que o disco era

uniformemente iluminado, obtendo então $a = 1,22 \lambda/b = 0,047''$ para o diâmetro angular de Betelgeuse. Levando em consideração a paralaxe observada⁴¹⁹, de $0,018''$, obtiveram para o diâmetro linear da gigante vermelha o valor de 240×10^6 milhas (mais de 386 milhões de quilômetros), *i. e.*, pouco menos do que o diâmetro da órbita de Marte, de cerca de 460 milhões de quilômetros (MICHELSON e PEASE, 1921, p. 259).

A confirmação obtida pelos resultados de Michelson e Pease para as previsões teóricas feitas por Arthur Eddington (1882-1944) para o diâmetro de Betelgeuse foi celebrada pelo astrônomo britânico, entrevistado pelo correspondente do *New York Times* imediatamente após tomar conhecimento dos resultados (por “cabograma”)⁴²⁰:

(...) Fiz referência [previamente] ao fato de que este experimento que estava sendo levado a cabo seria da maior importância. É claro que nós temos teorias, e, trabalhando a partir destas teorias, produzi uma tabela com o que eu pensei que seriam os diâmetros angulares de certas estrelas, e estou encantado em saber que os números batem tão bem. Isto pareceria mostrar que as teorias têm estado do lado certo. (...) Esta é uma confirmação muito interessante da teoria de Russell e Hertzsprung das estrelas gigantes e anãs, dando evidência direta que Betelgeuse é uma das estrelas infladas e muito diferente do nosso Sol (SCIENCE, 1921, p. 22) [viii9].

E portanto a medição correspondeu na prática a uma corroboração da teoria da evolução estelar. Mas talvez ninguém tenha expressado melhor o entusiasmo e a admiração geral pelo feito de Michelson, Pease e Anderson do que H. C. Wilson, ao escrever que “[n]ovamente o aparentemente impossível foi alcançado! O diâmetro de uma estrela foi medido diretamente” (WILSON, 1921, p. 189).

419 Na verdade uma média de três valores obtidos por dois métodos distintos.

420 A informação seguiu incorreta, no entanto, ou foi transcrita de forma incorreta quando de sua publicação na *Science*, pois o diâmetro encontrado para Betelgeuse aparece ali como igual a 260 milhões de milhas, 20 milhões de milhas a mais que o resultado efetivamente encontrado por Michelson e Pease em seu trabalho.

9 Espectroscopia e Metrologia Interferométricas

“After all the progress of physics is written in the history of the development of new instrumental techniques”⁴²¹

George Hale

9.1 Introdução

Na maior parte dos livros didáticos de interferometria parece haver uma clara distinção entre as aplicações *espectroscópicas* e *metrológicas* de montagens interferométricas. No entanto, ambas estão intrinsecamente relacionadas. De fato,

(m)edições interferométricas de comprimento podem ser consideradas tanto como medições do comprimento de onda de uma linha espectral quanto como medições do comprimento em termos de um comprimento de onda conhecido. Historicamente ambos os pontos de vista tiveram seus momentos (STEEL, 1967, p. 135)[ix1]

Vimos no capítulo 2 como a descoberta do fenômeno da interferência da luz consagrou na teoria ondulatória da luz do século XIX a associação entre cor e comprimento de onda, permitindo a Young de fato medir os comprimentos de onda a partir da montagem da fenda dupla (SHAMOS, 1959, 103; YOUNG, 1845, p. 365). No entanto, um grande avanço para a exatidão destas medidas foi dado com a descoberta das linhas de absorção no espectro da luz solar por Fraunhofer entre 1812 e 1814⁴²². Utilizando uma fenda estreita para colimar a luz

421 “No final das contas o progresso da física está escrito na história do desenvolvimento de novas técnicas instrumentais” (*apud* MILLIKAN, 1938, tradução nossa).

422 A descoberta de Fraunhofer deveu muito aos avanços no fabrico de prismas e lentes e do próprio vidro de que eram constituídos, desenvolvimentos que devem ser creditados ao próprio Fraunhofer e a outros artesãos

solar que entrava num prisma e observando o espectro solar de forma muito ampliada com um telescópio, Fraunhofer percebeu a presença de um grande número de finas linhas escuras sobreposto ao espectro⁴²³. As oito linhas mais bem definidas foram nomeadas por Fraunhofer com as oito primeiras letras do alfabeto, a partir do vermelho em direção ao violeta (ver fig. 9.1). As cores correspondentes a estas linhas foram rapidamente adotadas como referências para a determinação de comprimentos de onda com maior exatidão, e a linha D em particular, correspondente ao duplete do sódio no amarelo, teve um papel crucial no desenvolvimento posterior da espectroscopia por propiciar um padrão de comprimento de onda facilmente identificável e reproduzível, relativamente intenso e fino, e próximo ao centro do espectro. Tabelas com os valores medidos por diversos pesquisadores para os comprimentos de onda correspondentes a estas linhas passaram a ser referências obrigatórias para a pesquisa em óptica (DUFET, 1900, pp. 1173-1174 é um bom exemplo, ainda que tardio; ver também BERNARD, 1864; MASCART, 1864a, 1864b, 1867 e 1868).



Fig. 9.1 – Posição das linhas de Fraunhofer no espectro solar. A linha D marca o duplete do sódio no amarelo. Nesta imagem, retirada da apresentação de Michelson quando da outorga de seu prêmio Nobel, em 1907, outras linhas já haviam sido “batizadas” (*b*, *L*, *N* e *P*) (NOBEL FOUNDATION, 1998, p. 168).

Em 1821 Fraunhofer inventou a rede de difração, ampliando a possibilidade de decompor a luz em suas constituintes cromáticas (NOBEL FOUNDATION, 1998, p. 167).

e técnicos dos estados alemães no início do século XIX. Uma história detalhada deste processo pode ser lida em JACKSON, 2000.

423 E, de quebra, inventou o espectroscópio, “esta maravilha da ciência moderna” (MICHELSON, 1907).

Com a retícula proporcionada pela constância das linhas espectrais, Fraunhofer e outros puderam medir com grande exatidão os índices de refração de diferentes tipos de vidro para séries de comprimentos de onda, avançando em muito os estudos e técnicas sobre acromatização de elementos ópticos, por exemplo.

Mascart assim resumia em 1868 a situação dos valores dos comprimentos de onda das raias espectrais principais de Fraunhofer conforme medidas por diferentes pesquisadores utilizando diferentes métodos:

raias	F. Bernard	Stéfan	Ångström	Ditscheiner	van der Villigen	Mascart
A	0,7606	0,7590	0,76037	-	0,76033	-
B	0,6869	0,6865	0,68675	0,68706	0,68658	0,68666
C	0,6561	0,6551	0,65608	0,65589	0,65605	0,65607
D	-	-	0,58940	0,58944	0,58940	0,58943
	0,5888	0,5888	0,5888	0,5888	0,5888	0,5888
E	0,5268	0,5248	0,52687	0,52685	0,53	0,52679
			0,52676		0,52663	
<i>b</i>	-	0,5182	0,51823	0,51713	0,51823	0,51820
			0,51712		0,51711	0,51706
			0,51660		0,51656	0,51655
F	0,4859	0,4838	0,48599	0,48597	0,48601	0,48598
G	0,4306	0,4298	0,43058	0,43090	0,43078	0,43076
H	0,3968	-	0,39674	0,39669	0,39682	0,39672

Tabela 9.1 – Valores dos comprimentos de onda das raias espectrais principais de Fraunhofer conforme diversos pesquisadores. Bernard em particular utilizou o fenômeno da interferência para grandes diferenças de marcha (MASCART, 1868, p. 189).

O uso espectroscópico da técnica interferométrica daria um novo salto em 1845 com a comprovação por Fizeau e Foucault de que o fenômeno da interferência continuava

acontecendo mesmo para diferenças de percurso bastante longas. Para isso engendraram diversas montagens em que conseguiram fazer surgir centenas de franjas sobrepostas ao espectro da luz solar, ora utilizando um espelho duplo de Fresnel, ora uma lâmina fina de faces paralelas, ora mesmo um cristal de quartzo e um prisma de Nicol, utilizando o retardo devido à birrefringência do quartzo (FIZEAU e FOUCAULT, 1849).

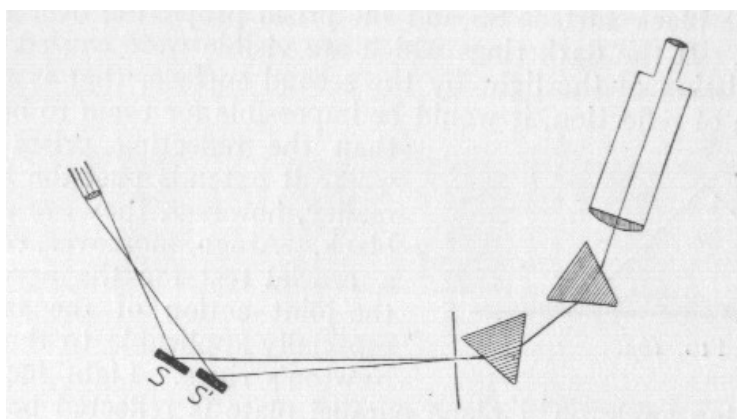


Fig. 9.2 – Montagem de Fizeau e Foucault com o espelho duplo de Fresnel para o estudo das franjas em ordens superiores (segundo MACH, 1926, p. 173).

Porém foi apenas em 1862 que Fizeau, observando uma montagem dos anéis de Newton produzidos com luz (amarela) de sódio, notou que as franjas desapareciam em direção à 500ª ordem, reaparecendo novamente a seguir para ordens superiores, e retornando a uma visibilidade próxima da máxima em torno da milésima ordem⁴²⁴. Deste fato Fizeau concluiu que a luz amarela do sódio era composta de dois comprimentos de onda muito próximos, porém distintos, e que a milésima franja do maior coincidia com a milésima-primeira do menor, e portanto a separação entre os comprimentos de onda era da ordem de 10^{-3} da dimensão de qualquer dos comprimentos de onda⁴²⁵ (FIZEAU, 1862 *apud* WILLIAMS, 1950, p. 49).

424 Ordens tão altas puderam ser observadas separando-se progressivamente a lente da placa na montagem dos anéis de Newton (WILLIAMS, 1950, p. 49).

425 A bem da verdade, $1/983$, conforme lembrado em FIZEAU, 1864, p. 148.

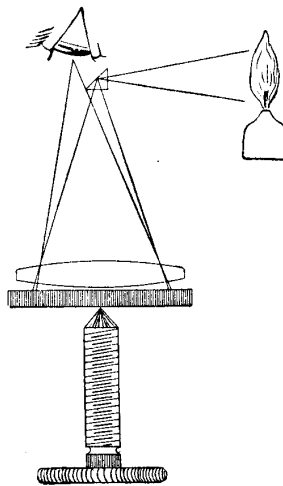


Fig. 9.3 – Montagem de Fizeau para a análise da visibilidade das franjas com a luz de sódio e do efeito de batimento que o levou a supor que a linha D era composta de duas linhas distintas muito próximas uma da outra. Um parafuso micrométrico de passo conhecido permitia afastar continuamente e controladamente a placa refletora (hachurada) da lente para atingir ordens altas dos anéis de Newton (segundo MACH, 1926, p. 177).

Em 1864, ao estudar o efeito do calor sobre as dimensões e a birrefringência de uma lâmina de cristal de faces paralelas iluminada com luz monocromática para que se produzisse ordens altas de interferência, Fizeau percebeu as possibilidades metrológicas da técnica interferométrica:

É certo que a observação destes anéis ou franjas de interferência [nos] dá um meio de apreciar mudanças de comprimento tão fracas que seriam insensíveis aos aparelhos de medição ordinários. A aplicação deste princípio ao estudo das dilatações se apresenta ele mesmo ao espírito, principalmente quando se trata de corpos de dimensões tão pequenas (...).

Vê-se portanto que um raio de luz, com suas ondulações extremamente tênues porém perfeitamente regulares, pode ser considerado (...) como um micrômetro natural da maior perfeição, e particularmente adequado à determinação de comprimentos extremamente pequenos que escapariam a qualquer outro método de medição. Entretanto, duas condições são evidentemente necessárias para legitimar uma aplicação desta natureza; de início um conhecimento muito exato do comprimento de onda da luz empregada, e, em segundo lugar, a certeza de que ondulações sucessivas se seguem a distâncias sempre rigorosamente iguais (...) (FIZEAU, 1864, p. 147) [ix2].

Para todos os efeitos práticos, as determinações das principais linhas de Fraunhofer feitas por Fraunhofer, Mascart e outros utilizando redes de difração provia justamente valores bastante exatos para diversos comprimentos de onda específicos, dentre os quais o dubleto do sódio no amarelo constituía uma ferramenta adequada devido à facilidade de obtenção do sódio e a intensidade da linha (FIZEAU, 1864, pp. 147-148, especialmente a nota de rodapé).

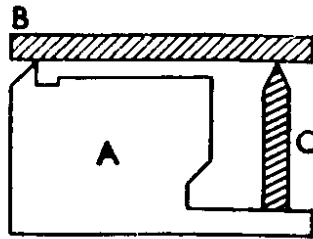


Fig. 9.4 – Variante do dilatômetro de Fizeau desenvolvida pelo Bureau of Standards estadunidense (atual NIST). A cunha de ar formada entre B e A quando da dilatação desigual das bases A (em quartzo) e C dava origem a franjas paralelas (TOLANSKY, 1955, p. 67).

Variantes populares do dilatômetro de Fizeau foram desenvolvidas em que uma cunha de ar era criada entre uma placa de vidro de faces paralelas e a superfície polida do material cuja dilatação se quisesse estudar, de forma a obter franjas paralelas que eram deslocadas lateralmente quando o material era aquecido e o efeito de dilatação térmica empurrava a superfície de uma distância minúscula (porém a partir de então mensurável em termos de comprimentos de onda).

9.2 Espectroscopia após Michelson

Como Fizeau, Michelson percebeu que a visibilidade das franjas ao longo das ordens de interferência devia estar portanto relacionada também⁴²⁶ com a constituição ou distribuição espectral da fonte utilizada para produzir a interferência, um efeito que hoje está associado ao que se chama grau de coerência *temporal* da luz.

Uma fonte de luz puntiforme *perfeitamente* monocromática, isto é, constituída de uma única linha espectral *infinitamente fina*, produziria um sistema de franjas de interferência que teria a mesma visibilidade ao longo de infinitas ordens⁴²⁷. Porém com uma linha espectral *real* isso não aconteceria por dois motivos: (1) a linha poderia ser constituída, como no caso da linha D, de mais de uma componente; e (2) a linha deveria apresentar uma *largura espectral* diferente de zero, açambarcando de fato uma *faixa* de comprimentos de onda. Cada comprimento de onda dentro da faixa produzia um sistema de franjas ligeiramente defasado do outro, de modo que após uma certa ordem perdia-se a visibilidade do sistema⁴²⁸.

426 Vimos no capítulo 8 como Fizeau e, independentemente, Michelson já haviam percebido que a visibilidade das franjas era uma função das dimensões espaciais da fonte (devido ao grau de coerência *espacial*), levando à invenção do interferômetro estelar e à determinação dos diâmetros das estrelas.

427 Abstraindo-se, é claro, os efeitos de atenuação geométrica na intensidade da luz com a distância.

428 Um fator determinante para a largura espectral de uma linha é o chamado *alargamento Doppler*, efeito relacionado à temperatura da fonte luminosa. Como as velocidades dos átomos ou moléculas na fonte obedecem a uma distribuição que é função da temperatura, o efeito Doppler aplicado à luz por eles emitida traduz as variações de velocidade em variações de frequência (ou comprimento de onda) percebidas pelo observador, isto é, a largura espectral. No modelo clássico uma linha só seria pura no zero absoluto.

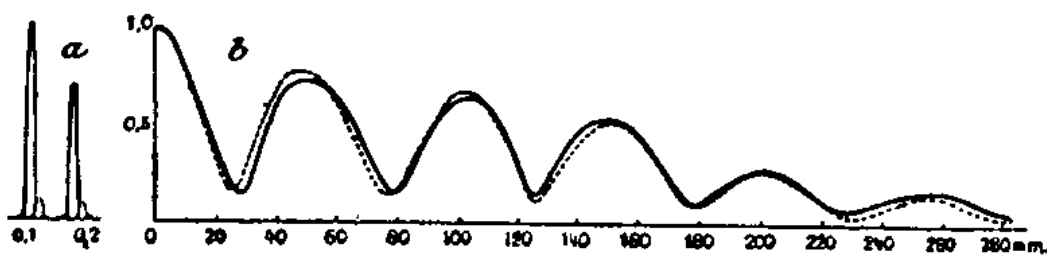


Fig. 9.5 – A visibilidade das franjas de interferência produzidas a partir do dubleto do sódio no amarelo apresenta um comportamento periódico (gráfico à direita), evidenciando a natureza dupla da linha espectral D (fig. à esq.) (MICHELSON, 1927, p. 35).

Invertendo mais uma vez o raciocínio, Michelson percebeu que deveria ser possível estimar a distribuição espectral real da linha através da observação de como variava a visibilidade das franjas à medida que se varria o padrão de franjas da ordem zero (visibilidade máxima) em direção a ordens superiores.

Rayleigh demonstrou que um resultado único e correto para esta análise⁴²⁹ só poderia ser obtido considerando-se as linhas ou conjunto de linhas simétricas em relação a um comprimento de onda central para o qual a intensidade era máxima (RAYLEIGH, 1892 *apud* WILLIAMS, 1950, p. 50). Michelson desenvolveu para tanto um dispositivo mecânico que chamou de “analisador harmônico” (fig. 9.6), e que permitia *plotar* a curva de visibilidade esperada para diferentes configurações da distribuição espectral. Da comparação com estas situações a distribuição espectral era então inferida com boa exatidão, como mostrado na figura 9.7 mais adiante.

429 Trata-se de fato aqui de calcular as componentes de Fourier do padrão de visibilidade.

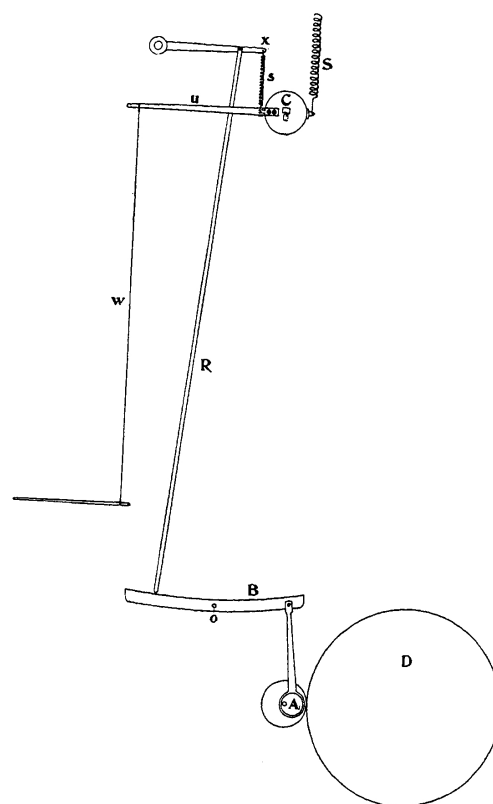
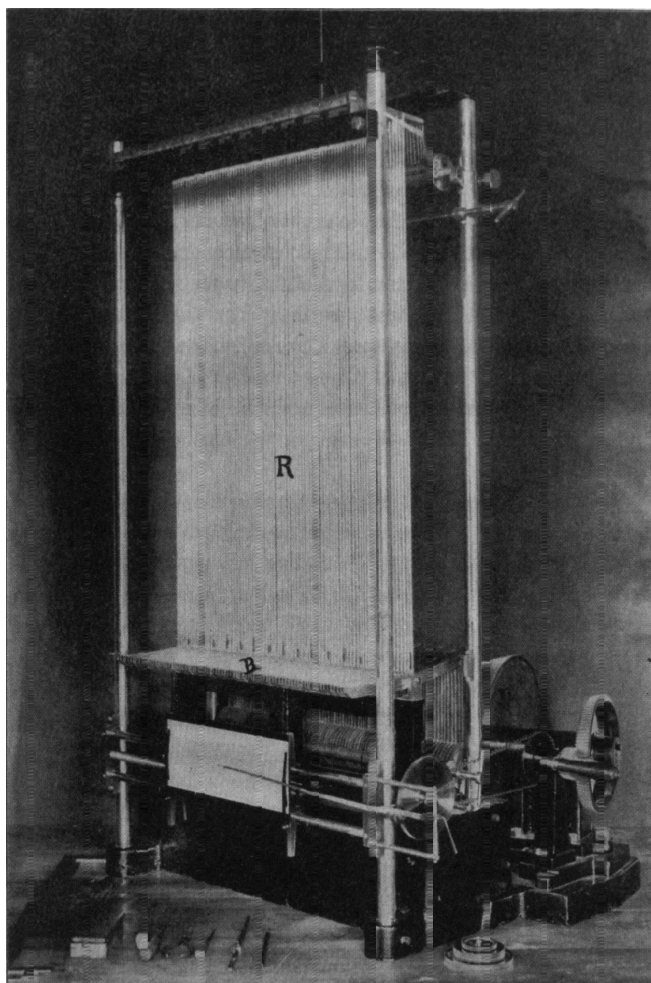


Fig. 9.6 – Analisador harmônico de Michelson (esq.), constituído de 80 osciladores similares ao diagrama da direita, alinhados (MICHELSON, 1903, pp. 67 e 69).

Michelson então utilizou seu interferômetro para projetar franjas de interferência a partir de diversas linhas espectrais clássicas, partindo do contato óptico e crescendo paulatinamente a diferença de percurso para observar a variação na visibilidade das franjas à medida que este era aumentado⁴³⁰. Dois prismas e um sistema de colimação eram colocados entre a fonte e o interferômetro para isolar as linhas selecionadas antes de sua admissão.

430 A estimativa da visibilidade era feita visualmente. Michelson salientava que de qualquer maneira os máximos e mínimos de visibilidade podiam ser bem determinados com facilidade, o que já permitia uma estimativa inicial, e com algum treino era possível categorizar a visibilidade em termos percentuais (100%, 75%, 50%, 25%, zero), obtendo uma forma bastante honesta da curva. Era possível também comparar o grau de visibilidade de um sistema de franjas com o grau de visibilidade de um sistema conhecido, como o dubleto de sódio, por exemplo (MICHELSON, 1903, pp. 73-75).

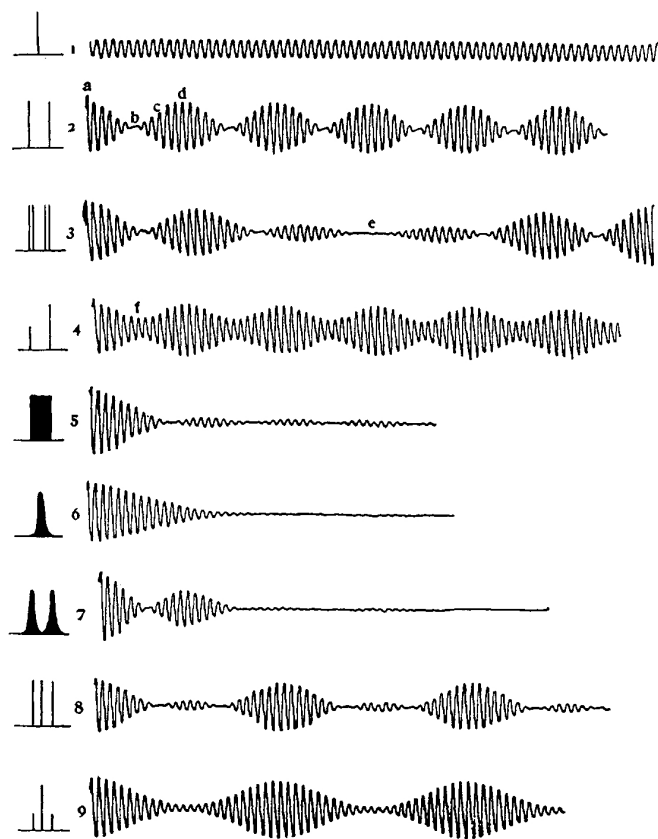


Fig. 9.7 – Simulação no analisador harmônico de diferentes configurações espectrais (esq.) ao lado das curvas de visibilidade esperadas em cada caso (MICHELSON, 1903, p. 71).

Michelson mostrou que a linha vermelha do hidrogênio era composta de duas linhas assimétricas, e verificou que a linha mais “pura”⁴³¹ e estreita disponível era a linha do cádmio no vermelho, entre outras análises.

O uso do interferômetro em espectroscopia foi abrandado no entanto pelos desenvolvimentos que se seguiram na qualidade da produção de redes de difração de alta definição, especialmente por Rowland nos Estados Unidos, e também pelo favorecimento de Michelson ao espectrômetro tipo *échelon*, que ele desenvolveria a seguir⁴³².

431 Isto é, sem estrutura hiperfina.

432 De fato prismas e redes de difração já haviam sido utilizados com fins espectroscópicos, é claro, e faziam parte da tradição do *métier*. O método interferométrico conforme iniciado por Fizeau e avançado por Michelson não foi imediatamente incorporado ao arsenal de técnicas dos espectroscopistas (mais a respeito no capítulo 10).

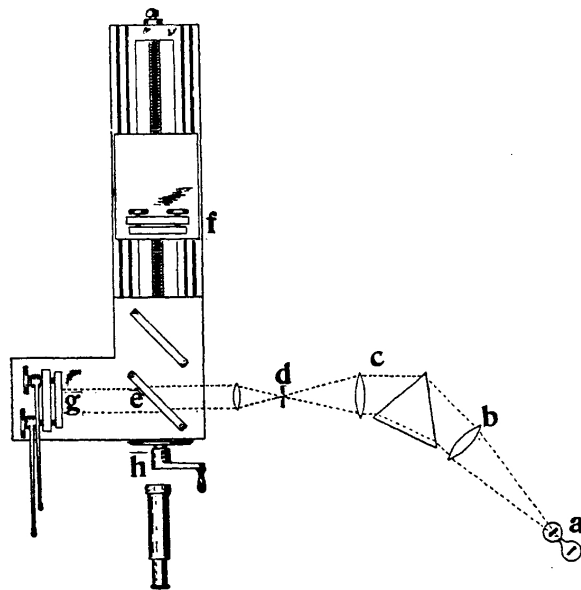


Fig. 9.8 – Montagem do interferômetro de Michelson para uso espectroscópico (MICHELSON, 1903, p. 76).

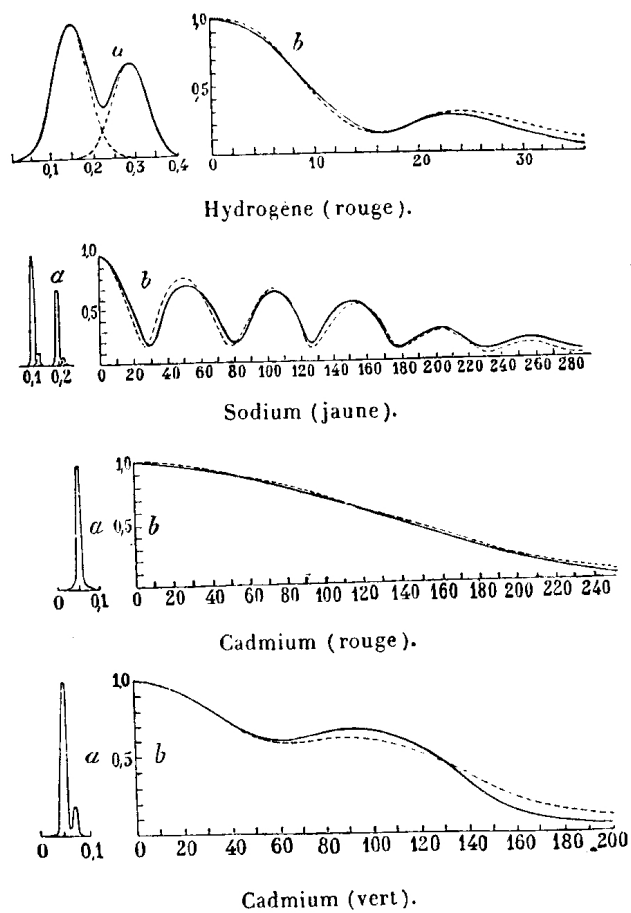


Fig. 9.9 – Análise de algumas das linhas espectrais estudadas por Michelson. De cima para baixo: hidrogênio (vermelho); sódio (amarelo); cádmio (vermelho) e cádmio (verde) (MACH, 1926, p. 183).

Além disso, o objetivo principal de Michelson com o método de análise espectral era estudar quais linhas seriam mais adequadas para as aplicações metrológicas que ele tinha em mente então, e não desenvolver uma nova ferramenta espectroscópica propriamente (JOHNSTON, 2003, pp. 812-813). Foi apenas a partir de 1890, quando Michelson comparou o desempenho de seu interferômetro contra aplicações similares do microscópio, do telescópio e do *espectrômetro*, que as vantagens de seu uso espectroscópico podem ter ficado claras para ele (STALEY, 2000 *apud* JOHNSTON, 2003, p. 813), mas mesmo assim Michelson parece nunca ter advogado prevalência para o método, expressando-se de forma menos assertiva e sugerindo-o mais como um método auxiliar do que como um substitutivo (JOHNSTON, 2003, p. 815).

Estes estudos se deram *grosso modo* em paralelo com a (re)invenção do interferômetro estelar por Michelson, e aparentemente a gênese de ambas as aplicações encontra-se no *insight* de que não apenas os *deslocamentos* ou a *natureza* das franjas de interferência carregavam informação útil, mas também a sua *visibilidade*.

9.3 A Redefinição do Metro em Termos Interferométricos

Em 1907, a Academia Real das Ciências da Suécia outorgou o sétimo prêmio Nobel de Física a Michelson, “por seus instrumentos ópticos de precisão e as investigações espectroscópicas e metrológicas levadas a cabo com seu auxílio” (NOBEL MEDIA AB, 2011).

Em boa medida a frase se refere à realização interferométrica do metro, um projeto ao qual Michelson se dedicou a partir de 1892 e que culminou com êxito em um trabalho conjunto com J. R. Benoît no *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM), em Sèvres, na França (MICHELSON e BENOÎT, 1895).

A ideia já estava clara desde os trabalhos de Fizeau: conhecendo um comprimento de onda com bastante exatidão, a medição da ordem das franjas para uma certa diferença de percurso podia determinar com exatidão de uma fração do comprimento de onda a dimensão desta diferença de percurso.

Assim sendo, era em princípio possível utilizar uma linha espectral para projetar um padrão de interferência no interferômetro de Michelson e determinar de forma muito exata uma certa distância simplesmente movendo-se um dos espelhos do interferômetro desta distância e contando de quantas franjas o padrão era deslocado. Sendo esta distância igual ao metro, tinha-se portanto uma realização interferométrica do padrão universal de comprimento. Como até então o metro era de fato a distância entre duas marcas feitas numa barra sólida, uma redefinição em termos de um comprimento de onda, que podia ser realizada em qualquer laboratório, tinha um caráter revolucionário⁴³³.

A ideia implicava uma série de problemas, no entanto. Em primeiro lugar, como vimos, as linhas espectrais não eram estritamente monocromáticas, e a largura espectral e a natureza eventualmente composta das linhas davam origem a sistemas de franjas que perdiam coerência

433 De fato, consistiu na primeira “realização física” (como se diz no jargão) de uma unidade do sistema métrico que posteriormente daria origem ao sistema internacional de unidades (SI) (MUSÉE NATIONAL DES TECHNIQUES – CNAM, 1989; INMETRO, 1991).

rapidamente, isto é, cuja visibilidade após uma diferença de percurso relativamente pequena⁴³⁴ já era muito próxima de zero. O melhor que se podia fazer, de acordo com Michelson, era utilizar a linha vermelha do cádmio, que parecia ter a menor largura espectral nas condições de operação das lâmpadas espectrais⁴³⁵. Em segundo lugar, mesmo para a linha vermelha do cádmio a distância de um metro era muito grande. Finalmente, como o número de franjas era muito grande, a possibilidade de erro na contagem tornava-se igualmente grande.

Foi elaborado um método então para endereçar estes problemas, que consistia no seguinte: fez-se construir uma série de sub-padrões intermediários, que consistiam de espelhos de primeira superfície paralelos colocados sobre bases de bronze em “L” (como na fig. 9.10 abaixo) e separados por distâncias de 10 cm, 5 cm, 2,5 cm, 1,25 cm, etc., até 0,39 mm.

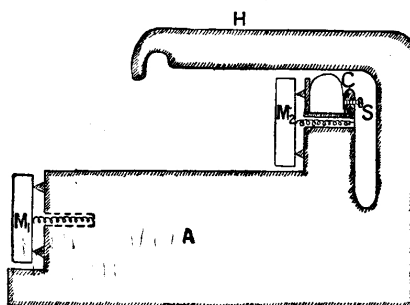


Fig. 9.10 – Sub-padrões para a determinação interferométrica do metro. O braço H permite carregar o padrão sem tocar (e, portanto, transferir calor, dilatando) a parte A que contém os espelhos. O espelho M2 podia ser colocado paralelo a M1 graças ao ajuste do parafuso micrométrico S agindo contra a mola que mantinha o espelho em contato com os pinos de suporte (WILLIAMS, 1950, p. 52), num sistema mecânico simples e popular até os dias de hoje entre os fabricantes de equipamentos ópticos.

A determinação do metro envolveu portanto um processo escalonado, no qual inicialmente determinou-se a quantos comprimentos de onda do cádmio correspondia a

434 Em comparação com o metro.

435 Para melhor definição das linhas espectrais, cada elemento era evaporado em um recipiente transparente sob baixa pressão e então o recipiente era selado. Indutores permitiam disparar uma centelha para excitar o gás no recipiente, que então se tornava luminoso (MICHELSON, 1903, p. 75).

distância entre os espelhos no menor sub-padrão, e a seguir comparou-se este com o sub-padrão seguinte, e assim sucessivamente até finalmente comparar o sub-padrão de 10 cm com o metro padrão⁴³⁶.

A montagem empregada por Michelson e Benoît utilizava um interferômetro de Michelson em que no lugar de um dos espelhos eram montados dois sub-padrões lado a lado (fig. 9.11).

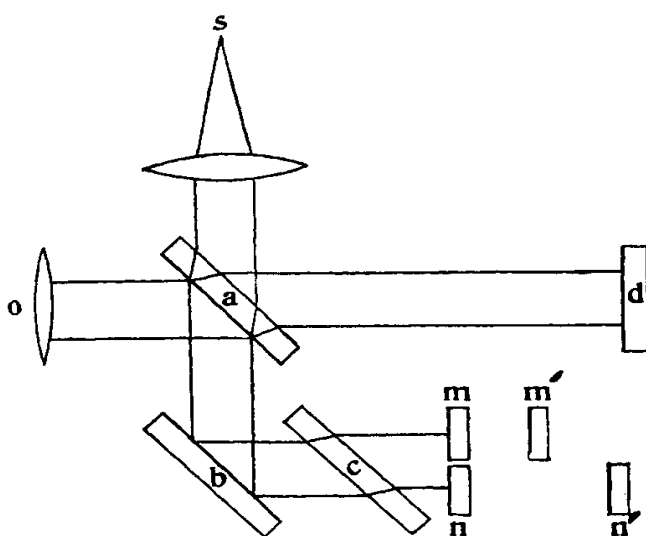


Fig. 9.11 – Montagem para determinação do metro em função do comprimento de onda de linhas espectrais do cádmio. O observador em *o* comparava franjas geradas pela superposição do feixe que refletia no espelho de referência *d* com os feixes refletidos pelos espelhos nos sub-padrões *mm'* e *nn'*, ambos montados sobre carros que podiam ser deslocados suavemente (MICHELSON, 1903, p. 96).

Num primeiro momento eram produzidas franjas circulares com luz branca com os dois menores sub-padrões. Quando se punha em contato óptico os sistemas de franjas gerados tanto por *m* quanto por *n*, tinha-se a certeza de que ambos os espelhos encontravam-se exatamente ao longo do mesmo plano⁴³⁷. O espelho de referência *d* era então movido para trás,

436 Na verdade com uma réplica de trabalho do metro padrão.

437 O uso da luz branca permitia definir muito bem a posição de contato óptico com o espelho de referência,

destruindo as franjas, até alcançar a posição do espelho m' , onde novamente no contato óptico podia-se distinguir as franjas coloridas e a franja central escura. Assim era possível determinar as posições exatas do espelho de referência d que correspondiam ao comprimento do primeiro sub-padrão, mm' com uma exatidão de um décimo ou um vigésimo de franja. Substituindo-se a fonte de luz por uma lâmpada de cádmio e selecionando-se uma linha espectral específica era possível portanto varrer o espelho de referência da mesma distância contando as franjas e assim determinando a quantos comprimentos de onda correspondia o comprimento do primeiro sub-padrão.

O próximo ponto do procedimento era mover para trás o sub-padrão menor da mesma distância do seu comprimento, o que podia ser conseguido novamente observando o contato óptico sob iluminação de luz branca mais uma vez no espelho frontal m . Agora, se o sub-padrão mm' era de fato duas vezes maior que mm' a ordem zero das franjas de luz branca deveria aparecer simultaneamente em m' e n' . É claro que eventualmente isto não acontecia, pois os processos de fabricação e o sistema de ajuste dos espelhos dos sub-padrões não tinham como garantir essa concordância com a fineza necessária, porém a aproximação era boa o suficiente para que a diferença fosse muito pequena (comparável ao comprimento de onda do cádmio), que podia portanto ser estimada projetando-se as franjas com as linhas espectrais selecionadas. Eis como Michelson descreveu o método⁴³⁸:

(s)e houver qualquer diferença [entre as posições de contato óptico nos dois espelhos, m' e n'], então a franja central do sistema de luz branca não estará na mesma posição em ambos os espelhos, e poderemos saber que um [sub-padrão] é

uma vez que a franja central do sistema (ordem zero) neste caso era escura, enquanto todas as outras eram coloridas (MICHELSON, 1903, p. 96).

438 Conhecido como método das “frações excedentes”.

duas vezes maior que o outro a menos de, digamos, duas franjas, o que pode significar meio micron. Desta maneira podemos dizer se um é exatamente duas vezes maior que o outro ou não; e, se não, determinar a diferença dentro de uma fração muito pequena de uma onda.

Quando multiplicamos o número de ondas no primeiro sub-padrão por dois, qualquer erro no excedente fracionário é, é claro, também multiplicado por dois. Então a fração de uma onda que deve ser adicionada ao segundo número é incerta. Se observarmos as franjas produzidas por uma radiação, por exemplo o vermelho, obtemos um sistema de franjas circulares sobre ambos os espelhos do [sub-]padrão; e se esses dois sistemas têm a mesma aparência tanto no espelho superior quanto no inferior, saberemos que essa fração é zero; e o número de ondas no segundo [sub-]padrão é então o número inteiro mais próximo do número determinado. Se não for este o caso, podemos por um processo simples dizer qual fração é, e podemos obter este excedente fracionário para qualquer grau de exatidão. Como um exemplo, podemos multiplicar os números obtidos para o primeiro [sub-]padrão por dois e obter 2.424,74 para o número de ondas no [sub-]padrão nº 2. O valor correto encontrado para esta fração no caso da luz vermelha foi [0],93 em vez de [0],74. Portanto o mesmo grau de exatidão obtido na medição do primeiro [sub-]padrão pode ser obtido em todos os [sub-]padrões até o último (MICHELSON, 1903, p. 97) [ix3].

O metro foi determinado para três linhas distintas do cádmio, o que foi possível a partir de uma montagem espectroscópica acoplada ao interferômetro (fig. 9.12). Todo o sistema era colocado dentro de uma caixa ancorada numa base fixa para evitar variações de temperatura e vibrações mecânicas. Os valores finais obtidos para o comprimento do metro no ar à temperatura de 15°C e à pressão atmosférica normal em termos das linhas do cádmio foram 1.553.163,5 (vermelha); 1.966.249,7 (verde); e 2.083.372.1 (azul).

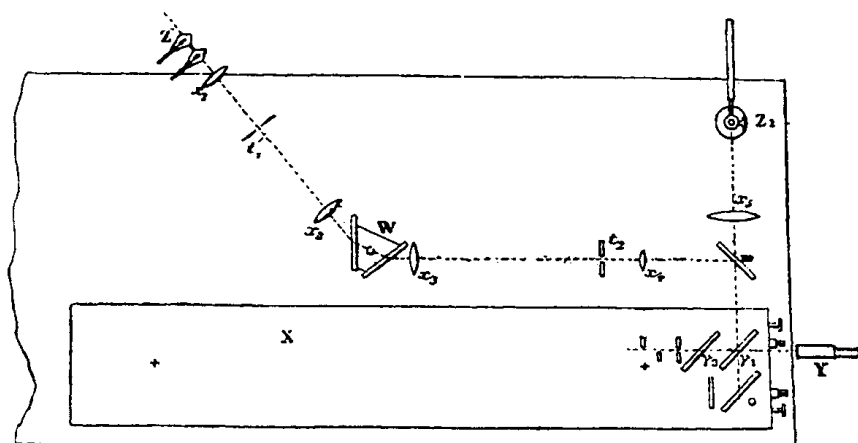


Fig. 9.12 – Montagem para determinação do metro em função do comprimento de onda de linhas espectrais do cádmio, com o sistema espectroscópico para seleção das linhas (linha diagonal com o prisma) e para iluminação com luz branca (MICHELSON, 1903, p. 100).

Os comprimentos das ondas de cádmio forneciam um padrão imaterial contra o qual comparar os padrões materiais de trabalho da cadeia metrológica e se assegurar de sua confiabilidade, pois

(as) ondas de luz padrão não são alteráveis; elas dependem das propriedades dos átomos e do éter universal; e estes são inalteráveis. Pode ser sugerido que todo o sistema solar está se movendo através do espaço, e que as propriedades do éter podem diferir em diferentes porções do espaço. Eu diria que tal mudança, se ela ocorre, não produziria nenhum efeito material em um período de menos de vinte milhões de anos, e até lá nós provavelmente teremos menos interesse pelo problema (MICHELSON, 1903, p. 105, grifos nossos) [ix4].

Em defesa de uma definição “física”, *i. e.*, imaterial para o metro, Michelson argumentava portanto que, ao contrário do que ocorria com as ondas eletromagnéticas, e apesar de todos os cuidados com o manuseio do padrão primário, não era possível saber se o padrão material sofria alguma espécie de alteração interna devido a rearranjos em sua estrutura molecular ao longo do tempo, por exemplo⁴³⁹.

439 Um efeito conhecido em metrologia como “deriva”.

9.4 Interferometria de Feixes Múltiplos

Embora tenhamos nos limitado até aqui, via de regra, à descrição de montagens interferométricas envolvendo a interferência de dois feixes distintos e bem caracterizados, não é possível ignorar que ao longo de sua evolução a interferometria lidou desde muito cedo com efeitos gerados pela interferência de um número muito grande de feixes, como por exemplo no caso dos anéis de Newton e das cores em películas finas, como bolhas de sabão, tentativamente descritas por Hooke.

No início do século XIX, David Brewster descobriu as “franjas de Brewster”⁴⁴⁰, e William Herschel observou franjas localizadas no infinito decorrentes de reflexões múltiplas em placas de vidro paralelas vistas de um ângulo rasante (HERSCHEL, 1807, 1809 e 1810). Longe de explicar o efeito em termos da interferência de múltiplos feixes, Herschel acreditou poder com o fenômeno desconstruir a explicação newtoniana para os anéis de Newton e libertar a óptica de então dos incômodos *fits* de fácil reflexão ou transmissão herdados de Newton (CONNES, 1986, pp. 7-10).

Alguns anos mais tarde, Fresnel calculou as intensidades máximas dos feixes refletido e transmitido quando uma onda luminosa sofria refração numa placa transparente de faces paralelas. Curiosamente, no entanto, Fresnel considerou apenas dois feixes. Devemos a Poisson a observação de que um conjunto infinito de reflexões e refrações estava envolvido. Porém, como Fresnel, Poisson calculou apenas as intensidades máximas. Foi Airy quem, em 1830, efetivamente descreveu de forma completa a expressão da intensidade da luz refletida e

440 Como vimos no capítulo 3.

transmitida por uma placa de vidro de faces paralelas considerando infinitas reflexões no interior da placa – e por isso a conhecemos como “fórmula de Airy” (GEORGELIN e AMRAM, 1995, p. 383; FABRY e PEROT, 1896):

$$I = I_0 \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \pi \frac{\Delta}{\lambda}}$$

onde I_0 é a intensidade máxima, R a refletividade das superfícies da placa e Δ a diferença de caminho óptico.

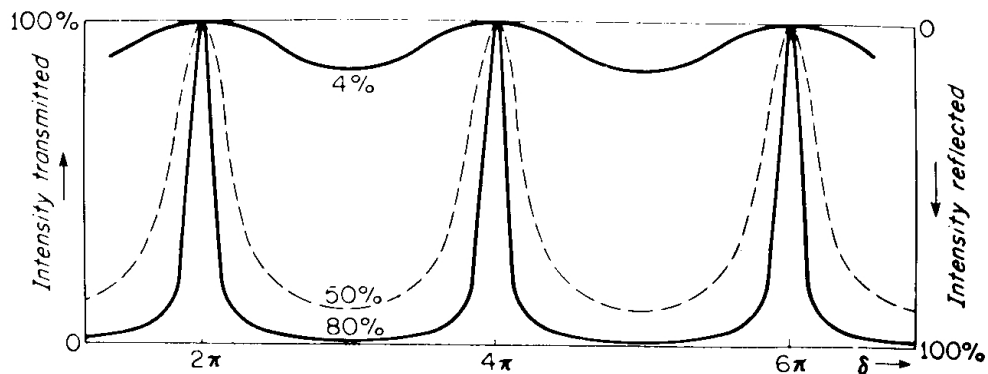


Fig. 9.13 – Função de Airy mostrando os perfis de intensidade das franjas para diferentes valores da refletividade R : 4%, 50% e 80%. (JENKINS e WHITE, 1976, p. 298).

Entretanto Airy não percebeu a relação entre a acuidade da função e a refletividade das superfícies da placa, relação que apenas se tornou clara em 1892 com o trabalho de doutorado do físico francês Charles Fabry (1867-1945) (GEORGELIN e AMRAM, 1995, p. 383). A questão pôde ser estudada experimentalmente graças ao advento, neste ínterim, das técnicas de deposição de metais no vidro. A invenção, devida a Foucault, permitiu produzir placas semi-espelhadas⁴⁴¹ e seu aprimoramento permitiu de fato controlar a refletividade das superfícies espelhadas pela diluição do metal no processo de deposição (CONNES, 1986, pp. 14-18).

⁴⁴¹ Como as utilizadas nos interferômetros de Michelson desde a versão original.

Raymond Boulouch (1861-1937), professor de física no liceu (escola secundária) de Bordeaux, demonstrou pela primeira vez a existência de franjas devidas a interferências múltiplas numa placa de vidro semi-espelhada. O trabalho de Boulouch, publicado em 1893 e praticamente uma reprodução dos experimentos de Fizeau com o duplete do sódio, mostrava que Fizeau não poderia ter visto as franjas com a baixa refletividade de seu interferômetro, mas que para valores mais altos de refletividade as franjas apareceriam nítidas e separadas, tanto no caso de “incidência rasante sobre uma placa de vidro fina, usando uma fenda como fonte e olhando a luz refletida” (BOULOUCHE, 1893 *apud* CONNES, 1986, p. 18), quanto em incidência normal olhando a luz transmitida.

Apesar de Fabry ter sido colega de trabalho de Boulouch em Bordeaux por um breve período, de fevereiro de 1892 a janeiro de 1893, e da lacônica menção às observações de Boulouch por Fabry e seu colega Alfred Perot (1863-1925) em seu primeiro artigo conjunto, de 1896, que apresenta o interferômetro de Fabry-Perot (FABRY e PEROT, 1896, p. 804), não é clara a relação entre o trabalho de Boulouch e a invenção do novo aparelho⁴⁴².

Foi trabalhando em conjunto com Perot no laboratório de óptica da Faculdade de Ciências de Marselha, dirigido por Jules Macé de Lepinay (1851-1904) e possivelmente “o melhor lugar na França para aprender sobre interferência” (CONNES, 1986, p. 13), que Fabry teria tido a ideia do interferômetro. O lampejo teria surgido a partir de um problema prático envolvendo a medição de uma distância muito pequena entre dois eletrodos metálicos:

442 Rouard, Grivet e Bernard sustentam a hipótese de que Boulouch teria chegado ao dispositivo na busca de uma montagem óptica a mais didática possível para ensinar os anéis de Newton para seus alunos, e teria tirado a ideia de jogar com a refletividade das superfícies a partir das apresentações que Fabry teria dado em Bordeaux sobre o tema de sua tese (CONNES, 1986, p. 19).

(...) ocorreu-me a ideia de que seria fácil resolver o problema se fosse possível observar as interferências produzidas *através* do metal, e pensei que [isto] seria possível utilizando uma placa de vidro levemente espelhada (...). Fiquei imediatamente impressionado com a aparência singular das franjas, que eram visíveis como linhas muito finas (...). Eu já havia encontrado condições semelhantes em franjas observadas na vizinhança da reflexão total (franjas de Herschel); a grande refletividade das superfícies espelhadas era evidentemente a causa do fenômeno⁴⁴³ (FABRY, 1926 *apud* CONNES, 1986, p. 20, grifo nosso) [ix5].

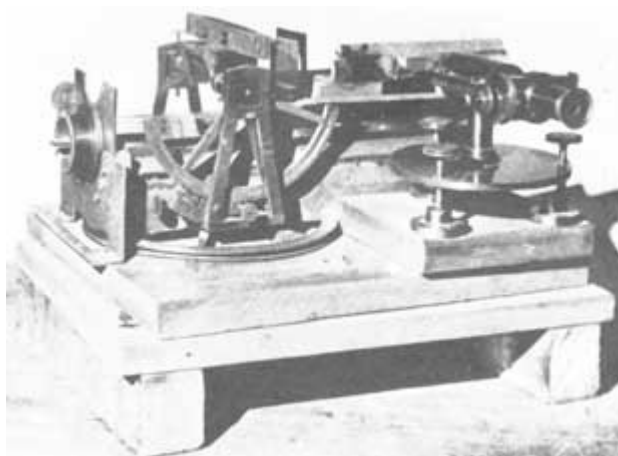


Fig. 9.14 – Interferômetro de Fabry-Perot original.

Fabry e Perot introduziram o novo dispositivo em seus dois trabalhos consecutivos de 1896 (FABRY e PEROT, 1896; PÉROT⁴⁴⁴ e FABRY, 1896). Com grande clareza Fabry e Perot perceberam as múltiplas possibilidades de aplicação de seu novo instrumento, e,

443 Ao recapitular como as coisas haviam se passado, mais de trinta anos depois, Fabry omitia a menção às observações de Boulouch e centrava numa questão metrológica em vez de espectroscópica.

444 Os nomes dos autores aparecem em ordens alternadas nestes e outros trabalhos da dupla. Preferimos manter a ordem como aparecem nos artigos, mantendo a coerência do referenciamento bibliográfico utilizado ao longo de toda a tese. Outro detalhe curioso diz respeito à grafia do nome de Perot, que no segundo artigo aparece acentuado (enquanto no primeiro não). Pierre Connes denuncia a grafia acentuada como uma invenção de autores anglófonos para fazer o nome de Perot parecer mais “francês” (CONNES, 1986, p. 19, nota de rodapé). De fato a grafia acentuada é encontrada em diversos autores de língua inglesa (por exemplo, MULLIGAN, 1998). Porém o argumento não se sustenta se observarmos que no próprio artigo original nos *Comptes Rendus* (PÉROT e FABRY, 1896) o nome aparece acentuado. François Métivier esclarece que Perot costumava assinar os artigos acentuando o seu nome, que no entanto não teria o acento na grafia oficial, isto é, na sua certidão de nascimento, por exemplo (MÉTIVIER, 2006). Assim sendo, embora tenhamos preferido usar o nome não acentuado, acreditamos que ambas as grafias sejam aceitáveis, portanto.

juntamente com Henri Buisson, desenvolveram diversas montagens nos anos seguintes buscando realizá-las na prática⁴⁴⁵.

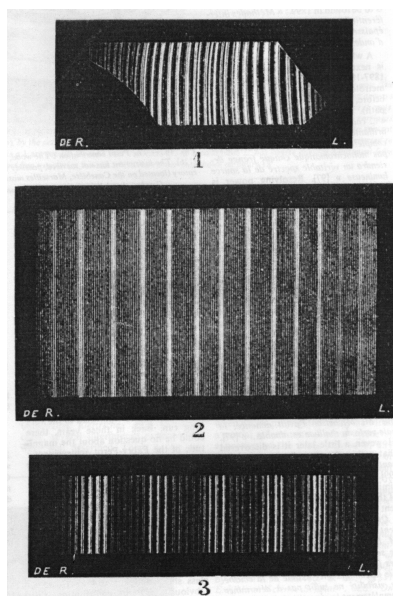


Fig. 9.15 – Imagens das franjas “gravadas a partir das fotografias diretas dos fenômenos” (e portanto gravuras feitas a partir das fotografias, e não as fotografias elas mesmas): (1) franjas de Fizeau, aparentemente de placas de baixa qualidade, mostrando coincidências nas franjas produzidas por duas linhas do mercúrio, não especificadas; (2) espectro “canelado” em luz branca (linhas finas apenas devido à gravura); (3) espectro “canelado” de franjas de Brewster (ou franjas “de superposição” devido a dois pares de placas em série, mostrando um efeito *moiré* (FABRY e PEROT, 1897 *apud* CONNES, 1986, p. 20).

A diferença fundamental entre a abordagem espectroscópica de Michelson e de Fabry e Perot era assim explicada: “se se trata de duas radiações um pouco diferentes, os desaparecimentos [das franjas] observados por Fizeau e pelo Sr. Michelson serão substituídos por *duplicações*” (FABRY e PEROT, 1896a, p. 804, grifo nosso) das franjas. Assim no caso do dubleto do sódio no amarelo, as linhas aparecerão periodicamente sobrepostas (duplicadas) a cerca de cada mil ordens.

445 AMRAM e GEORGELIN, 2000 provê uma extensa bibliografia dos trabalhos publicados por Fabry, Perot e Buisson contendo aplicações de interferometria e em particular do interferômetro de Fabry-Perot.

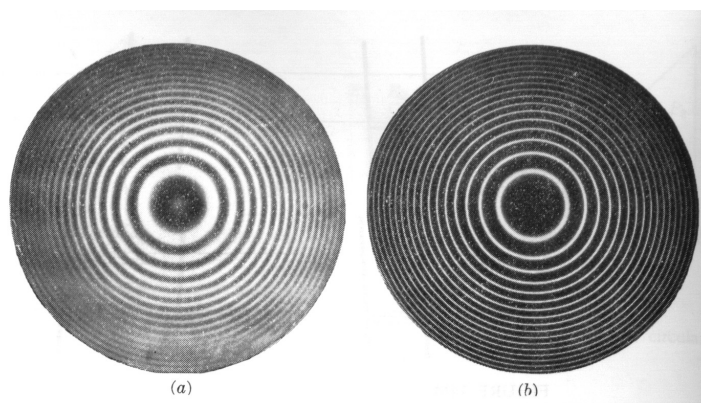


Fig. 9.16 – Comparação entre as franjas produzidas por (a) um interferômetro de Michelson e por (b) um interferômetro de Fabry-Perot com superfícies de refletividade igual a 0,8 (JENKINS e WHITE, 1976, p. 304).

O interferômetro de Fabry-Perot permitiu portanto uma comparação ainda mais acurada do metro com o comprimento de onda de linhas espectrais, o que foi realizado por Benoît, Fabry e Perot em 1905. Eles utilizaram cinco *étalons*⁴⁴⁶ de Fabry-Perot e uma metodologia semelhante à introduzida por Michelson e Benoît em 1892. Com isso puderam determinar o comprimento de onda da linha vermelha do cádmio como sendo de $6438,4696 \times 10^{-10}$ m, ou, equivalentemente, o metro como sendo 1.553.164,1 vezes o comprimento de onda do cádmio no vermelho⁴⁴⁷ (BENOÎT, FABRY e PEROT, 1913 *apud* BORN e WOLF, 1991, pp. 367-369).

Um outro interferômetro de princípio similar ao Fabry-Perot foi a chamada “placa de Lummer-Gehrcke”, que parece retornar aos trabalhos originais de Herschel com as franjas produzidas por lâminas de vidro de faces paralelas quando sob iluminação rasante (LUMMER, 1901; LUMMER e GEHRCKE, 1903 *apud* BORN e WOLF, 1991).

Introduzida por O. Lummer e a seguir aperfeiçoada por E. Gehrcke, nela a alta refletividade

446 O termo “*étalon*” quer dizer padrão em francês, porém tornou-se jargão ao se referir à distância bem determinada definida pela separação das placas de um sistema de Fabry-Perot em que as placas estejam fixadas.

447 Novamente, para medições efetuadas em ar seco a 15°C e pressão atmosférica normal (760 mmHg).

necessária para a interferometria de feixes múltiplos era garantida pela imposição ao feixe incidente de um ângulo de ataque apenas um pouco menor que o ângulo crítico para reflexão total no interior do vidro (caso em que a refletividade alcançaria a unidade). Embora o uso de um grande número de feixes garantisse uma boa resolução e fineza das linhas, ela era menor do que no Fabry-Perot em função do fato de que dada a extensão finita da placa apenas um certo número (finito) de feixes refratados eram somados (TOLANSKY, 1955, p. 217).

Evidentemente um estrito paralelismo das faces da placa é necessário, e quando isto não se dá ocorre a formação de franjas “fantasmas” (PRESTON, 1928, p. 320)⁴⁴⁸.

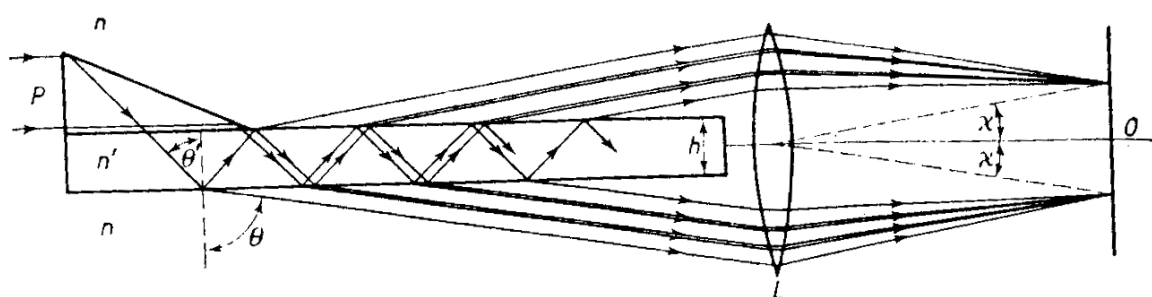


Fig. 9.17 – Interferômetro ou placa de Lummer-Gehrcke. Um prisma cortado convenientemente é posicionado sobre a entrada da longa placa de vidro, de modo a que a luz seja nela admitida em um ângulo ligeiramente menor que o ângulo crítico para reflexão total (BORN e WOLF, 1991, p. 342).

Diferentemente do interferômetro de Fabry-Perot, a placa de Lummer-Gehrcke foi utilizada unicamente para análise espectroscópica. Até a invenção de *coatings* adequados, adaptáveis ao Fabry-Perot, a placa de Lummer-Gehrcke foi bastante utilizada para espectroscopia no ultra-violeta⁴⁴⁹, substituindo-se o vidro por quartzo cristalino, material

448 Preston cita ainda as lâminas fabricadas por um Hilger como livres deste tipo de defeito.

449 A refletividade da prata é muito pobre no ultra-violeta. O início do século XX foi uma época de rápida expansão da interferometria a comprimentos de onda fora do visível, graças em boa medida à evolução das técnicas de detecção e de preparo de materiais. Uma descrição apaixonante deste processo de exploração do “domínio das radiações” pode ser lida na transcrição da palestra proferida por Fabry na Sorbonne por ocasião das celebrações do cinquentenário da Société Française de Physique, em 1925 (FABRY, 1925).

transparente para comprimentos de onda de até 2.000 Å (BORN e WOLF, 1991, p. 347). Um uso importante foi a análise da estrutura hiperfina de linhas espectrais, especialmente as investigadas através de efeito Zeeman. Uma aplicação notória foi a avaliação da intensidade do campo magnético do Sol através da análise do fraco efeito Zeeman produzido nas linhas espectrais (de Fraunhofer) do espectro solar (TOLANSKY, 1955, p. 218).

10 Conclusão

*“It was said in later years that a Michelson interferometer was a marvelous instrument – when operated by a Michelson”*⁴⁵⁰

Dorothy Michelson Livingston

10.1 A Evolução da Interferometria

Até aqui acompanhamos os principais desenvolvimentos da interferometria no século XIX, com alguns de seus desdobramentos para a física e outras disciplinas para além de 1900. Seria no entanto uma tarefa infinitamente mais exaustiva tentar dar continuidade a esta árvore genealógica a partir do início do século XX. Os interferômetros se sofisticaram e se multiplicaram de uma tal forma que hoje em dia traçar um histórico atualizado semelhante ao que buscamos realizar para o século XIX exigiria um esforço enciclopédico. Não obstante, parece-nos relevante para o objetivo da tese traçar em linhas gerais algumas das principais evoluções e aplicações da interferometria do período abordado na tese até os dias de hoje.

Uma variante moderna do experimento da fenda dupla, na qual as fendas são iluminadas por um “feixe” de luz tão fraco que pode-se garantir que não há mais do que um fóton por vez atingindo o anteparo com as fendas, se tornou icônico para a teoria da mecânica quântica⁴⁵¹. Imaginado inicialmente como um *Gedankenexperiment* pelos físicos quânticos do

450 “Foi dito em anos posteriores que um interferômetro de Michelson era um instrumento maravilhoso – quando operado por um Michelson” (LIVINGSTON, 1973, p. 155, tradução nossa).

451 O físico estadunidense Richard Feynman viria mesmo a dizer que este experimento encerra todo o mistério da física quântica.

início do século XX, o experimento foi primeiramente realizado na Itália na época da Segunda Guerra Mundial numa versão com um “biprisma de elétrons” que fazia interferir elétrons atirados um a um. Cada elétron produzia apenas um ponto no detector, porém ao cabo de um tempo suficientemente grande, a coleção de pontos marcados no detector reproduzia um padrão de interferência. Numa pesquisa feita por Robert Crease com leitores da revista *Physics World* em 2002 este experimento foi eleito “o mais belo experimento da física em todos os tempos”.

Pesquisas de vanguarda na área de fundamentos da mecânica quântica e na nova área de criptografia quântica usam corriqueiramente interferômetros de Mach-Zehnder em seus experimentos, tanto mentais quanto reais⁴⁵², o que foi tremendamente facilitado pela introdução de novos elementos nas montagens interferométricas, como os lasers⁴⁵³, detetores e analisadores eletrônicos e fibras ópticas.

Outras versões do interferômetro de Mach-Zehnder surgiram ao longo do século,

452 Por exemplo, recentemente para um teste do paradoxo de Hardy em que dois Mach-Zehnders acoplados “provaram que a realidade existe” (THE ECONOMIST, 2009; LUNDEEN e STEINBERG, 2009).

453 Para se obter franjas de alta visibilidade era preciso que a luz utilizada tivesse: (1) atraso pequeno; (2) *shear* pequeno; (3) pequeno deslocamento (*shift*) angular; (4) intensidades iguais em ambos os braços; (5) e que os feixes não sofressem alterações relativas na polarização. As três primeiras condições podiam ser satisfeitas de duas maneiras: ou o interferômetro era projetado para ter pequenos atraso, deslocamento angular e *shear* ou a extensão e a largura da banda de emissão da fonte eram limitadas. Com as fontes luminosas (térmicas) convencionais da óptica, tais limitações na fonte podiam significar que muito pouca energia ficava disponível. Daí a vantagem de compensar o interferômetro para que uma fonte de luz extensa e de grande largura de banda pudesse ser usada. O advento das fontes de laser mudou isto e agora grandes quantidades de energia estão disponíveis a partir de fontes pequenas e altamente monocromáticas (STEEL, 1967, p. 69). O que não quer dizer que a introdução do laser não tenha trazido novos problemas. Como a fonte efetiva com o laser é muito pequena, as franjas não são localizadas, e portanto todo um conjunto de franjas espúrias aparece, devido às reflexões nas superfícies do sistema, superposto às franjas devidas à interferência dos dois feixes. Um possível procedimento para a eliminação das franjas espúrias é a difundir a luz do laser, por exemplo num vidro jateado, para que o tamanho efetivo da fonte seja ampliado.

como o interferômetro de Bates (interferômetro de *wave-shearing*) (BATES, 1947, *apud* STEEL, 1967, p. 93) e o alcance das aplicações se multiplicou. Por exemplo, o interferômetro de Mach-Zehnder foi usado em estudos de aerodinâmica em túneis de vento, ou para o estudo de características de plasmas (STEEL, 1967, pp. 149-153).

O efeito de arrasto da luz pelos corpos transparentes em movimento continuou a ser estudado em diversas versões de testes relacionados à teoria da relatividade, em particular à questão do arrasto transversal (e não longitudinal, como no caso do experimento de Fizeau visto no capítulo 6).

O interferômetro de Michelson também produziu linhagens de variantes. Algumas delas foram o interferômetro de Twyman-Green⁴⁵⁴ e o interferômetro de Williams, utilizados para análise da qualidade de elementos ópticos, e o microscópio interferencial de Linnik (STEEL, 1967, pp. 55; 75; 88).

Interferômetros cíclicos como o de Sagnac continuaram a ser utilizados para medições de grande exatidão envolvendo rotações, como o laser em anel para detectar rotação interferometricamente proposto por Rosenthal em 1962 e realizado por Macek e Davis no ano seguinte (STEEL, 1967, p. 155). Hoje giroscópios a laser baseados no interferômetro de Sagnac auxiliam a navegação de precisão.

O mesmo método do interferômetro estelar de Michelson foi aplicado para determinar o diâmetro angular de partículas ultramicroscópicas (WILLIAMS, 1950, pp. 22-23). A interferometria estelar evoluiu muito depois dos trabalhos de Michelson e seus parceiros relatados no capítulo 8. Em 1937 Thorndike utilizou um biprisma em interferometria estelar

454 Talvez o único interferômetro patenteado da história da interferometria.

(THORNDIKE, 1937). Na década de 1940 Hanbury-Brown e Twiss inventaram o interferômetro de intensidade, baseado num princípio completamente diferente⁴⁵⁵. O pós-guerra trouxe a interferometria em grandes *arrays* de radiotelescópios, e mais recentemente interferômetros têm sido postos em operação em telescópios em terra ou enviados ao espaço em projetos envolvendo a busca de planetas semelhantes à Terra em outros sistemas estelares – SIM Planet Quest (NASA/JPL, 2004) – ou a detecção de ondas gravitacionais.

O desenvolvimento da eletrônica na década de 1950 permitiu reavivar o método espectroscópico utilizado por Michelson e relatado no capítulo 9 (JOHNSTON, 2003), desenvolvendo-se na área hoje conhecida como espectroscopia de Fourier, pois permitiu coletar e comparar uma grande quantidade de dados, de modo que “um número suficiente de componentes de Fourier é obtido para dar um resultado que se aproxima de uma representação direta do espectro” (STEEL, 1967, p. 68).

A interferometria também passou a ser aplicada mais generalizadamente em metrologia. Depois dos estudos de Michelson, Benoît e Fabry na determinação do metro em termos das linhas espectrais do cádmio, uma proposição para a redefinição do metro em termos da linha do cádmio seria aprovada pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas em 1954 (BIPM, 1954). Quatro anos depois o mesmo comitê decidiria que a linha correspondente à transição entre os níveis $2p_{10}$ e $5d_5$ do átomo de kriptonio 86 (6056 \AA) era ainda mais adequada (BIPM, 1958 apud BORN e WOLF, 1991, p. 369). A Conferência Geral de Pesos e Medidas de 1960 viria a aprovar por unanimidade a mudança, ratificando o valor de

⁴⁵⁵ Que a propósito mais recentemente vem sendo utilizado na área de física nuclear e de partículas (BAYM, 1998; HEINZ, 1998; GURVITS, 2001).

1.650.763,73 vezes o comprimento desta linha como a nova definição do metro (BIPM, 1960 *apud* BORN e WOLF, 1991, p. 369), definição que no entanto não sobreviveria à introdução do laser na óptica metrológica, sendo substituída em 1983 pela atual definição, em termos do comprimento percorrido pela luz numa fração conveniente do segundo⁴⁵⁶. Hoje o metro é realizado em função do batimento de lasers estabilizados em frequência.

Na prática, no entanto, a imensa maioria das comparações metrológicas são feitas através da medição de blocos-padrão (TOLANSKY, 1955; STEEL, 1967, pp. 135-145). Diversas montagens interferométricas são usadas com este fim. No Brasil, por exemplo, no campus do Laboratório Nacional de Metrologia (LNM) do INMETRO⁴⁵⁷, em Xerém-RJ, a divisão de mecânica utiliza interferômetros de Michelson e o método da contagem de franjas em pelo menos três de seus laboratórios, para diferentes tarefas.

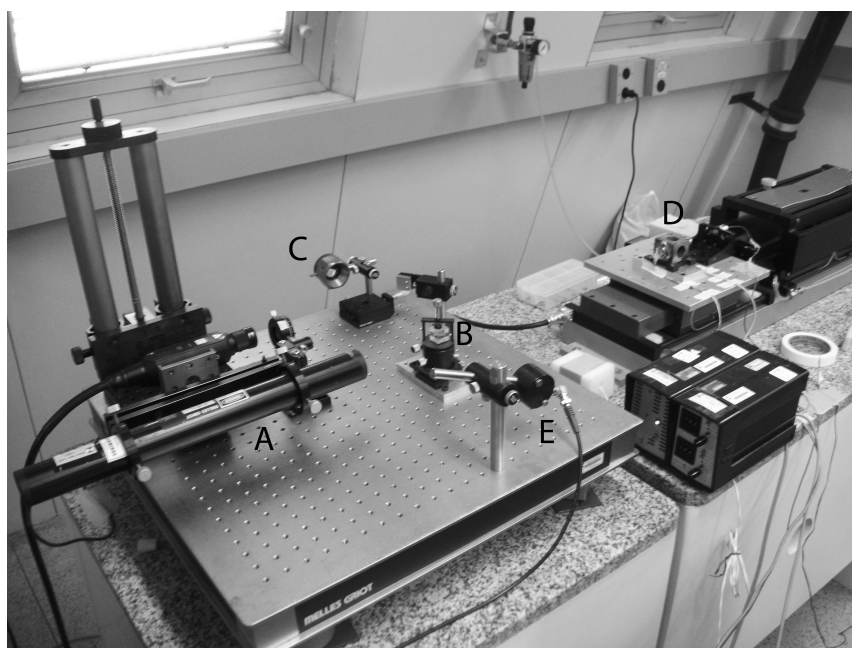


Fig. 10.1 – Montagem de um interferômetro de Michelson para metrologia dimensional em

456 O desenvolvimento de relógios atômicos baseados no átomo de césio permitiu a realização do segundo com exatidão ainda maior do que a do metro, sugerindo a mudança.

457 Autarquia responsável pela rastreabilidade metrológica no Brasil.

laboratório da Divisão de Mecânica do LNM em Xerém. Pode-se reconhecer o laser de He-Ne (A) utilizado como fonte, o divisor de feixe (B), o espelho de referência (C), o espelho móvel (D) e o detector para contar eletronicamente as franjas (E).

Interferômetros de Michelson também são usados pelo laboratório de vibrações do LNM para a calibração de acelerômetros. Nestas montagens um dos espelhos do Michelson é fixo enquanto o outro é solidário a um bloco vibratório, e detectores registram a variação do sistema de franjas com a vibração, comparando os resultados contra os valores apresentados pelo acelerômetro. Existe mesmo um laboratório de interferometria na divisão de óptica, responsável pela realização prática do metro – para o que é utilizado um interferômetro de Köster⁴⁵⁸ (descrição em BORN e WOLF, 1991), que ainda permite ser iluminado com uma lâmpada de cádmio e selecionar as linhas do vermelho, do verde e do azul.

Interferômetros de Fabry-Perot são usados como cavidades ressonantes para lasers (STEEL, 1967, p. 123-124), e com a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais e técnicas foi possível desenvolver filtros interferenciais, *coatings* e outras aplicações do princípio do Fabry-Perot (TOLANSKY, 1955; STEEL, 1967).

Dois prêmios Nobel foram dados para trabalhos em interferometria: Lippman pelo desenvolvimento de uma técnica para fotografia colorida baseada na ideia de ondas estacionárias luminosas, e Gabor pela invenção da técnica holográfica. A holografia se pretende basilar para o desenvolvimento de memórias associativas para a computação óptica. A técnica interferométrica foi utilizada ainda para determinar a velocidade da luz por atraso num interferômetro (FROOME, 1952, 54, 58 e 60, *apud* STEEL, 1967, pp. 153-154), e entre inúmeras outras aplicações em praticamente todas as áreas das ciências experimentais.

458 Ou “Koester”.

10.2 Conclusão

Conforme esperamos ter demonstrado, o papel da interferometria na evolução da ciência no século XIX e início do século XX não se resumiu a ilustrar o fenômeno da interferência luminosa com a fenda dupla de Young e a prover um dado experimental no caminho que levou à teoria da relatividade, como o folclore da física sugere.

Vimos que a interferometria surgiu num momento em que o debate sobre a natureza da luz parecia favorecer uma visão corpuscular da luz, e num contexto em que a teoria das cores vinha sendo amplamente discutida, trazendo de volta à baila o fenômeno dos anéis de Newton. Acompanhamos também como a descoberta do fenômeno da interferência da luz por Young deveu à sua análise dos anéis de Newton e aos seus experimentos com as franjas de Grimaldi, e como a partir dela Young rapidamente divisou montagens demonstrativas e aplicações práticas para o fenômeno, como a determinação dos comprimentos de onda correspondentes a diversas cores. Outras descobertas contemporâneas à descoberta da interferência, como a natureza (semelhante à luz visível) do calor radiante e da radiação ultravioleta, e a polarização da luz por reflexão e uma série de outros fenômenos a ela relacionados, reaqueceram o debate sobre a natureza da luz. A partir daí uma colaboração entre Young, Arago e Fresnel colecionou *expertise* experimental e sucessos explicativos que levaram ao controle das condições de produção e manuseio das franjas de interferência em diferentes situações, produzindo diversas montagens interferométricas distintas, desenvolvendo o conceito de compensação, fundamental para a invenção dos interferômetros propriamente ditos, e descobrindo tanto as leis da interferência da luz polarizada quanto propondo a

fundamental alteração da onda transversal para o modelo ondulatório – explicando praticamente todos os fenômenos de polarização no processo e em última instância fazendo triunfar no debate a teoria ondulatória.

Vimos ainda como as novas técnicas interferométricas desenvolvidas por Arago e Fresnel permitiram construir os primeiros interferômetros propriamente ditos, com o objetivo de medir diferenças sutis nos índices de refração de substâncias, dado relevante para a discussão sobre a forma correta do “poder refrativo” de uma substância, isto é, da relação entre a sua densidade e seu índice de refração.

Mostramos como Arago foi instrumental no fomento de uma nova geração de físicos ligados à pesquisa em interferometria, e como nas mãos desses jovens pesquisadores surgiram novas montagens interferométricas importantes. Jamin inventou um interferômetro que permitia o uso de uma fonte extensa e com razoável separação entre os feixes interferentes, e que depois inspiraria Mach e Zehnder a criar uma versão ainda mais aperfeiçoada. Fizeau e Foucault mostraram que a interferência continuava ocorrendo até ordens muito altas, isto é, para grandes diferenças de caminho óptico, e que o calor radiante também apresentava interferência. Fizeau mediu o arrasto do éter pela água em movimento, corroborando a expressão do coeficiente de Fresnel e contribuindo com um dado fundamental para a discussão a respeito da natureza do éter. Ele ainda inventou um dilatômetro interferencial de grande exatidão, descobriu pela diminuição da visibilidade das franjas de altas ordens que a linha amarela do espectro do sódio era dupla e, finalmente, inspirado por isso, intuiu um método que Michelson reinventaria e poria em prática mais tarde (na forma do interferômetro estelar) para medir o diâmetro de Betelgeuse e corroborar recentes teorias de evolução estelar.

Vimos como Michelson ainda tiraria proveito das variações na visibilidade das franjas de interferência para analisar os perfis das linhas espectrais de diversos elementos com seu interferômetro de braços perpendiculares, dividido originalmente para medir a intensidade do “vento de éter”. Mostramos que os resultados nulos de diversos experimentos interferométricos nesse sentido levaram Lorentz e outros a desenvolver teorias compatíveis, como a teoria do elétron, e como estas teorias tiveram que introduzir conceitos e uma matemática instrumentais para a teoria da relatividade. Acompanhamos ainda como os experimentos de Michelson-Morley-Miller foram relevantes especialmente para a aceitação da teoria da relatividade, e como a incompatibilidade destes com o experimento de Fizeau contribuiu para colocar em xeque os modelos de éter da época, possivelmente inspirando Einstein a descartá-los. Vimos ainda como a crença num vento de éter levou Sagnac a desenvolver suas montagens com o interferômetro cíclico em rotação.

Seguimos Michelson em seu projeto de redefinir o padrão de comprimento em termos de comprimentos de onda da luz, e vimos como Fabry e Perot se inspiraram nas franjas de Brewster para construir um interferômetro baseado em múltiplas reflexões que elevou a acurácia na determinação dos comprimentos de onda das linhas espectrais a um novo patamar.

Finalmente, se ainda paira alguma dúvida sobre a relevância das técnicas interferométricas para o desenvolvimento da física do período, basta lembrar que as duas mais importantes revoluções da física da virada do século XIX para o XX, a teoria da relatividade e a mecânica quântica, tiveram origem em boa parte em dois fenômenos embebidos em interferometria, quais sejam, a busca por um vento de éter e a determinação das posições e intensidades das linhas espectrais da luz emitida pelos diferentes elementos químicos.

Referências Bibliográficas

Referências Primárias

ACADÉMIE DES SCIENCES. Prix Pierson-Perrin. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, vol. 169, pp. 1227-1232, 1919.

ACADÉMIE DES SCIENCES. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, T. 50, n° 1, p. 4, 1º sem., 1860. Disponível em:

http://www.academie-sciences.fr/membres/in_memoriam/Fizeau/Fizeau_oeuvre.htm.

Acesso em: 8 jul. 2010.

AIRY, George Biddell. On a supposed alteration in the amount of astronomical aberration of light, produced by the passage of the light through a considerable thickness of refracting medium. **Proceedings of the Royal Society**, pp. 35-39, 1871.

ANDERSON, John August. Application of Michelson's interferometer method to the measurement of close double stars. **Astrophysical Journal**, vol. 51, pp. 263-275.

ARAGO, François. Mémoire sur la vitesse de la lumière. **Annales de Chimie et de Physique**, 3ª série, T. 37, pp. 180-196, (fev.) 1853.

ARAGO, François. Éloge de Fresnel. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**. tomo 1, v. 1. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). pp. 107-185. Paris: Gide, 1854.

ARAGO, François. Des phénomènes d'interférence en tant qu'ils sont modifiés par une polarisation préalable de la lumière. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tomo 7; Notices Scientifiques, tomo 4, capítulo IX, pp. 336-341. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARAGO, François. Découverte des lois de la dépolarisation par les lames cristallines parallèles à l'axe. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tome 7; *Notices Scientifiques*, tome 4, pp. 390-392. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARAGO, François. Des anneaux colorés. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tome 7; *Notices Scientifiques*, tome 4, pp. 411-413. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARAGO, François. Sur les interférences de la lumière considérées comme moyen de résoudre diverses questions très-delicates de physique et comme servant de base à la construction de nouveaux instruments de météorologie. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tome 7; *Notices Scientifiques*, tome 4, pp. 418-428. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARAGO, François. Remarques sur l'influence mutuelle de deux faisceaux lumineux qui se croisent sous un très-petit angle. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tome 7; *Notices Scientifiques*, tome 4, pp. 432-435. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARAGO, François. Sur les théories de l'émission et des ondes. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tome 7; *Notices Scientifiques*, tome 4, pp. 569-599. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARAGO, François. Mémoire sur des projets d'expériences. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tome 10; *Mémoires Scientifiques*, tome 1, pp. 298-311. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARAGO, François. Mémoire sur la méthode des interférences appliquée à la recherche des indices de réfraction. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tome 10; *Mémoires Scientifiques*, tome 1, pp. 312-334. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARAGO, François. Apêndice IX. Notes historiques sur les anneaux colorés. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tomo 10; Mémoires Scientifiques, tomo 1, pp. 362-367. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARAGO, François. Apêndice XIX. Expériences relatives à la vérification de la valeur de la longueur d'onde d'un rayon rouge. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tomo 10; Mémoires Scientifiques, tomo 1, pp. 399-400. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARAGO, François. Apêndice XXVII. Interférence de l'action chimique de la lumière. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tomo 10; Mémoires Scientifiques, tomo 1, pp. 484-492. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARAGO, François. Apêndice XL. De l'influence du phénomène des interférences sur la vision. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tomo 10; Mémoires Scientifiques, tomo 1, pp. 523-526. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARAGO, François. Apêndice LIV. Sur la détermination des indices de réfraction par la méthode des interférences. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tomo 10; Mémoires Scientifiques, tomo 1, pp. 585-591. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARAGO, François e FRESNEL, Augustin. Mémoire sur l'action que les rayons de lumière polarisés exercent les uns sur les autres. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tomo 10; Mémoires Scientifiques, tomo 1, pp. 132-149. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARAGO, François e PETIT, Alexis. Mémoire sur les puissances réfractives et dispersives de certains liquides et des vapeurs qu'ils forment. In: **Oeuvres Complètes de François Arago**, tomo 10; Mémoires Scientifiques, tomo 1, pp. 123-131. Arago, François e Barral, Jean-Augustin (ed.). Paris: Gide, 1858.

ARCHIVES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES (Paris, França), dossiê Hippolyte Fizeau.

BABINET, Jacques. Sur l'aberration de la lumière. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, T. 9, pp. 774-775, 1839.

BARUS, Carl. **Displacement interferometry applied to acoustics and to gravitation**. Washington: Carnegie Institution of Washington, 1921 (facsimile reimpressa por BiblioLife, LLC com o título **Interferometer experiments in acoustics and gravitation**).

BENOÎT, J. R., FABRY, Charles e PEROT, Alfred. **Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures**, vol. 11, 1895.

BERNARD, F. Mémoire sur la détermination des longueurs d'onde des raies du spectre solaire, au moyen des bandes d'interférence. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, T. 58, n° 25, pp. 1153-1155, 1864.

BILLET. **Annales de Chimie et de Physique**, 3^a série, T. 64, p. 385.

BIPM. **Procès Verbaux du Comité International des Poids et Mesures**, vol. 24, n° 2, 1954.

BIPM. **Procès Verbaux du Comité International des Poids et Mesures**, vol. 26-B (2), M. 30, 1958.

BIPM. **Comptes Rendus de la 11^{ème} Conférence Générale des Poids et Mesures**. Paris: Gauthier-Villars, pp. 51-85, 1960.

BOLTZMANN, Ludwig e TÖPLER, A. Über eine neue optische Methode die Schwingungen tönender Luftsäulen zu analysiren. **Annalen der Physik (Poggendorff Annalen)**, vol. 217, n° 11, pp. 321-352, 1870.

BOULOUCHE, Raymond. **Journal de Physique**, 2, p. 316, 1893.

BOUSSINESQ, Joseph. **Cours de physique mathématique** (de la faculté des sciences). (3 vols.) (Paris, 1878). Paris: Gauthier-Villars & Cie., 1921.

BRACE, Dewitt Bristol. The negative results of second and third order tests of the “aether drift”, and possible first order methods. **Philosophical Magazine**, vol. 10, pp. 71-80, 1905.

BREWSTER, David. **Transactions of the Royal Society of Edinburgh**, vol. 7, p. 435, 1817.

BROUGHAM, Henry (atribuído a). Art. XVI. The Bakerian lecture on the theory of light and colours. By Thomas Young, M. D. F. R. S. Professor of natural philosophy of the Royal Institution. From *Philosophical Transactions for 1802. Part I. Edinburgh Review*, pp. 450-456, jan. 1803.

van CITTERT, Pieter Hendrik. Die Wahrscheinliche Schwingungsverteilung in Einer von Einer Lichtquelle Direkt Oder Mittels Einer Linse Beleuchteten Ebene. **Physica**, vol. 1, n° 1-6, pp. 201-210, 1934.

van CITTERT, Pieter Hendrik. Degree of coherence. **Physica**, vol. 24, n° 1-5, pp. 505-507, 1958.

DESCARTES, René. **Discours de la méthode pour bien conduire sa raison & chercher la vérité dans les sciences, plus la dioptrique, les météores, la mécanique et la musique, qui sont des essais de cette méthode**. Vol. 1, pp. 77-84. Paris: C. Angot, 1668.

DIBBETZ Jr., G. C. e ZEEMAN, Pieter. An interference phenomenon due to the introduction of sodium vapour into one of the paths of the Fizeau-Michelson interferometer-arrangement. **Proceedings of the Netherlands Royal Academy of Arts and Science (KNAW)**, vol. 24, pp. 206-208, 1921.

DRYSDALE, C. V. The problem of ether drift. **Nature**, pp. 833-835, dez 1934.

DUFET, H. **Recueil des données numériques. Optique**. 3° fascículo. Paris: Gauthier-Villars,

1900.

EINSTEIN, Albert. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. **Annalen der Physik**, vol. 17, pp. 891-921, 1905.

EINSTEIN, Albert. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. **Annalen der Physik**, vol. 49, pp. 769-823, 1916.

EINSTEIN, Albert. Ether and the theory of relativity. Palestra na Universidade de Leiden em 5 de maio de 1920. Disponível em: <<http://www.tu-harburg.de/rzt/rzt/it/Ether.html>>. Acesso em 29 dez 2011.

EINSTEIN, Albert. In: **James Clerk Maxwell, a commemorative volume**. Nova Iorque: The Macmillan Company, 1931.

FABRY, Charles. L'exploration du domaine des radiations. In: **Le livre du cinquantenaire de la Société Française de Physique**. Paris: ed. de la Revue d'Optique Théorique et Instrumentale, 1925.

FABRY, Charles. Obituary notice – Alfred Perot. **Astrophysical Journal**, 64, p. 209, 1926.

FABRY, Charles e BUISSON, Henri. Sur la largeur des raies spectrales et la production d'interférences à grande différence de marche. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, vol. 154, pp. 1224-1227, 1912.

FABRY, Charles e PEROT, Alfred. Mesure des petites épaisseurs en valeur absolue. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, vol. 123, n° 20, pp. 802-805, 1896.

FABRY, Charles e PEROT, Alfred. **Annales de Chimie et de Physique**, vol. 12, p. 459, 1897.

FARADAY, Michael. Experimental researches in electricity. Nineteenth series. Section 25: on

the magnetization of light, and the illumination of magnetic lines of force. **Proceedings of the Royal Society**, n° 62, p. 567, 1845.

FITZGERALD, George F. The ether and the earth's atmosphere. **Science**, vol. 13, n° 328, p. 390, 1889.

FIZEAU, Hippolyte. **Annales de Chimie et de Physique**, T. 29, 1849.

FIZEAU, Hippolyte. Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, T. 33, pp. 349-355, 1851.

FIZEAU, Hippolyte. Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur. **Annales de Chimie et de Physique**, 3^a série, T. 57, pp. 385-404, 1859.

FIZEAU, Hippolyte. Sur une méthode propre à rechercher si le azimut de polarisation du rayon réfracté est influencé par le mouvement du corps réfringent – essai de cette méthode. **Annales de Chimie et de Physique**, 3^a série, T. 58, pp. 129-163, 1860.

FIZEAU, Hippolyte. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, 54, p. 1237, 1862.

FIZEAU, Hippolyte. Recherches sur la dilatation et la double réfraction du cristal de roche échauffé. **Annales de Chimie et de Physique**, 4^a sér., T. 2, pp. 143-185, jun. 1864.

FIZEAU, Hippolyte. Prix Bordin: rapport sur le concours de l'année 1867. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, 66, pp. 932-934, 1868.

FIZEAU, Hippolyte. Longueurs d'onde des rayons calorifiques. **Annales de Chimie et de**

Physique, 5^a sér., T. 15, pp. 394-396, nov. 1878.

FIZEAU, Hippolyte e FOUCAULT, Léon. Sur le phénomène des interférences entre deux rayons de lumière dans le cas de grandes différences de marche. **Annales de Chimie et de Physique**, 3^a sér., T. 26, jun. 1849.

FIZEAU, Hippolyte e FOUCAULT, Léon. Recherches sur les interférences calorifiques. **Annales de Chimie et de Physique**, 5^a série, T. 15, pp. 363-394, nov. 1878.

FOUCAULT, Léon. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, 30, p. 551, 1850.

FOUCAULT, Léon. Sur les Vitesses Relatives de la Lumière dans l'Air e dans l'Eau. 35 f. Tese – Faculdade de Ciências de Paris. Paris: 1853.

FRESNEL, Augustin. Mémoire sur la diffraction de la lumière. In: **Mémoires de l'Académie des Sciences de l'Institut de France**. Années 1821 et 1822. T. 5, pp. 339-475. Paris: l'Imprimerie Royale, 1826.

FRESNEL, Augustin. **Oeuvres Complètes de Augustin Fresnel**. T. 2. Henri de Senarmont, Émile Verdet e Léonor Fresnel (eds.). Paris: Imprimerie Impériale, 1868.

GALE, Henry G. On the relation between density and index of refraction of air. **The Physical Review**, vol. 14, n° 1, pp. 1-16, 1902.

GRIMALDI, Francesco Maria. **Physico-mathesis de lumine, coloribus, et iride, aliisque adnexis etc.** Bolonha: Haeredis Victorij Benatij, 1665. Disponível em: <http://fermi.imss.fi.it/rd/bdv?/bdviewer/bid=300682#>. Acesso em 19 ago. 2011.

HABER, Fritz e LÖWE, Fritz. Ein Interferometer für Chemiker nach Rayleighschem Prinzip. **Zeitschrift für Angewandte Chemie**, vol. 23, n° 30, pp. 1393-1398, 1910.

HAMMAR, G. W. The velocity of light within a massive enclosure. **Physical Review**, vol. 48, n° 5, pp. 462-463, 1935.

HAMY, Maurice. Mémoires et observations: sur la mesure des faibles diamètres. **Bulletin Astronomique**, sér. 1, vol. 10, pp. 489-504, 1893.

HARRESS, Franz. Die Geschwindigkeit des Lichtes in bewegten Körpern. Tese – Universidade de Jena. Jena: 1912.

HERSCHEL, William. Investigation of the powers of the prismatic colours to heat and to illuminate objects; with remarks, that prove the different refrangibility of radiant heat. To which is added, an inquiry into the method of viewing the sun advantageously, with telescopes of large apertures and high magnifying powers. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, vol. 90, pp. 255-283, 1800.

HERSCHEL, William. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the sun. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, vol. 90, pp. 284-292, 1800.

HERSCHEL, William. Experiments on the solar, and on the terrestrial rays that occasion heat; with a comparative view of the laws to which light and heat, or rather the rays that occasion them, are subject, in order to determine whether they are the same, or different. Part I. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, vol. 90, pp. 293-326, 1800.

HERSCHEL, William. Experiments on the solar, and on the terrestrial rays that occasion heat; with a comparative view of the laws to which light and heat, or rather the rays that occasion them, are subject, in order to determine whether they are the same, or different. Part II. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, vol. 90, pp. 437-538, 1800.

HERSCHEL, William. Experiments for ascertaining how far telescopes will enable us to determine very small angles, and to distinguish the real from the spurious diameters of celestial and terrestrial objects: with an application of the result of these experiments to a series of observations on the nature and magnitude of mr. Harding's lately discovered star.

Philosophical Transactions of the Royal Society, vol. 95, pp. 31-64, 1805.

HERSCHEL, William. Experiments for investigating the cause of the coloured concentric rings, discovered by sir Isaac Newton, between two object-glasses laid upon one another. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, vol. 97, pp. 180-233, 1807.

HERSCHEL, William. Continuation of experiments for investigating the cause of coloured concentric rings, and other appearances of a similar nature. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, vol. 99, pp. 259-302, 1809.

HERSCHEL, William. Supplement to the first and second part of the paper of experiments, for investigating the cause of coloured concentric rings between object glasses, and other appearances of a similar nature. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, vol. 100, pp. 149-177, 1810.

HERTZ, Heinrich. Ueber Strahlen elektrischer Kraft. **Annalen der Physik und Chemie**, vol. 36, n° 4, pp. 769-783 1889.

HOEK, Martinus. **Recherches Astronomiques de l'Observatoire d'Utrecht: De l'Influence des Mouvements de la Terre sur les Phénomènes Fondamentaux de l'Optique dont se Sert l'Astronomie**. Haia: Martinus Nijhoff, 1861.

HOEK, Martinus. Détermination de la vitesse avec laquelle est entraînée une onde lumineuse traversant un milieu en mouvement. **Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles**, vol. 3, pp. 180-185, 1868.

HUYGENS, Christiaan. **Traité de la lumière**. Leiden: Pierre Vander, 1690.

JAMIN, Jules. Description d'un nouvel appareil de recherches, fondé sur les interférences. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, tomo 42, pp. 482-485, 1856.

JAMIN, Jules. Neuer Interferential-Refractor (tradução para o alemão do mesmo texto publicado em *Cosmos*, nº 10, p. 277, 1856). *Annalen der Physik*, 174, 6, pp. 345-349, 1856.

JAMIN, Jules. Mémoire sur la mesure des indices de réfraction des gaz. *Annales de Chimie et de Physique*, nº 51, pp. 282-303, 1857.

JAMIN, Jules. Mémoire sur les variations de l'indice de réfraction de l'eau a diverses pressions. *Annales de Chimie et de Physique*, nº 52, pp. 163-171, 1857.

JAMIN, Jules. Mémoire sur l'indice de réfraction de la vapeur d'eau. *Annales de Chimie et de Physique*, nº 52, pp. 171-188, 1857.

KELVIN, Lorde (William Thomson). On vortex atoms. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, vol. 6, pp. 94-105, 1867.

KELVIN, Lorde (William Thomson). *Baltimore lectures on molecular dynamics and the wave theory of light. Founded on Mr. A. S. Hathaway's stenographic report of twenty lectures delivered in Johns Hopkins university, Baltimore, in October 1884: followed by twelve appendices on allied subjects by Lord Kelvin*. Londres: C. J. Clay & Sons, 1904.

Disponível em:

<<http://www.archive.org/stream/baltimorelecture00kelviala#page/n8/mode/1up>>. Acesso em 19 set. 2011.

KENNEDY, R. J. e THORNDIKE, E. M. Experimental establishment of the relativity of time. *Physical Review*, vol. 42, nº 3, pp. 400-418, 1932.

LAUE, Max von. Die Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip. *Annalen der Physik* ser. 4, vol. 23, pp. 989-990, 1907.

LAUE, Max von. Zum Versuch von F. Harreß. *Annalen der Physik*, vol. 367, nº 13, pp. 448-463, 1920.

LAUE, Max von. **Die Relativitätstheorie**. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn, 1956.

LLOYD, Humphrey. On a new case of interference of the rays of light. *Transactions of the Royal Irish Academy*, vol. 17, pp. 171-177, 1837.

LODGE, Oliver. **The ether of space**. Nova Iorque, Londres: Harper & Brothers, 1909.

LODGE, Oliver. The geometrisation of physics, and its supposed basis on the Michelson-Morley experiment. *Nature*, vol. 106, n° 2677 (17 fev.), p. 795, 1921.

LORENTZ, Hendrik Antoon. The relative motion of the earth and the aether. Amsterdam, Zittingsverlag Akad. v. Wet., vol. 1, pp. 74-79, 1892. Disponível em:
<http://en.wikisource.org/wiki/The_Relative_Motion_of_the_Earth_and_the_Aether>.
Acesso em: 29 dez. 2011.

LORENTZ, Hendrik Antoon. Simplified theory of electrical and optical phenomena in moving systems. **Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW)**, vol. 1, pp. 427-442, 1899.

LORENTZ, Hendrik Antoon. Stoke's theory of aberration in the supposition of a variable density of the aether. **Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW)**, vol. 1, pp. 443-448, 1899.

LORENTZ, Hendrik Antoon. The Michelson-Morley experiment and the dimensions of moving bodies. *Nature*, vol. 106, n° 2677 (17 fev.), pp. 793-795, 1921.

LUMMER, O. *Verh. Deutsch. Phys. Ges.*, vol. 3, p. 85, 1901.

LUMMER, O. e GEHRCKE, E. *Annalen der Physik*, série 4, vol. 10, p. 457, 1903.

MacCULLAGH, James. On the double refraction of light in a crystallized medium, according to the principle of Fresnel. **Transactions of the Royal Irish Academy**, vol. 16, pp. ?-?,

1830.

MACH, Ludwig. Ueber einen Interferenzrefraktor. *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 12, pp. 89-93, 1892.

MALUS, Étienne. Sur une propriété de la lumière réfléchi. *Mémoires de Physique et de Chimie de la Société D'Arcueil*, T. II, pp. 143-158, 1809.

MALUS, Étienne. Sur une propriété des forces répulsives qui agissent sur la lumière. *Mémoires de Physique et de Chimie de la Société D'Arcueil*, T. II, pp. 254-267, 1809.

MASCART, Éleuthère. Détermination des longueurs d'onde des rayons lumineux et des rayons ultra-violets. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, T. 58, n° 26, pp. 1111-1114, 1864.

MASCART, Éleuthère. Recherches sur le spectre solaire ultra-violet et sur la détermination des longueurs d'onde. *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 1^a série, T. 1, pp. 219-262, 1864.

MASCART, Éleuthère. Recherches sur la détermination des longueurs d'onde. *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 1^a série, T. 4, pp. 7-36, 1867.

MASCART, Éleuthère. Note sur différents travaux relatifs aux longueurs d'onde. *Annales de Chimie et de Physique*, pp. 186-190, 1868.

MAXWELL, James Clerk. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 155, p. 459, 1865.

MAXWELL, James Clerk. *A treatise on electricity and magnetism*. vols. I e II. Oxford: Clarendon Press, 1873.

MAXWELL, James Clerk. Ether. In: *Encyclopaedia Britannica*, 9^a ed., pp. 568-572, 1878.

MESLIN, G. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, 1893.

MICHELSON, Albert Abraham. Measurement by light-waves. *American Journal of Science*, n° 39, pp. 115-121, fev. 1890.

MICHELSON, Albert Abraham. On the application of interference methods to astronomical measurements. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, sér. 5, vol. 30, n° 182, pp. 1-21, jul. 1890.

MICHELSON, Albert Abraham. Visibility of interference-fringes in the focus of a telescope. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* vol. 3, n° 16, pp. 217-220, 1890.

MICHELSON, Albert Abraham. Measurement of Jupiter's satellites by interference. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* vol. 3, n° 17, pp. 274-278, 1891.

MICHELSON, Albert Abraham. The relative motion of the earth and the ether. *American Journal of Science*, 4^a série, vol. 3, 1897.

MICHELSON, Albert Abraham. **Light waves and their uses**. Chicago: The University of Chicago Press, 1903. (Coleção the decennial publications of the university of Chicago, 2^a Sér., vol. 3. Reimpresso em facsímile por Elibron Classics, 2005).

MICHELSON, Albert Abraham. Relative motion of earth and aether. *Philosophical Magazine*, vol. 8, pp. 716-719, 1904.

MICHELSON, Albert Abraham. On the application of interference methods to astronomical measurements. *The Astrophysical Journal*, vol. 51, n° 5, pp. 257-262, 1920.

MICHELSON, Albert Abraham. The effect of the earth's rotation on the velocity of light. I. *The Astrophysical Journal*, vol. 61, p. 137, 1925.

MICHELSON, Albert Abraham. **Studies in optics**. Chicago: The University of Chicago

Press, 1927.

MICHELSON, Albert Abraham e BENOÎT, J. R. Travaux et Mémoires du Bureau de Poids et Mesures, vol. 11, 1895.

MICHELSON, Albert Abraham e GALE, Henry G. The effect of the earth's rotation on the velocity of light. II. **The Astrophysical Journal**, vol. 61, p. 140, 1925.

MICHELSON, Albert Abraham e MORLEY, Edward Williams. Influence of motion of the medium in the velocity of light. **American Journal of Science**, 3^a série, vol. 22, pp. 120-129, 1886.

MICHELSON, Albert Abraham e MORLEY, Edward Williams. On the relative motion of the earth and the luminiferous ether. **American Journal of Science**, 3^a série, vol. 34, n^o 203, pp. 333-345, 1887.

MICHELSON, Albert Abraham e PEASE, Francis Gladheim. Measurement of the diameter of α -Orionis with the interferometer. **The Astrophysical Journal**, vol. 53, pp. 249-259, 1921.

MILLER, Dayton Clarence. Ether-drift experiments at Mount Wilson solar observatory. **Physical Review**, 2^a série, vol. 19, 1922.

MILLER, Dayton Clarence. The ether-drift experiment and the determination of the absolute motion of the earth. **Reviews of Modern Physics**, vol. 5, pp. 203-242, 1933.

MORLEY, Edward Williams e MILLER, Dayton C. The velocity of light in a magnetic field. **Physical Review**, vol. 7, pp. 283-295, (dez.) 1898.

NEWTON, Isaac. A letter of mr. Isaac Newton, mathematick professor in the university of Cambridge; containing his new theory about light and colors: etc. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, vol. 80, pp. 3075-3087, 1672.

NEWTON, Isaac. **Opticks: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light. Also two treatises of the species and magnitude of curvilinear figures.** Londres: Sam. Smith & Benj. Walford, 1704.

NEWTON, Isaac. **Optice: sive de reflexionibus, refractionibus, inflexionibus e coloribus lucis.** Londres: Sam. Smith & Benj. Walford, 1706.

NEWTON, Isaac. **Opticks: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light.** 2^a ed., com acréscimos (reimpressão Burndy Librarys – Grace K. Babson, Collection of the Works of Sir Isaac Newton). Londres: William Innys, 1717.

NEWTON, Isaac. **Opticks: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light.** 3^a ed., corrigida (reimpressão Burndy Librarys – Grace K. Babson, Collection of the Works of Sir Isaac Newton). Londres: William & John Innys, 1721.

NEWTON, Isaac. **Opticks: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light.** 4^a ed., corrigida. Londres: William Innys, 1730.

NOBEL FOUNDATION. Nobel lectures in physics (1901-1921). Cingapura: World Scientific, 1998.

PÉROT, Alfred e FABRY, Charles. Construction des lames étalons pour la mesure optique de petites épaisseurs d'air. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, vol. 123, n° 23, pp. 990-993, 1896.

PEROT, Alfred e FABRY, Charles. Sur une nouvelle méthode de spectroscopie interférentielle. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, vol. 126, pp. 34-36, 1898.

POWELL, Baden. Remarks on Lord Brougham's experiments on light, &c. in the Philosophical Transactions 1850. Part I. In: **Report of the Twenty-first Meeting of the British Association for the Advancement of Science Held at Ipswich in July 1851**, pp. 11-14.

Londres: John Murray, 1852.

RAPS, A. Über Luftschwingungen. *Annalen der Physik (Poggendorff Annalen)*, vol. 286, n° 10, pp. 193-220, 1893.

RAYLEIGH, Lorde (John William Strutt). *Philosophical Magazine*, série 5, vol. 34, p. 407, 1892.

RAYLEIGH, Lorde (John William Strutt). On some physical properties of argon and helium. *Proceedings of the Royal Society*, vol. 59, pp. 198-208, 1896.

ROSENBERG, Hans. Über den Zusammenhang von Helligkeit und Spektraltypus in den Plejaden. *Astronomische Nachrichten*, vol. 186, n° 4445, pp. 71-78, 1910.

SAGNAC, Georges. L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme. *Comptes Rendus Hébdomadaires des Séances de l'Académie de Sciences*, vol. 157, pp. 708-710, 1913.

SAGNAC, Georges. Sur la preuve de la réalité de l'éther lumineux par l'expérience de l'interféromètre tournant. *Comptes Rendus Hébdomadaires des Séances de l'Académie de Sciences*, vol. 157, pp. 1410-1413, 1913.

SAGNAC, Georges. Les deux mécaniques simultanés et leurs liaisons réelles. *Comptes Rendus Hébdomadaires des Séances de l'Académie de Sciences*, vol. 171, pp. 99-102, 1920.

SCHWARZSCHILD, Karl. Über (Ueber) Messung von Doppelsternen durch Interferenzen. *Astronomische Nachrichten*, vol. 139, n° 3335, pp. 353-360, 1896.

SCIENCE. Quotations – professor Michelson on the application of interference methods to astronomical measurements. Washington, DC: American Association for the Advancement of Science, v. 53, n° 1358, pp. 21-22, 7 jan. 1921.

SHANKLAND, Robert S., McCUSKEY, S. W., LEONE, F. C. e KUERTI, G. New analysis of the interferometer observations of Dayton Miller. **Reviews of Modern Physics**, vol. 27, n° 2, 1955.

SNETHLAGE, A. e ZEEMAN, Pieter. The propagation of light in moving, transparent, solid substances. II. Measurements of the Fizeau-effect in quartz. **Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Science (KNAW)**, vol. 22, n° 2, pp. 512-522, 1920.

STÉPHAN, Edouard. Correspondance. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, T. 76, n° 16, pp. 1008-1010 , 1° sem., 1873.

STÉPHAN, Edouard. Sur l'extrême petitesse du diamètre apparent des étoiles fixes. Mémoires Lus. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, T. 78, n° 15, pp. 1008-1012, 1° sem., 1874.

STOKES, George Gabriel. On the aberration of light. **Philosophical Magazine**, vol. 27 (jul.-dez.), pp. 9-15, 1845.

STOKES, George Gabriel. On Fresnel's theory of the aberration of light. **Philosophical Magazine**, vol. 28, pp. ?-?, 1846.

STOKES, George Gabriel. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. **Transactions of the Cambridge Philosophical Society**, vol. 9, pp. ?-?, 1856.

THORNDIKE, Edward M. A biprism for use in stellar interferometry. **Journal of the Optical Society of America**, vol. 27, pp. 51-54, 1937.

TROUTON, Frederick Thomas e NOBLE, H. R. The mechanical forces acting on a charged electric condenser moving through space. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, vol. 202, pp. 165-181, 1903.

TROUTON, Frederick Thomas e RANKINE, Alexander Oliver. On the electrical resistance

of moving matter. **Proceedings of the Royal Society A**, vol. 80, n° 540, pp. 420-435, 1908.

VELTMANN, Wilhelm. Über die Fortplanzung des Lichtes in bewegten Medien. **Annalen der Physik**, vol. 150, pp. 497-535, 1873.

VERDET, Émile. Note sur la direction des vibrations dans la lumière polarisée rectilignement. Mémoires sur la physique publiés à l'étranger (comentários sobre a comunicação de G. H. Quincke em alemão publicada na edição de dez. 1862 da *Monatsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin*). **Annales de Chimie et de Physique**, série 3, tomo 68, p. 220-224, 1863.

YOUNG, Thomas. Outlines of experiments and inquiries respecting sound and light. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, vol. 90, pp. 106-150, 1800.

YOUNG, Thomas. The Bakerian lecture. On the theory of light and colours. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, vol. 92, pp. 12-48, 1802.

YOUNG, Thomas. **Journal of the Royal Institution**, vol. 1, 1802.

YOUNG, Thomas. The Bakerian lecture. Experiments and calculations relative to physical optics. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, pp. 1-16, 1804.

YOUNG, Thomas. **A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts**. Vol. I. Londres: Taylor & Walton, 1845.

YOUNG, Thomas. **Miscellaneous works of the late Thomas Young, M. D., F. R. S., &c., and one of the eighth foreign associates of the national institut of France**. George Peacock (ed.), vol. I. Londres: John Murray, 1855.

ZEEMAN, Pieter. Fresnel's coefficient for light of different colours. First part. **Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW)**, vol. 17, n° 1, pp. 445-451, 1914.

ZEEMAN, Pieter. Fresnel's coefficient for light of different colours. Second part. **Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW)**, vol. 18, n° 1, pp. 398-408, 1915.

ZEEMAN, Pieter. On a possible influence of the Fresnel-coefficient on solar phenomena. **Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW)**, vol. 18, n° 1, pp. 711-715, 1915.

ZEEMAN, Pieter. Direct optical measurement of the velocity at the axis in the apparatus for Fizeau's experiment. **Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW)**, vol. 19, n° 1, pp. 125-132, 1917.

ZEEMAN, Pieter. The propagation of light in moving transparent solid substances. I. Apparatus for the observation of the Fizeau-effect in solid substances. **Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW)**, vol. 22, n° 1, pp. 462-470, 1919.

ZEEMAN, Pieter.; de GROOT, W.; SNETHLAGE, A. e DIBBETZ, G. C. The propagation of light in moving, transparent, solid substances. III. Measurements of the Fizeau-effect in flint glass. **Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (KNAW)**, vol. 23, pp. 1402-1411, 1920.

ZEHNDER, Ludwig. Ein neuer Interferenzrefraktor. **Zeitschrift für Instrumentenkunde**, 11, pp. 275-285, 1891.

ZERNICKE, Frits. The concept of degree of coherence and its application to optical problems. **Physica**, vol. 5, n° 8, pp. 785-795, 1938.

Referências Secundárias

van der AA, A. A. J. **Nieuw biografisch woordenboek**. Vol. 1, pp. 1118-1119. Leiden: 1933.

ABIKO, Seiya. On Einstein's distrust of the electromagnetic theory: the origin of the light-velocity postulate. **Historical Studies in the Physical and Biological Sciences**, vol. 33, parte 2, pp. 193-215, 2003.

ACADÉMIE DES SCIENCES. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, T. 221, n° 24, pp. 721-728, 2º sem., 1945.

ACADÉMIE DES SCIENCES. **Membres de l'Académie des sciences depuis sa création: Hippolyte Fizeau**. Disponível em: <http://www.academie-sciences.fr/membres/in_memoriam/Fizeau/Fizeau_oeuvre.htm>. Acesso em: 8 jul. 2010.

ACLOQUE, Paul. Hippolyte Fizeau et le mouvement de la Terre: une tentative méconnue. **La Vie des Sciences**, T. 1, n° 2, pp. 145-158, 1984.

AL-KHALILI, Jim. The 'first true scientist'. BBC News: Science and Environment. 4 jan. 2009. Disponível em: <<http://news.bbc.co.uk/2/hi/7810846.stm>>. Acesso em: 19 set. 2011.

AMRAM, Phillipe e GEORGELIN, Yvon. A taste of Fabry and Perot's discoveries. **Physica Scripta**, T. 86, pp. 76-82, 2000.

ANDERSON, R., BILGER, H. R. e STEDMAN, G. E. "Sagnac" effect: a century of earth-rotated interferometers. **American Journal of Physics**, vol. 62, n° 11, pp. 975-985, 1994.

ARAGO, F. Fresnel. Notices biographiques. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, T. 1, n° 1, pp. 107-183, 1830.

BIJAOUI, Albert. François Arago, l'optique et les théories de la lumière. In: Débarbat,

Suzanne e Greffe, Florence (ed.). **Arago – journée scientifique du bureau des longitudes**.
Coleção Mémoire de la Science 5. Paris: Académie des Sciences, ed., 2006. pp. 34-46.

BARR, E. Scott. Men and milestones in optics. II. Thomas Young. **Applied Optics**, vol. 2, nº 6, pp. 639-647, jun 1963.

BAYM, Gordon. The quantum mechanics of Hanbury-Brown Twiss interferometry in ultrarelativistic heavy-ion collisions. In: **Proceedings of the fifth Rio de Janeiro International Workshop “Relativistic Aspects of Nuclear Physics”**, pp. 3-17. T. Kodama, C. E. Aguiar, S. B. Duarte, Y. Hama, G. Odyniec e H. Ströbele (eds.). Cingapura: World Scientific, 1998.

BORK, Alfred M. The “FitzGerald” contraction. **Isis**, vol. 57, nº 2, pp. 199-207, 1966.

BORN, Max e WOLF, Emil. **Principles of optics – eletromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light**. 6ª ed. Oxford: Pergamon Press, 1991.

BRENNI, Paolo. 19th Century French Scientific Instrument Makers. XIII: Soleil, Duboscq, and Their Successors. **Bulletin of the Scientific Instrument Society**, nº 51, pp. 7-16, 1996.

BROWN, Harvey R. The origins of length contraction: I. The FitzGerald-Lorentz deformation hypothesis. **American Journal of Physics**, vol. 69, pp. 1044-1054, 2001.

BRUSH, Stephen G. Note on the history of the FitzGerald-Lorentz contraction. **Isis**, vol. 58, nº 2, pp. 230-232, 1967.

BUCHWALD, Jed Z. **The rise of the wave theory of light – optical theory and experiment in the early nineteenth century**. Chicago: The University of Chicago Press, 1989.

BUCHWALD, J. Z. The battle between Arago and Biot over Fresnel. **Journal of Optics**, vol. 20, nº 3, 1989.

CAMEL, Tânia de O. Entre o Discreto e o Contínuo: os Átomos de Éter. Tese –

Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro: 2000.

CANEVA, Kenneth L. Ampère, the etherians and the Oersted connection. **The British Journal for the History of Science**, vol. 13, nº 2 (jul.), pp. 121-138, 1980.

CANTOR, Geoffrey. The changing role of Young's ether. **The British Journal for the History of Science**, vol. 5, nº 17, pp. 44-62, 1970.

CHEN, Xiang. **Instrumental traditions and theories of light: the uses of instruments in the optical revolution**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.

CHEN, Xiang e BARKER, Peter. Cognitive appraisal and power: David Brewster, Henry Brougham, and the tactics of the emission-undulatory controversy during the early 1850s. **Stud. Hist. Phil. Sci.**, vol. 23, nº 1, pp. 75-101, 1992.

de CLERCQ, Peter. **The Leiden cabinet of physics**. Leiden: Museum Boerhaave, Leiden, 1989.

COHEN, I. Bernard. A última entrevista de Einstein. In: **Einstein: os 100 anos da teoria da relatividade**, pp. 212-225, Andrew Robson (ed.). Rio de Janeiro: Elsevier e Editora Campus, 2005.

CONNES, Pierre. From newtonian fits to wellsian heat rays: the history of multiple-beam interference. **Journal of Optics**, vol. 17, nº 1, pp. 5-28, 1986.

CREASE, Robert P. **Os 10 mais belos experimentos científicos**. Rio de Janeiro: Zahar, 2006.

CREASE, Robert P. **As grandes equações: a história das fórmulas matemáticas mais importantes e os cientistas que as criaram**. Rio de Janeiro: Zahar, 2011.

DARRIGOL, Olivier. The electrodynamic revolution in Germany as documented by early German expositions of "Maxwell's theory". **Archive for History of Exact Sciences**, vol. 45, nº

3, pp. 189-280, 1993.

DARRIGOL, Olivier. The electron theories of Larmor and Lorentz: a comparative study. **Historical Studies in the Physical and Biological Sciences**, vol. 24, pp. 265-336, 1994.

DARRIGOL, Olivier. The genesis of the theory of relativity. In: **Einstein 1905-2005**. Coleção Séminaire Poincaré, pp. 1-22, 2005.

DeVORKIN, David H. Michelson and the problem of stellar diameters. **Journal for the History of Astronomy**, 6, pp. 1-18, 1975.

van DONGEN, Jeroen. On the role of the Michelson-Morley experiment: Einstein in Chicago. **Archive for History of Exact Sciences**, vol. 63, pp. 655-663, 2009.

FERRARO, Rafael e SFORZA, Daniel M. Arago (1810): the first experimental result against the ether. Disponível em <<http://arxiv.org/abs/physics/0412055>>. Acesso em 24 ago. 2011.

FISHMAN, R. S. Perish, then publish: Thomas Harriot and the sine law of refraction. **Archives of Ophthalmology**, nº 118, vol. 3, pp. 405-409, 2000.

FOX, R. The rise and fall of laplacian physics. **Historical Studies in the Physical Science** 4, pp. 89-136, 1974.

FRANÇON, M. **Optical interferometry**. Londres e Nova Iorque: Academic Press, 1966.

FRANKEL, E. Corpuscular optics and the wave theory of light: the science and politics of a revolution in physics. **Social Studies of Science** 6, nº 2, pp. 141-184, 1976.

FRERCKS, Jan. Creativity and technology in experimentation: Fizeau's terrestrial determination of the speed of light. **Centaurus**, vol. 42, nº 4 (dez.), pp. 249-287, 2000.

FRERCKS, Jan. **Die Forschungspraxis Hippolyte Fizeaus. Eine Charakterisierung**

ausgehend von der Replikation seines Ätherwindexperiments von 1852. Berlin: Wissenschaft & Technik Verlag, 2001.

FRERCKS, Jan. Publish and perish. Das Verhältnis von Publikation zu Theorie und Experiment in Fizeaus Forschungsprogramm zur Äthermitführung. *NTM Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaft*, n° 12, pp. 18-39, 2004.

FRERCKS, Jan. Fizeau's research program on ether drag: a long quest for a publishable experiment. *Physics in Perspective*, n° 7, pp. 35-65, 2005.

FRERCKS, Jan. Immaterial devices. *Centaurus*, vol. 49, pp. 81-113, 2007.

GEORGELIN, Y. P. e AMRAM, P. A review of Fabry and Perot discoveries. In: *3D Optical Spectroscopic Methods in Astronomy*, ASP Conference Series, vol. 71, G. Comte e M. Marcellin (eds.), pp. 382-394, 1995.

GILLISPIE, C. C. (ed.). *The dictionary of scientific biography (DSB)*, 15 vols. + vol. index, Nova Iorque: Charles Scribner, 1970-1980.

GILMOUR, David e WATERS, Roger. Comfortably numb. Intérprete: Pink Floyd. In: *The Wall*. Londres: Harvest Records, 1979. 2 discos sonoros. Lado 3, faixa 6 (6min 24s).

GURVITS, L. I. Interferometry in astrophysics as a roadmap for interferometry in multiparticle dynamics. Disponível em <arxiv.org/pdf/hep-ph/0111445> (2001). Acesso em 24 ago. 2011.

HACKING, Ian. *Representing and intervening: introductory topics in the philosophy of natural science*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

HAKFOORT, Casper. *Optics in the age of Euler: conceptions of the nature of light 1700-1795*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

HALLIDAY, D. e RESNICK, R. **Física**. Parte II. Eletricidade, magnetismo, óptica. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1966.

HARIHARAN, P. **Optical interferometry**. Sydney: Academic Press, 1985.

HARMAN, Peter M. **Energy, force and matter: the conceptual development of nineteenth-century Physics**. New York: Cambridge University Press, 1995.

HARMAN, Peter M. **The natural philosophy of James Clerk Maxwell**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

HECHT, Eugene. **Optics**. 2ª ed. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co., 1987. Reimpresso com correções, 1990.

HEILBRON, J. L. **Weighing imponderables and other quantitative science around 1800**. Historical Studies in the Physical and Biological Sciences. Suplemento para o nº 24, parte I. Berkeley: University of California Press, 1993.

HEINZ, Ulrich. Particle interferometry: new theoretical results. In: **Proceedings of the fifth Rio de Janeiro International Workshop “Relativistic Aspects of Nuclear Physics”**, pp. 19-48. T. Kodama, C. E. Aguiar, S. B. Duarte, Y. Hama, G. Odyniec e H. Ströbele (eds.). Cingapura: World Scientific, 1998.

HIGGITT, Rebekah Frances. **Recreating Newton: newtonian biography and the making of nineteenth-century history of science**. Coleção Science and Culture in the Nineteenth Century (ed. B. Lightman), vol. 2. Londres: Pickering & Chatto, 2007.

HIRSHFELD, A. W. **Parallax – the race to measure the cosmos**. Nova Iorque, Henry Holton and Company, 2001.

HOLTON, Gerald. Michelson and the “crucial” experiment. *Isis*, vol. 60, nº 2, pp. 133-197, 1969.

HOLTON, Gerald, e BRUSH, Stephen G. **Physics, the human adventure – from Copernicus to Einstein and beyond**. 3ª ed. New Brunswick: Rutgers University Press, 2004.

HOUSTON, R. A. Fizeau's experiment and the aether. **Philosophical Magazine**, vol. 37, pp. 214-219, 1919.

HUGO, Victor. Plein ciel. In: **Œuvres poétiques, vol. 1: la légende des siècles**. Paris: Gallimard, 1950.

HUNT, Bruce J. **The maxwellians**. Londres: Cornell University Press, 1994.

INMETRO. **Quadro geral de unidades de medida**. Duque de Caxias: INMETRO, 1989.

INMETRO. **Sistema internacional de unidades SI**. 4ª ed. Duque de Caxias: INMETRO, 1991.

JACKSON, Myles W. **Spectrum of belief. Joseph von Fraunhofer and the craft of precision optics**. Cambridge: The MIT Press, 2000.

JANSSEN, Michel e STACHEL, John. **The optics and electrodynamics of moving bodies**. Preprint 265. Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, 2004.

JENKINS, Francis A. e WHITE, Harvey E. **Fundamentals of optics**. 4ª ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Inc., 1976.

JOHNSTON, S. F. An unconvincing transformation? Michelson's interferential spectroscopy. **Nuncius: annali di storia della scienza**, vol. 18, fasc. 2, pp. 808-823, 2003. Disponível em <http://eprints.gla.ac.uk/2893/>. Acesso em: 9 jan 2012.

KATZIR, Shaul. Poincaré's relativistic physics: its origins and nature. **Physics in Perspective**, vol. 7, pp. 268-292, 2005.

KERNKAMP, G. W. De Utrechtsche Hoogeschool van 1815 tot 1877. In: **De Utrechtsche universiteit 1636-1936**. Fockema Andreae, J. P. *et al.*, pp. 73-134. Utrecht: 1936.

KLEIN, Martin J. Mechanical explanation at the end of the nineteenth century. **Centaurus**, vol. 17, n° 3, pp. 58-82, 1972.

KOSTRO, Ludwik. **Einstein and the ether**. Montréal: Apeiron, 2000.

KUHN, H. New techniques in optical interferometry. **Reports on Progress in Physics**, n° 14, pp. 64-94, 1951.

KUHN, Thomas S. **A estrutura das revoluções científicas**. Tradução Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira. 3ª ed. (Coleção debates, Série ciência,115) São Paulo: ed. Perspectiva, 1992.

LABEYRIE, Antoine. Stellar interferometry: a widening frontier. **Sky and Telescope**, 63 (Apr.), pp. 334-338, 1982.

LACKI, Jan e KARIM, Yacin. Replication of Guye and Lavanchy's experiment on the velocity dependency of inertia. **Archives des Sciences**, vol. 58, pp. 159-170, 2005.

LALLI, Roberto. The reception of Miller's ether-drift experiments in the USA: the history of a controversy in relativity revolution. **Annals of Science**, DOI:10.1080/00033790.2011.637473, pp. 1-62, disponível online em 7 fev. 2012.

LARDNER, Dionysius. **A handbook of optics**. Filadélfia: Blanchard e Lea, 1859.

LAWSON, Peter R. Appendix A: notes on the history of stellar interferometry. In: **Course Notes from the 1999 Michelson Summer School, August 15-19, 1999**. Peter Lawson (ed.), 338 pp., JPL Publication 00-009 07/00, 2000. Disponível em: <http://olbin.jpl.nasa.gov/iss1999/coursenotes.html>. Acesso em: 3 ago. 2010.

LEVITT, Theresa. **The shadow of enlightenment. Optical and political transparency in**

France, 1789-1848. Oxford: Oxford University Press, 2009.

LIVINGSTON, Dorothy Michelson. **The master of light: a biography of Albert A. Michelson**. Chicago: The University of Chicago Press, 1973.

MACFARLANE, Alan e MARTIN, Gerry. **Glass, a world history**. Chicago: University of Chicago Press, 2002.

MACH, Ernst. **The principles of physical optics – an historical and philosophical treatment**. Tradução John S. Anderson e A. F. A. Young. Londres: Methuen & Co. Ltd., 1926.

MALYKIN, G. B. On the possibility of experimental verifying the second postulate of special relativity. **Physics – Uspekhi**, vol. 47, nº 7, pp. 739-742, 2004.

MARTÍNEZ, Alberto A. Ritz, Einstein, and the emission hypothesis. **Physics in Perspective**, vol. 6, pp. 4-28, 2004.

MARTINS, Roberto de Andrade. A dinâmica relativística antes de Einstein. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 27, nº 1, pp. 11-26, 2005.

MASCART, Éleuthère Elie Nicolas. **Traité d'Optique**. Vol. 3. Paris: Gauthier-Villars, 1893.

McCORMMACH, Russell. H. A. Lorentz and the electromagnetic view of nature. **Isis**, vol. 61, nº 4, pp. 459-497, 1970.

MÉTIVIER, Françoise. Jean-Baptiste Alfred Perot. **Photoniques**, nº 25 (set.-out.), 2006.

MILLER, Arthur I. **Albert Einstein's special theory of relativity – emergence (1905) and early interpretations (1905-1911)**. Reading: Addison-Wesley Pub. Co., 1981.

MILLIKAN, Robert A. Biographical memoir of A. A. Michelson 1852-1931. **National Academy of Sciences of the United States of America Biographical Memoirs** 19, 4^a mem.,

1938.

MORUS, Iwan Rhys. **When physics became king**. Chicago e Londres: University of Chicago Press, 2005.

MULLIGAN, Joseph F. Who were Fabry and Pérot? **American Journal of Physics**, vol. 66, n° 9, pp. 797-802, 1998.

MUSÉE NATIONAL DES TECHNIQUES – CNAM. L'aventure du mètre. Les arts et métiers en révolution. Exposition au Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM). 4 abr. – 30 out., 1989.

NASA/JPL. SIM Planet Quest. Science with the Space Interferometry Mission. Project summaries contributed by members of the SIM Science Team. JPL Publication 2004-19. Unwin, Stephen; Turyshev, Slava (eds.). Pasadena: Jet Propulsion Laboratory & California Institute of Technology, 2004.

NEWBURGH, R. Fresnel drag and the principle of relativity. **Isis**, n° 3, Notes & Correspondence, pp. 379-386, 1974.

NOBRE, Francisco Ribeiro. **Tratado de Física Elementar**. 23^a ed. Lisboa: ed. Aillaud & Lelos Lda., 1934.

PATTON, Lydia. Reconsidering experiments. **HOPOS: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science**, vol. 1, n° 2, pp. 209-226, 2011.

PEACOCK, George. **Miscellaneous works of the late Thomas Young**. Vols. I e II. Londres: John Murray, 1855.

PEDERSEN, Kurt Møller. Water-filled telescopes and the pre-history of Fresnel's ether dragging. **Archive for History of Exact Sciences**, vol. 54, pp. 499-564, 2000.

POPULAR SCIENCE MONTHLY. Sketch of Jules Jamin. **Popular Science Monthly**, vol. 31, jun. 1887.

POST, E. J. Sagnac effect. **Reviews of Modern Physics**, vol. 39, n° 2, pp. 475-493, 1967.

PRESTON, Thomas. **The theory of light**. 5^a ed. Londres: Macmillan and Co., 1928.

RASHED, Roshdi. A pioneer in anaclastics: Ibn Sahl on burning mirrors and lenses. **Isis**, vol. 81, n° 3, pp. 464-491, 1990.

ROBERTSON, Howard P. Postulate versus observation in the special theory of relativity. **Reviews of Modern Physics**, vol. 21, n° 3, pp. 378-382, 1949.

ROBINSON, Andrew. **The last man who knew everything – Thomas Young, the anonymous polymath who proved Newton wrong, explained how we see, cured the sick and deciphered the Rosetta Stone, among other feats of genius**. Nova Iorque: Pi Press, 2006.

ROTHMAN, Tony. **Everything's relative and other fables from science and technology**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

ROWE, David E. Max von Laue's role in the relativity revolution. **The Mathematical Intelligencer** 30, n° 3, pp. 54-60, 2008.

ROYAL SOCIETY. Rumford archive winners 1898-1800. Disponível em: <<http://royalsociety.org/Content.aspx?id=3366>>. Acesso em: 8 jul. 2010.

SCHAFFNER, Kenneth F. **Nineteenth century aether theories**. Oxford, Nova Iorque: Pergamon Press, 1972.

SHAMOS, Morris Herbert. **Great experiments in physics. Firsthand accounts from Galileo to Einstein**. Nova Iorque: Dover Publications Inc., 1959.

SHANKLAND, Robert S. Conversations with Albert Einstein. *American Journal of Physics*, vol. 31, pp. 47-57, 1963.

SHANKLAND, Robert S. Michelson's role in the development of relativity. *Applied Optics*, vol. 12, n° 10 (out.), pp. 2280-2287, 1973.

SILLIMAN, Robert H. William Thomson: smoke rings and nineteenth-century atomism. *Isis*, vol. 54, n° 4, pp. 461-474, 1963.

SILLIMAN, Robert H. Fresnel and the emergence of physics as a discipline. *Historical Studies in the Physical Sciences* 4, pp. 137-162, 1974.

SNOW, C. P. *As duas culturas*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1997.

STACHEL, John. Einstein and Michelson. The context of discovery and the context of justification. *Astron. Nachr.*, vol. 303, pp. 47-53, 1982.

STACHEL, John. Fresnel's (dragging) coefficient as a challenge to 19th century optics of moving bodies. In: **The universe of general relativity**, A. J. Kox e Jean Eisenstaedt (eds.). Coleção Einstein Studies, vol. 11. Boston: Birkhäuser, 2005.

STALEY, Richard. Michelson's interferometer: instrument or experiment? In: **Instrument-Experiment: Historische Studien**, pp. 193-200. Christoph Meinel (ed.). Berlin: Verlag für Geschichte der Naturwiss. und der Technik, 2000.

STEEL, W. H. **Interferometry**. Coleção Cambridge Monographs on Physics. Cambridge: Cambridge University Press, 1967.

SWENSON Jr., Loyd S. The Michelson-Morley-Miller experiments before and after 1905. *Journal for the History of Astronomy*, vol. 1, pp. 56-78, 1970.

SWENSON Jr., Loyd S. **The ethereal aether. A history of the Michelson-Morley-Miller aether-drift experiments 1880-1930**. Austin: University of Texas Press, 1972.

TALTAVULL, Marta Jordi. **The uncertain boundaries between light and matter. A long-term history of optical dispersion, from classical to quantum physics.** Max-Planck Institut für Wissenschaftsgeschichte. Disponível em: <<http://www.mpiwg-berlin.mpg.de/en/news/features/feature15>>. Acesso em: 15 jul. 2011.

THIBAUT, Ghislain e BARDINI, Thierry. Éther 2.0: révolutions sans fil. **Canadian Journal of Communication**, vol. 33, pp. 357-378, 2008.

TOLANSKY, S. **An introduction to interferometry.** Londres, Nova Iorque e Toronto: Longmans, Green & Co., 1955.

WANGSNESS, Roald K. **Electromagnetic fields.** 2ª ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1986.

WEALE, R. A. Historical Note – Brougham v. Young. *Vision Research*, pp. 391-393, 1965.

WESTFALL, Richard S. **The construction of modern science. Mechanisms and mechanics.** The Cambridge History of Science Series. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

WHEWELL, William. **History of the inductive sciences — from the earliest to the present time.** Vol. 2. pp. 369-501. Londres: John Parker, West Strand, 1847 (reimpresso por Forgotten Books, coleção Classic Reprint Series).

WHITTAKER, E. T. **A history of the theories of aether and electricity from the age of Descartes to the close of the nineteenth century.** Londres: Longmans, Green, and Co.; Dublin: Hodges, Figgis, & Co., Ltd., 1910.

WILLIAMS, W. Ewart. **Applications of interferometry.** Coleção Methuen's Monographs on Physical Subjects. 4ª edição (1ª ed.: 1930). Londres: Methuen & Co. Ltd., 1950.

WILSON, David B. George Gabriel Stokes on stellar aberration and the luminiferous ether.

The British Journal for the History of Science, vol. 6, nº 21, pp. 57-72, 1972.

WILSON, H. C. Measuring the stars with the interferometer. **Popular Astronomy**, vol. 29, pp. 189-197, 1921.

WOOD, Alex. Thomas Young, natural philosopher (1773-1829) – fellow and foreign secretary of the Royal Society, member of the National Institute of France; a man alike eminent in almost every department of human learning. Patient of unintermitted labour, endowed with the faculty of intuitive perception, who, bringing an equal mastery to the most abstruse investigations of letters and science, first established the undulatory theory of light, and first penetrated the obscurity which had veiled for ages the hieroglyphics of Egypt. Completado por Frank Oldham. Cambridge: University Press, 1954.

ZHANG, Yuan Zhong. **Special relativity and its experimental foundations**. Coleção Advanced Series on Theoretical Physical Science, vol. 4. Cingapura: World Scientific, 1997.

Apêndice 1: Citações Originais

Capítulo 1

i1

“The phenomenon of interference has had a considerable influence on the development of physics. Young's observation and explanation of the interference of the beams through two holes provided the basis for Fresnel's wave theory of light and the same experiment has been used as the foundation of modern coherence theory. Einstein's special theory of relativity was developed to explain the negative result of the Michelson-Morley experiment” (STEEL, 1967, p. 1).

i2

“It is surprising that so great a mathematician as Dr. Smith could have entertained for a moment, an idea that the vibrations constituting different sounds should be able to cross each other in all directions, without affecting the same individual particles of air by their joint forces: undoubtedly they cross, without disturbing each other's progress; but this can be no otherwise effected than by each particle's partaking of both motions” (YOUNG, 1800, p. 130).

i3

“(…) this movement between the material and the theoretical which occurs again and again. For example, the improvement in theory (mathematics and optics) led to the development of improved lenses and mirrors, which were multiplied and then fed back into further theoretical developments, which led back into microscopes and telescopes, which later improved health and agriculture and allowed even more research.

In fact, it becomes difficult to distinguish the material and the theoretical. Anthropologists have long seen technology as a mix of things and ideas, of ideas embedded or congealed in objects which themselves only have their power from the practices which dictate their use” (MACFARLANE e MARTIN, 2002, p. 195).

i4

“Although the optical diffraction grating is traditionally classed as an application of diffraction theory rather than interference, it could equally well be treated as a multiple-beam interferometer in which there is interference between many beams, one coming from each ruling of the grating. (...)

A series of uniformly spaced aerials disposed along a line is analogous to a grating, yet in radio astronomy this is classed as an interferometer” (STEEL, 1967, pp. 128-129).

Capítulo 2

ii1

“A wave of criticism of ‘Newton's theory’ appeared in France in the 1790s. (...) Few people objected to his work with the decomposition of white light or even the phenomenological account of Newton's rings. What did come under fire, however, was the claim that the colors of natural bodies could be treated like the colors of Newton's rings, and thus explained in entirely analytic terms” (LEVITT, 2009, p. 23).

ii2

“One might think that the colors of Newton's rings were an obscure topic, but it was not. By the time Arago and Biot were writing, the topic was the most important one in the field of optics. (...) Indeed, within the very institutions that formed Arago and Biot, there was a division of opinion (...) over Newton's color theory” (LEVITT, 2009, p. 20).

ii3

“A social transformation had broken apart the old system of status and replaced it with the promise of mobility. This new focus on what one does, rather than what one is, impacted the scientific as well as the civic realm, producing a shift from the self-educated general savant to career physicist shaped by France's new, professional institutions” (LEVITT, 2009, p. 7).

ii4

“When the *Cours révolutionnaire* opened in 1794, several of the instructors made the critique of Newtonian color a central part of their courses. (...) As the physics professor, Hassenfratz, stated in 1795, the study of color, ‘stagnant from the instant that Newton ended his research, has expanded considerably at the École Polytechnique in the past six months, by the numerous experiments which have been done there’. In courses as diverse as drawing, descriptive geometry and physics, a single complaint emerged: the analytical approach to color was insufficient. Each took aim at the Newtonian theory of color as excessively abstract and authoritarian” (LEVITT, 2009, p. 24).

ii5

“In making [the comparison between the wave and the particle theories of light] it is not enough to rest in vague explanations which may be moulded to suit any theory. Whatever be the apparent simplicity of an hypothesis – whatever its analogy to known laws – it is only when it admits of mathematical expression, and when its mathematical consequences can be numerically compared with established facts, that its truth can be fully and finally ascertained” (LLOYD, 1834, p. 19 *apud* CHEN, 2000, p. 118).

ii6

“The ‘new optics’ combined quantitative mathematical analysis with experimental precision, and marked the transition from the natural philosophy of the eighteenth century to the distinct field of physics” (BUCHWALD, 1989 *apud* LEVITT, 2009, p. 3).

ii7

“Supposing the light of any given color to consist of undulations, of a given breadth, or of a given frequency, it follows that these undulations must be liable to those effects which we have already examined in the case of the waves of water, and the pulses of sound. It has been shown that two equal series of waves, proceeding from centers near each other, may be seen to destroy each other's effects at certain points, and at other points to redouble them; and the beating of two sounds has been explained from a similar interference. We are now to apply the same principles to the alternate union and extinction of colors” (YOUNG, 1826, p. 364).

ii8

“From the agreements of the measures, and from the similarity of the phenomena, we may conclude, that these intervals are the same as are concerned in the production of the colors of thin plates; but these are shown, by the experiments of Newton, to be the smaller, the denser the medium; and, since it may be presumed that their number must necessarily remain unaltered in a given quantity of light, it follows of course, that light moves more slowly in a denser, than in a rarer medium: and this being granted, it must be allowed, that refraction is not the effect of an attractive force directed to a denser medium” (YOUNG, 1804, p. 12).

ii9

“[Newton] even went so far as to offer Hooke suggestions for the completion of the latter's medium theory of light. One of his interesting hints was the linking of colours with the 'various depths or bignesses' of the vibrations in the ether, analogous to the variety of vibrations in air, producing different tones. Newton was probably thinking of wavelengths rather than of amplitudes. Hooke did not follow up on this suggestion, but the analogy between sound and light continued to be frequently made, ensuring that the concept of periodicity would resurface” (HAKFOORT, 1995, pp. 17-18).

ii10

“Moreover, Bernoulli's theory makes it plain to us that the way in which periodicity and colour were eventually linked was not clear from the start. After Malebranche had introduced the general idea of relating periodicity and colour, all kinds of options were still open on both the ontological and the mathematical levels. Bernoulli's colour particles in an ether and the mathematics of standing waves provided only one of those options. The elaboration of the concept of periodicity in the medium tradition comprises a complex and fascinating historical process spanning a considerable period of time, which seems to have been unnoticed by historians so far” (HAKFOORT, 1995, p. 65).

ii11

“Les franges qu'on observe dans l'intérieur de l'ombre d'un corps étroit, ou celles qu'on obtient avec deux miroirs, résultant évidemment de l'influence mutuelle des rayons lumineux, l'analogie indique qu'il doit en être de même pour les franges extérieures qui bordent les

ombres des corps éclairés par un point lumineux. La première hypothèse qui se présente à la pensée, c'est qu'elles sont produites par la rencontre des rayons directs et des rayons réfléchis sur le bords du corps opaque, tandis que les franges intérieures résultent de l'action réciproque des rayons infléchis dans l'ombre, des deux côtés du corps opaque, ces rayons infléchis partant également de sa surface, ou de points infiniment voisins. Telle paraît être l'opinion de M. Young, et c'est aussi celle que j'avais adoptée d'abord, avant qu'un examen plus approfondi des phénomènes m'en eût fait reconnaître l'inexactitude” (FRESNEL, 1826, pp. 360-361).

ii12

“Après avoir démontré (...) que le système de l'émission, et même le principe des interférences, quand on ne l'applique qu'aux rayons directs et aux rayons *réfléchis ou infléchis sur les bords mêmes de l'écran*, sont insuffisants pour expliquer les phénomènes de la diffraction, je vais faire voir maintenant qu'on peut en donner une explication satisfaisante et une théorie générale, dans le système des ondulations, sans le secours d'aucune hypothèse secondaire, et en s'appuyant seulement sur le principe d'Huygens et sur celui des interférences, qui sont l'un et l'autre des conséquences de l'hypothèse fondamentale” (FRESNEL, 1826, p. 373).

Capítulo 3

iii1

“(...) it was not difficult (...) to devise a large number of new forms of experiment or to recognize and explain the various types of interference phenomena as they casually appeared. Interest also began to be taken in these experiments from a practical and technical standpoint” (MACH, 1926, p. 164).

iii2

“In order that the effects of two portions of light may be thus combined, it is necessary that they be derived from the same origin, and that they arrive at the same point by different

paths, in directions not much deviating from each other” (YOUNG, 1845, p. 364)

iii3

“(…)sil (*sic*) n'y a aucune dependance entre les centres de vibration, l'instant du depart d'un système d'ondes ne sera pas lié a l'instant du depart d'ondes voisines, puisque la cause quelconque que les engendre n'opère pas des changements simultanés dans les deux point lumineux; des lors les lignes d'accord et de discordance varieront de place continuellement et l'œil n'aura plus que la sensation d'une lumière uniforme; c'est ce qui a sans doute empêché pendant si longtemps de reconnaître l'influence que les rayons lumineux exercent les unes sur les autres” (FRESNEL, 1868 *apud* MACH, 1926, p. 155).

iii4

“A luminous point source may send out a regular train of waves consisting of many millions of waves. Since, however, in the case of a flame one luminous particle is continually being replaced by another, quite appreciable irregularities must appear in the wave-trains, which will bear no simple relation to one another for two different light sources. The best acoustical illustration of this is given by a swarm of bees, whose individuals are constantly changing, but in such a manner that the beats of the wings of those leaving the swarm are not in phase with those of the bees entering it. The trains of sound waves from two such swarms could not be brought to give audible interference, but those from the same swarm are capable of interfering since the same change of phase occurs simultaneously in each wave-train proceeding from the swarm” (MACH, 1926, p. 155).

iii5

“Grimaldi a reconnu le premier l'action que les rayons lumineux exercent les uns sur les autres. Dans ces derniers temps, le célèbre docteur Thomas Young a prouvé, par une expérience simple et ingénieuse, que les franges intérieures résultent de la rencontre des rayons infléchis de chaque côté du corps opaque, en interceptant avec un écran un des deux faisceaux lumineux; ce qui fait toujours évanouir complètement les franges intérieures, quelles que soient la forme, la masse et la nature de l'écran, et soi qu'on intercepte le faisceau lumineux avant ou après son immersion dans l'ombre” (FRESNEL, 1826, p. 359).

iii6

“Whenever two portions of the same light arrive at the eye by different routes, either exactly or very nearly in the same direction, the light becomes most intense when the difference of the routes is any multiple of a certain length, and least intense in the intermediate state of the interfering portions; and this length is different for light of different colours” (YOUNG, 1802, p. 387 apud ROTHMAN, 2003, p. 17).

iii7

“This deviation may be produced in one or both of the portions by diffraction, by reflection, by refraction, or by any of these effects combined; but the simplest case appears to be, when a beam of homogeneous light falls on a screen in which there are two very small holes or slits, which may be considered as centers of divergence, from whence the light is diffracted in every direction. In this case, when the two newly formed beams are received on a surface placed so as to intercept them, their light is divided by dark stripes into portions nearly equal, but becoming wider as the surface is more remote from the apertures, so as to subtend very nearly equal angles from the apertures at all distances, and wider also in the same proportion as the apertures are closer to each other. The middle of the two portions is always light, and the bright stripes on each side are at such distances, that the light coming to them from one of the apertures, must have passed through a longer space than that which comes from the other, by an interval which is equal to the breadth of one, two, three, or more of the supposed undulations, while the intervening dark spaces correspond to a difference of half a supposed undulation, of one and a half, of two and a half, or more” (YOUNG, 1845, p. 365).

iii8

“On produit des franges plus vives et plus tranchées, en faisant, dans un carton ou une feuille métallique, deux fentes parallèles très-fine et suffisamment rapprochées, et plaçant cet écran ainsi percé devant un point lumineux; alors, si on en observe l'ombre avec une loupe placée entre le corps opaque et l'oeil, on voit un grand nombre de franges colorées bien distinctes, lorsque la lumière arrive par les deux ouvertures à-la-fois, et qui disparaissent dès que la lumière d'une des fentes est interceptée” (FRESNEL, 1826, p. 359).

iii9

“Quand on fait concourir sous un très-petite angle deux faisceaux lumineux, provenant toujours d'une source commune, et régulièrement réfléchis par deux miroirs métalliques, on obtient encore des franges semblables, et dont les couleurs sont même plus pures et plus brillantes. Pour les produire, il faut avoir grand soin que dans l'endroit où se touchent les deux miroirs, ou du moins dans une partie des arêtes en contact, la surface de l'un ne dépasse pas sensiblement celle de l'autre, afin que la différence des chemins parcourus soit très-petite pour les rayons réfléchis qui se réunissent sur la portion commune des deux champs lumineux. Je remarquerai en passant que la théorie seule des interférences pouvait donner l'idée de cette expérience, et qu'une telle expérience exigeait des précautions assez délicates et des tâtonnements assez longs, pour qu'il fût presque impossible que le hasard y conduisît.

Si l'on enlève un des miroirs, ou qu'on intercepte la lumière qu'il réfléchit, soit avant soit après la réflexion, on fait disparaître les franges, comme dans les cas précédents. Ce qui prouve bien encore que ces franges sont produites par le concours des deux faisceaux lumineux, et non par l'action des bords des miroirs, c'est qu'elles sont toujours perpendiculaires à la ligne qui joint les deux images du point lumineux, quelle que soit son inclinaison par rapport à ces bords, du moins dans l'étendue du champ commun des deux faisceaux régulièrement réfléchis” (FRESNEL, 1826, pp. 359-360).

iii10

“Monsieur,

Je vous prie d'agréer l'hommage que je vous fais d'un exemplaire de mon Mémoire sur la diffraction. Lorsque je le soumis à l'Institut je ne connaissais pas vos expériences et la conséquence que vous en aviez tirée, en sorte que je présentai comme neuves des explications que vous aviez déjà données depuis longtemps. Je les ai retranchées dans le Mémoire imprimé que j'ai l'honneur de vous envoyer, et je n'y ai laissé que celle des franges colorées des ombres, parce que j'ai ajouté quelque chose à ce que vous aviez déjà dit sur ce phénomène. (...)

Quand on croit avoir fait une découverte, on n'apprend pas sans regret qu'on a été prévenu, et je vous avouerai franchement, Monsieur, que c'est aussi le sentiment que j'ai éprouvé lorsque M. Arago m'a fait voir qu'il n'y avait qu'un petit nombre d'observations véritablement neuves dans le Mémoire que j'avais présenté à l'Institut. Mais si quelque chose pouvait me consoler de n'avoir pas l'avantage de la priorité, c'était de m'être rencontré avec un

savant qui a enrichi la physique d'un si grand nombre de découvertes importantes, et cela n'a pas peu contribué, en même temps, à augmenter ma confiance dans la théorie que j'avais adoptée" (FRESNEL, 1868, pp. 737-738 e 740).

iii11

"(...) a été l'objet d'un travail difficile que Fresnel entreprit avec un de ses amis (Arago). L'exemple qu'ils ont donné, en le publiant, d'indiquer pour quelle part chacun d'eux avait contribué, sinon à l'exécution matérielle des diverses expériences, du moins à leur invention, méritait, je crois, d'être suivi; car les associations de ce genre tournent souvent à mal, parce que le public s'obstine, quelquefois par un caprice, à ne pas traiter les intéressés sur le pied d'une égalité parfaite, met ainsi en jeu l'amour-propre d'auteur, celle peut-être de toutes les passions humaines qui exige le plus de ménagements" (ARAGO, 1854, p. 135).

iii12

"(...) [I] have also the pride and pleasure to inform you that the Council of the Royal Society has done honour to us all, by awarding to our friend Fresnel the Rumford medal, which has been adjudged but once since the death of Malus. In this determination the most zealous supporter of the cause was Mr. Herschel: I was obliged to be silent, from being too much interested in the subject, but in fact there was no opposition. (...) Thinking that this circumstance would make our system a little more popular than hitherto, I have determined to insert in my Astronomical and Nautical Collections a translation of Mr. Fresnel's Abstract, which is published in "Thomson's Chemistry", and I trust he will not dislike its appearance" (FRESNEL, 1868, p. 778).

iii13

"Comment pourrais-je, en effet, sans la plus vive émotion venir occuper à cette tribune une place qu'a si dignement remplie, pendant huit années, le géometre illustre dont la mort inattendue ne laisse pas moins de regrets à l'amitié qu'aux sciences et aux lettres. (...)

Fresnel habitait déjà la campagne lorsque la Société royale de Londres me chargea de lui présenter la médaille de Rumford. Ses forces, alors presque épuisées, lui permirent à peine de jeter un coup d'oeil sur ce signe, si rarement accordé, de l'estime de l'illustre Société. (...) 'Je vous remercie, me dit-il d'une voix éteinte, d'avoir accepté cette mission; je devine

combien elle a dû vous coûter, car vous avez ressenti, n'est-ce pas, que la plus belle couronne est peu de chose, quand il faut la déposer sur la tombe d'un ami?" (ARAGO, 1854, pp. 107 e 184).

iii14

“Je m'empresse de vous annoncer que l'Académie des sciences, sur la proposition d'une commission dont j'étais membre, et qui m'avait confié l'honneur de développer vos titres, vient de vous nommer, à la place de Volta, l'un de ses *huit* associés étrangers. (...)

Vous avez sans doute appris quelle perte cruelle les sciences ont faite le mois dernier. Le pauvre Fresnel était déjà à moitié éteint lorsque je lui remis vos médailles. Sa mort a plongé ici dans la plus vive douleur tous ceux qui sont dignes d'apprécier l'accord d'un beau talent et d'un beau caractère” (FRESNEL, 1868, pp. 779-780).

iii15

“On my return from Liverpool a few days ago, I found on my table your very obliging letter, announcing to me the success of your kind exertions in my favour, and my nomination as one of the eight foreign associates of the Academy. If any thing could add to the value of so distinguished a compliment, it would be the consciousness of owing it chiefly to the good opinion of so candid and so enlightened a judge as yourself. I must however confess that I could not read, without some confusion, my own name at the head of a list in which that of Olbers was only the third: but I am so much the more obliged to the Academy for its partiality to me.

I do indeed deeply lament the fatality which has a second time followed the adjudication of the Rumford medal. You do not tell me how far our poor friend felt that gratification from it, which it was our wish that he should receive, nor if he was pleased with my having undertaken to translate his Abstract into english” (FRESNEL, 1868, p. 780).

Capítulo 4

iv1

“La théorie de la réfraction, envisagée sous le point de vue le plus général, est une des parties les plus importantes de l'optique, non-seulement à raison de ses nombreuses applications, mais encore par les conséquences qu'on peut en déduire relativement à la nature de la lumière et aux véritables causes de ses propriétés” (ARAGO e PETIT, 1858, pp. 124-125).

iv2

“Newton, en attribuant la réfraction à une attraction des corps pour la lumière, a donné de ce phénomène et de la loi à laquelle el est soumis une explication si naturelle et si claire, qu'on l'a toujours regardée comme un des principaux arguments en faveur du système de l'émission” (ARAGO e PETIT, 1858, p. 124).

iv3

“[S]i l'on remarque que de toutes les conséquences générales déduites de l'hypothèse de Newton, la seule qu'on ait vérifiée jusqu'à ce jour se réduit à la loi du rapport constant des sinus d'incidence et de réfraction; si l'on observe d'ailleurs que cette loi peut se démontrer sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à l'idée d'une attraction, on sentira facilement qu'avant de se déterminer à adopter l'hypothèse de Newton, à l'exclusion de toutes les autres, il est indispensable d'examiner jusqu'à quel point les diverses conclusions qui en dérivent sont confirmées par l'expérience” (ARAGO e PETIT, 1858, p. 124).

iv4

“Ainsi, tandis que la variation du pouvoir réfringent pouvait encore s'expliquer, en admettant que l'attraction d'un même corps pour la lumière varie suivant une loi différente de celle de la raison directe des densités, on voit que, pour rendre compte de la variation observée dans le pouvoir dispersif, il faudrait supposer en outre que l'action d'un corps sur les rayons diversement colorés suit, dans les changements de densité, une loi différente pour chacun de ces rayons. Ces diverses suppositions diminuent, sans doute, et la simplicité et la vraisemblance de la théorie newtonienne” (ARAGO e PETIT, 1858, pp. 130-131).

iv5

“La Note qu'on vient de lire fut reproduite dans les journaux scientifiques du commencement de l'année 1816. Elle fixa à cette époque l'attention des physiciens, surtout par cette circonstance qu'elle semblait impliquer la conséquence, en opposition avec le système de l'émission, que la vitesse de la lumière devait être moins rapide dans le verre que dans l'air. Quant à moi, sans être moins frappé de ce désaccord, je m'attachai, guidé par la théorie de Fresnel, à déduire de mon observation un programme d'expériences devant servir à trouver les indices de réfraction dans des circonstances où les méthodes connues auraient été sans application possible. C'est ainsi, par exemple, que j'indiquai la possibilité de déterminer l'indice de réfraction des lames de certain métaux (...). C'est ainsi que j'entrevis la possibilité de comparer les indices de réfraction de l'air sec et de l'air humide (...).

Cette question, en ma qualité d'astronome, devait particulièrement m'intéresser”
(ARAGO, 1858h, pp. 315-316).

iv6

“Nous n'avion plus, pour arriver au résultat, qu'à déterminer la place des bandes lorsque l'air était dans le même état dans chacun des tubes, et à voir si ces mêmes bandes de déplaçait lorsque de ces deux colonnes d'air horizontales l'une était sèche et l'autre humide” (ARAGO, 1858h, p. 316).

iv7

“Je maintins qu'au delà de cette conclusion l'expérience était sans valeur. Fresnel, mon collaborateur et ami, ne partageait pas mon avis: il avait cru, d'ailleurs, reconnaître par l'absence de nuances irisées aux surfaces du verre correspondantes au tube humide, qu'aucune couche liquide n'était venue s'y déposer. Je fus frappé de la valeur de ces considérations, surtout parce qu'elles se fondaient sur des observations faites par un oeil auquel rien n'échappait” (ARAGO, 1858h, pp. 317-318).

iv8

“Or, en répétant l'expérience un grand nombre de fois, je ne trouvai plus aucune trace de la déviation d'une bande et un quart qu'on observait invariablement en opérant sur les tubes d'un mètre de long. Cette déviation d'une bande et un quart dépendait donc en totalité

de l'action de l'air humide, et nullement d'une légère couche d'eau qui serait déposée sur les parois intérieures du verre qui bouchait ce tube" (ARAGO, 1858h, p. 318).

iv9

"A cette époque, peu de physiciens accordaient quelque confiance à la théorie des ondulations: pour les amener à admettre que le déplacement d'une bande et un quart, signalé dans l'expérience précitée, prouvait que l'air humide réfractait un tant soit peu moins que l'air sec, je crus devoir me livrer à des expériences directes" (ARAGO, 1858h, p. 319).

iv10

"The technique of interferometry is to design experiments, and the equipment to make them, in which unwanted effects are eliminated as far as possible or are of a known magnitude. (...) The design of an interferometer to be insensitive to unwanted effects is interferometer compensation" (STEEL, 1967, p. 63).

iv11

"L'instrument que je vais décrire est une application du phénomène des anneaux développés par la réflexion sur les lames épaisses. (...) [C]et appareil n'exige, ni fente étroite bien orientée, ni miroirs inclinés bien réglés, ni loupe pour viser les franges, ni aucune des précautions minutieuses ordinairement exigées pour les expériences d'interférence. (...) Cet appareil pourra donc remplacer le réfractomètre différentiel d'Arago avec de grands avantages de commodité, fixité et de sensibilité" (JAMIN, 1856, p. 482-483).

iv12

"Je prends une glace à faces parallèles qui doit être taillée dans une matière très-pure et parfaitement dressée; je la coupe en deux parties, je fixe verticalement la première sur un support solide et je reçois sur elle la lumière venue d'une lampe ou du ciel. Chacun des rayons incidents se résout par des réflexions et des réfractions successives en une infinité d'autres, et donne en particulier naissance à des rayons réfléchis, l'un à la surface antérieure de la glace, l'autre à la surface postérieure: le troisième a subi trois réflexions intérieures, le quatrième en a éprouvé cinq, etc. Mais comme les intensités diminuent rapidement quand les réflexions se

multiplient, on peut n'examiner que les deux premiers dont l'effet dissimule tous les autres. L'écartement de ces deux rayons atteint un maximum pour une incidence convenable, il est proportionnel à l'épaisseur de la glace, il pourra conséquemment être aussi grand ou aussi petit qu'on le voudra. Ces deux rayons se propagent parallèlement dans l'air jusqu'à une distance qu'on peut augmenter ou diminuer à volonté; ils sont enfin reçus sur le deuxième fragment de la glace, que l'on dirige parallèlement au premier; chacun d'eux s'y réfléchit à la première et à la deuxième surface, et le faisceau primitif se trouve alors avoir été partagé en quatre rayons parallèles. Dans cette action deux d'entre eux se sont évidemment superposés, ce sont: 1° le rayon réfléchi aux surfaces, antérieure de la première glace et postérieure de la seconde; 2° le rayon réfléchi aux faces, postérieure de la première glace et antérieure de la seconde, et non-seulement ils se superposent en direction, mais ils sont égaux en intensité, et ils ont parcouru les mêmes épaisseurs d'air et de verre: ils sont concordants.

Quand les deux glaces, au lieu d'être exactement parallèles, s'inclinent entre elles d'une quantité croissante, les deux rayons interférents cessent de se superposer exactement; ils prennent des différences de marche croissantes, et si l'on reçoit dans l'oeil l'ensemble des rayons réfléchis, on distingue des franges alternativement brillantes et obscures" (JAMIN, 1856, p. 482-483).

iv13

"(...) il fallait les élargir à volonté; il fallait que le compensateur dont on a fait usage, au lieu d'être un moyen empirique de détruire le déplacement des franges, devint un appareil de mesure dont l'action pût être calculée par une formule et vérifiée par l'expérience; il fallait enfin, par quelques exemples, montrer le parti que l'on peut tirer des interférences comme moyen d'investigation. Ce sont là les questions dont je me suis occupé. Je vais décrire les modifications que j'ai apporté au système, exprimer théoriquement l'effet du compensateur et le vérifier par l'expérience, puis comme application mesurer l'indice de quelques gaz" (JAMIN, 1857, p. 283).

iv14

"Mais à cause de cette sensibilité même, les actions perturbatrices les plus faibles viennent compliquer les expériences. Par exemple, la compression augmente la température du liquide, et pendant qu'il se refroidit ensuite, il se fait dans sa masse des courants qui déforment

les franges au point de rendre les observations impossibles; mais on évite ces effets en enveloppant les tube d'une auge pleine d'eau que l'on agite constamment et en attendant dix minutes avant de faire l'observation: ce temps est suffisant pour ramener les franges à leur forme et à leur fixité premières” (JAMIN, 1858a, p. 165).

iv15

“(…) d'une part on admet que l'indice de l'eau en vapeur peut se déduire avec exactitude d'une loi que l'on a reconnu peu précise, de l'autre on n'a pas pu trouver sa valeur expérimentalement: on ne sait donc rien de précis sur ce sujet” (JAMIN, 1858b, p. 172).

iv16

“Die Brewster'sche Entdeckung der Farben dicker Platten wurde von Herrn Jamin in glücklichster Weise zur Konstruktion seiner Interferenzrefraktoren verwendet, mit welchen schon viele schöne Untersuchungen über die Änderungen der Brechungsexponenten von Körpern in verschiedenen Aggregatzuständen ausgeführt worden sind” (ZEHNDER, 1891, p. 275).

iv17

“Der Jamin'sche Interferenzrefraktor besitzt in seiner gewöhnlichen Ausführung ein relativ kleines Interferenzfeld, welches bei vielen Untersuchungen sich als unzureichend erweist Eine Vergrößerung des Feldes lässt sich nur durch entsprechende Vergrößerung der Plattendimensionen erreichen, wsa mit ganz erheblichen technischen und materiellen Schwierigkeiten verbunden ist. Dieser Umstand veranlasste die Ausführung eines neuen Apparates, der auf folgendem Prinzipie beruht. Denkt man sich die Vorderfläche und die versilberte Rückfläche einer Jamin'schen Platte durch eine Planplatte und einer Silberspiegel auf Glas ersetzt, und diese auf einem Stabe, jedes Stück für sich, drehbar und verschiebbar angebracht, so hat man eine Jamin'sche Platte von variabler Dicke, und kann durch Kombination dieser Vorrichtung mit einer zweiten genau gleichen die Jamin'schen Streifen herstellen, wobei noch durch Auseinanderschieben der Platten die Bündel beliebig weit getrennt werden können” (MACH, 1892, p. 89).

Capítulo 5

v1

“It is presumed, that the accuracy, with which the general law of the interference has been shown to be applicable to so great a variety of facts, in circumstances the most dissimilar, will be allowed to establish its validity in the most satisfactory manner. The full confirmation or decided rejection of the theory, by which this law was first suggested, can be expected from time and experience alone; if it be confuted, our prospects will again be confined within their ancient limits, but if it be fully established, we may expect an ample extension of our views of the operations of nature, by means of our acquaintance with a medium, so powerful and so universal, as that to which the propagation of light must be attributed” (YOUNG, 1845, p. 370).

v2

“I have not, in the course of these investigations, found any reason to suppose the presence of such an inflecting medium in the neighborhood of dense substances as I was formerly inclined to attribute to them; and, upon considering the phenomena of the aberration of the stars, I am disposed to believe, that the luminiferous ether pervades the substance of all material bodies with little or no resistance, as freely perhaps as the wind passes through a grove of trees” (YOUNG, 1804, pp. 12-13).

v3

“All material Bodies are to be considered, with respect to the Phenomena of Light, as consisting of Particles so remote from each other as to allow the ethereal Medium to pervade them with perfect freedom, and either to retain it in a state of greater density and of equal elasticity, or to constitute, together with the Medium, an Aggregate, which may be considered as denser but not more elastic” (YOUNG, 1845).

v4

“Pour concevoir une succession nombreuse d'oscillations à peu près égales de la même particule éclairante, il suffit de supposer que sa densité est beaucoup plus grande que celle du fluide dans lequel elle oscille. C'est ce qu'on devait déjà conclure de la régularité des

mouvements planétaires au travers de ce même fluide, qui remplit les espaces célestes” (FRESNEL, 1826, p. 375).

v5

“1° Dans les mêmes circonstances où deux rayons de lumière ordinaire paraissent mutuellement se détruire, deux rayons polarisés à angles droits ou en sens contraires n'exercent l'un sur l'autre aucune action appréciable;

2° Les rayons de lumière polarisés dans un seul sens agissent l'un sur l'autre comme les rayons naturels: en sorte que, dans ces deux espèces de lumière, les phénomènes d'interférences sont absolument les mêmes;

3° Deux rayons primitivement polarisés en sens contraires peuvent ensuite être ramenés à un même plan de polarisation, sans néanmoins acquérir par là la faculté de s'influencer;

4° Deux rayons polarisés en sens contraires, et ramenés à des polarisations analogues, s'influencent comme les rayons naturels, s'ils proviennent d'un faisceau primitivement polarisé dans un seul sens;

5° Dans les phénomènes d'interférence produits par des rayons qui ont éprouvé la double réfraction, la place des franges n'est pas déterminée uniquement par la différence des chemins et par celle des vitesses; et dans quelques circonstances que nous avons indiquées, il faut tenir compte, de plus, d'une différence égale à une demi-ondulation” (ARAGO e FRESNEL, 1858, pp. 148-149).

v6

“I have been reflecting on the possibility of giving an imperfect explanation of the affection of light which constitutes polarization, without departing from the genuine doctrine of undulations. It is a principle in this theory, that all undulations are simply propagated through homogeneous mediums in concentric spherical surfaces like the undulations of sound, consisting simply in the direct and retrograde motions of the particles in the direction of the radius, with their concomitant condensation and rarefactions. And yet it is possible to explain in this theory a transverse vibration, propagated also in the direction of the radius, and with equal velocity, the motions of the particles being in a certain constant direction with respect to that radius and this is a *polarization*” (YOUNG, 1855, p. 380 *apud* WHITTAKER, 1910, pp.

121-122).

v7

“If we assume as a mathematical postulate, on the undulating theory, without attempting to demonstrate its physical foundation, that a transverse motion may be propagated in a direct line, we may derive from this assumption a tolerable illustration of the subdivision of polarized light by reflexion in an oblique plane” (YOUNG, 1855, p. 279 *apud* WHITTAKER, 1910, p. 122)

v8

“Il peut y avoir des ondes dérivées dans lesquelles la direction des vitesses absolues imprimées aux molécules ne soit pas perpendiculaire à la surface de l'onde. En réfléchissant aux lois particulières de l'interférence des rayons polarisés, je me suis convaincu, depuis la rédaction de ce Mémoire, que les vibrations lumineuses s'exécutent perpendiculairement aux rayons ou parallèlement à la surface de l'onde. Les raisonnemens et les calculs contenus dans ce Mémoire s'accordent aussi bien avec cette nouvelle hypothèse qu'avec la précédente, puisqu'ils sont indépendans de la direction réelle des vibrations et supposent seulement qu'elles s'exécutent dans le même sens pour tous les rayons partis du même système d'ondes qui concourent à la formation des franges” (FRESNEL, 1826, p. 384, nota de rodapé).

v9

“Undoubtedly, it does violence to the ideas that we should have been likely to form a priori of the nature of the aether, to assert that it must be regarded as an elastic solid in treating of the vibrations of light. When, however, we consider the wonderful simplicity of the explanations of the phaenomena of polarization when we adopt the theory of transversal vibrations, and the difficulty, which to me at least appears quite insurmountable, of explaining these phaenomena by any vibrations due to the condensation and rarefaction of an elastic fluid such as air, it seems reasonable to suspend our judgement, and be content to learn from phaenomena the existence of forces which we should not beforehand have expected” (STOKES, 1846, p. 81 *apud* WILSON, 1972, p. 71).

v10

“Si ce prisme entraînait avec lui tout l'éther qu'il contient, la totalité du milieu qui sert de véhicule aux ondes partageant ainsi le mouvement terrestre, la vitesse des ondes lumineuses serait celle qu'elles devraient avoir dans le milieu supposé immobile, augmentée de la vitesse de la terre. Mais le cas dont il s'agit est plus compliqué; ce n'est qu'une partie de ce milieu qui est entraînée par notre globe, celle qui constitue l'excès de sa densité sur l'éther environnant. L'analogie indique que, lorsqu'une partie seulement du milieu se déplace, la vitesse de propagation des ondes ne doit être augmentée que de la vitesse du centre de gravité du système” (FRESNEL, 1868, p. 631).

v11

“The work of Veltmann illustrates an important trend in the optics of moving bodies. Together with a growing belief in the empirical adequacy of the Fresnel coefficient, there was a growing skepticism about the literal interpretation of the effect in terms of actual ether drag. The dominant attitude toward the Fresnel coefficient in the second half of the century, it seems, was that, whatever physical mechanism lay behind it, the coefficient had to be part of any optical theory based on the hypothesis of an immobile ether if such a theory was to explain (at least to first order in u/c) terrestrial optical experiments always seem to follow the same laws that would hold if the earth were at rest with respect to the ether. In the course of the 19th century, it was shown that the Fresnel coefficient ensures that this is true not only for refraction phenomena, but also for all reflection, diffraction, and interference phenomena” (JANSSEN, 2001, p. 6).

v12

“The undulatory theory of light, (...), explains so simply and beautifully the most complicated phenomena, (...) we are naturally led to regard aberration as a phenomenon unexplained by it, but not incompatible with it” (STOKES, 1845, p. 9).

v13

“When a pendulum is in motion, one would naturally have supposed that the air near the moving body glided past the surface, or the surface past it, which comes to the same thing if the relative motion only be considered, with a velocity comparable with the absolute velocity

of the surface itself. But on attaching a piece of gold leaf to the bottom of a pendulum, so as to stick out in a direction perpendicular to the surface, and then setting the pendulum in motion, Sir James South found that the gold leaf retained its perpendicular position just as if the pendulum had been at rest; and it was not till the gold leaf carried by the pendulum had been removed to some distance from the surface, that it began to lag behind. This experiment shews clearly the existence of a tangential action between the pendulum and the air, and between one layer of air and another” (STOKES, 1856, p. 12 *apud* WILSON, 1972, pp. 61-62).

v14

“I shall suppose that the earth and planets carry a portion of the aether along with them so that the aether close to their surfaces is at rest relatively to those surfaces, while its velocity alters as we recede from the surface, till, at no great distance, it is at rest in space” (STOKES, 1845, pp. 9-10).

Capítulo 6

vi1

“J'ai constaté que le mouvement de la Terre n'influe en rien sur la vitesse des rayons qui traversent un milieu réfringent entraîné par la Terre, ou du moins que deux rayons interférents, qui traversent deux épaisseurs de verre, égales entre elles, mais parcourues par les deux rayons dans des sens opposés relativement à la direction de ces rayons, produisent les mêmes franges et à la même place, que si la Terre eût été immobile; ce qui est en opposition directe avec une des explications que l'on a données de la fameuse expérience négative de M. Arago (...). Ce sera une nouvelle condition à remplir pour toutes les théories de la propagation de la lumière dans les milieux réfringents. Dans mon expérience, suivant les théories admises ou proposées, le déplacement des franges eût été des plusieurs largeur de franges, c'est-à-dire de plusieurs millimètres, tandis que par l'observation il a été complètement nul” (BABINET, 1839, p. 775).

vi2

“(…) en considerant les circonstances de cette expérience, j'ai remarqué l'existence d'une cause de compensation qui doit rendre insensible l'effet dû au mouvement. Cette cause réside dans la réflexion que la lumière subit dans cette expérience; en effet, on peut démontrer que, lorsque deux rayons ont entre eux une certaine différence de marche, cette différence est altérée par l'effet de la réflexion sur un miroir en mouvement: or, en calculant séparément les deux effets dans l'expérience de M. Babinet, on trouve qu'ils ont des valeurs sensiblement égales et de signes contraires” (FIZEAU, 1851, pp. 354-355; FIZEAU, 1859, p. 403).

vi3

“Notwithstanding the ingenuity displayed in this remarkable contrivance, which is apparently so admirably adopted for eliminating accidental displacement of the fringes by extraneous causes, there seems to be a general doubt concerning the results obtained, or at any rate the interpretation of these results given by Fizeau. This, together with the fundamental importance of the work must be our excuse for its repetition” (MICHELSON e MORLEY, 1886, pp. 379-380).

vi4

“Nach dem Relativitätsprinzip wird also das Licht vom Körper *vollkommen* mitgeführt, aber gerade deswegen ist seine Geschwindigkeit relativ zu einem Beobachter, der die Bewegung des Körpers nicht mitmacht, nicht gleich der Vektorsumme aus seiner Geschwindigkeit gegen den Körper und der des Körpers gegen Beobachter. Der Notwendigkeit, einen “Äther” in die Optik einzuführen, welche die Körper durchdringt, ohne an ihrer Bewegung teilzunehmen, sind wir auf diese Weise enthoben” (LAUE, 1907, p. 990).

Capítulo 7

vii1

“(...) Maxwell did for electromagnetic phenomena what Newton had accomplished for mechanics. He summed up everything that was then known concerning light, electricity, and magnetism. (...) He formulated the mathematical structure (...) that pointed up the unity of the “ether” and formed the basis for all of electromagnetic theory. He predicted the existence of electric waves propagating through space, discovered later by Hertz” (SHAMOS, 1959, p. 283).

vii2

“We have therefore some reason to believe, from the phenomena of light and heat, that there is an ethereal medium filling space and permeating bodies, capable of being set in motion and of transmitting that motion from one part to another, and of communicating that motion to gross matter so as to heat it and affect it in various ways. (...) A medium having such a constitution may be capable of other kinds of motion and displacement than those which produce the phenomena of light and heat, (...). Now we know that the luminiferous medium is in certain cases acted on by magnetism; for Faraday discovered that when a plane polarized ray traverses a transparent diamagnetic medium in the direction of the lines of magnetic force produced by magnets or currents in the neighborhood, the plane of polarization is caused to rotate” (MAXWELL, 1865).

vii3

“It appears therefore that certain phenomena in electricity and magnetism lead to the same conclusion as those of optics, namely, that there is an ethereal medium pervading all bodies, and modified only in degree by their presence; that the parts of this medium are capable of being set in motion by electric currents and magnets; that this motion is communicated from one part of the medium to another by forces arising from the connections of those parts; that under the action of these forces there is a certain yielding depending on the elasticity of these connections; and that therefore energy in two different forms may exist in the medium, the one form being the actual energy of motion of its parts, and the other being the potential energy stored up in the connections, in virtue of their

elasticity” (MAXWELL, 1865).

vii4

“(…) to the case of a magnetic disturbance propagated through a nonconducting field, and it is shown that the only disturbances which can be propagated are those which are transverse to the direction of propagation, and that the velocity of propagation is the velocity v , found from experiments such as those of Weber, which express the number of electrostatic units of electricity which are contained in one electromagnetic unit.

This velocity is so nearly that of light, that it seems we have strong reason to conclude that light itself (including radiant heat, and other radiations if any) is an electromagnetic disturbance in the form of waves propagated through the electromagnetic field according to electromagnetic laws. (...) If the same character of the elasticity is retained in dense transparent bodies, it appears that the square of the index of refraction is equal to the product of the specific dielectric capacity and the specific magnetic capacity. (...).

The conception of the propagation of transverse magnetic disturbances to the exclusion of normal ones is distinctly set forth by Professor Faraday in his “Thoughts on Ray Vibrations.” The electromagnetic theory of light, as proposed by him, is the same in substance as that which I have begun to develop in this paper, except that in 1846 there were no data to calculate the velocity of propagation” (MAXWELL, 1865).

vii5

“By transmitting waves at a finite and measurable speed, the ether has given itself away, and has let in all the possibilities of calculation and numerical statement. Its properties are thereby exhibited as essentially finite – however infinite the whole extent of it may turn out to be” (LODGE, 1909, p. 100).

vii6

“[Hertz] was a most ingenious experimenter who was forced to devise entirely new techniques for the detection of Maxwell's electric waves. From his success grew the communications industry, and perhaps more important, a clearer picture of the wave nature of light” (SHAMOS, 1959, p. 185).

vii7

“(...) before Maxwell, Physical Reality, in so far as it was to represent the processes of nature, was thought of as consisting in material particles, whose variations consist only in movements governed by partial differential equations. Since Maxwell's time, Physical Reality has been thought of as represented by continuous fields, governed by partial differential equations, and *not capable of any mechanical interpretation*. This change in the conception of Reality is the most profound and the most fruitful that physics has experienced since the times of Newton” (EINSTEIN, 1931, p. 71 apud SHAMOS, 1959, p. 285, grifos nossos).

vii8

“(...), the pencil which has traveled in the direction of the earth's motion, will in reality travel $4/100$ of a wave-length farther than it would have done, were the earth at rest. The other pencil being at right angles to the motion would not be affected.

If, now, the apparatus be revolved through 90° so that the second pencil is brought into the direction of the earth's motion, its path will have lengthened $4/100$ wave-lengths. The total change in the position of the interference bands would be $8/100$ of the distance between the bands, a quantity easily measurable” (MICHELSON, 1881, pp. 121-122).

vii9

“(...) half-way on the arms the fringes were visible, but their position could not be measured till after twelve o'clock, and then only at intervals. When the mirrors were moved out to the ends of the arms, the fringes were only occasionally visible” (MICHELSON, 1881, p. 124).

vii10

“Here, the fringes under ordinary circumstances were sufficiently quiet to measure, but so extraordinarily sensitive was the instrument that the stamping of the pavement, about 100 meters from the observatory, made the fringes disappear entirely!

If this was the case with the instrument constructed with a view to avoid sensitiveness, what may we not expect from one made as sensitive as possible!” (MICHELSON, 1881, p. 124).

vii11

“The interpretation of these results is that there is no displacement of the interference bands. The result of the hypothesis of a stationary ether is thus shown to be incorrect, and the necessary conclusion follows that the hypothesis is erroneous.

This conclusion directly contradicts the explanation of the phenomenon of aberration which has been hitherto generally accepted, and which presupposes that the earth moves through the ether, the latter being at rest” (MICHELSON, 1881, p. 128).

vii12

“(…), the relative velocity of the earth and the ether is probably less than one sixth the earth's orbital velocity, and certainly less than one-fourth.

(…) The experiment will therefore be repeated at intervals of three months, and thus all uncertainty will be avoided” (MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 341).

vii13

“Stokes has given a theory of aberration which assumes the ether at the earth's surface to be at rest with regard to the latter, and only requires in addition that the relative velocity have a potential; but Lorentz shows that these conditions are incompatible” (MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 341).

vii14

“Lorentz then proposes a modification which combines some ideas of Stokes and Fresnel, and assumes the existence of a potential, together with Fresnel's coefficient. If now it were legitimate to conclude from the present work that the ether is at rest with regard to the earth's surface, according to Lorentz there could not be a velocity potential, and his own theory also fails” (MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 341).

vii15

“(…) it is not impossible that at even moderate distances above the level of the sea, at the top of an isolated mountain peak, for instance, the relative motion might be perceptible in an apparatus like that used in these experiments. Perhaps if the experiment should ever be tried in these circumstances, the cover should be of glass, or should be removed”

(MICHELSON e MORLEY, 1887, p. 341).

vii16

“Unlike the usual sequence of events in physics, relativity did not stem primarily from experiment (...); rather it was the result of a critical examination of well-known and widely accepted physical principles” (SHAMOS, 1959, p. 315).

vii17

“Examples of a similar kind such as the unsuccessful attempt to substantiate the motion of the earth relative to the “light-medium” lead us to the supposition that not only in mechanics, but also in electrodynamics, no properties of observed facts correspond to a concept of absolute rest; but that for all coordinate systems for which the mechanical equations hold, the equivalent electro-dynamical and optical equations hold also, as has already been shown for magnitudes of the first order. In the following we make these assumptions (which we shall subsequently call the Principle of Relativity) and introduce the further assumption (...) that light is propagated in vacant space, with a velocity c which is independent of the nature of the motion of the emitting body. (...) The introduction of a “Lightäther” will be proved to be superfluous” (EINSTEIN, 1905, *apud* SHAMOS, 1959, p. 319).

vii18

“It has become customary, largely in the wake of Sir Edmund Whittaker's history, to regard the FitzGerald-Lorentz contraction hypothesis as a strictly ad hoc interpretation of the Michelson experiment. There can be no question that this is what it became once the theory of Special Relativity attracted a following. After 1905 it became clear that the suggestion put forward by FitzGerald and Lorentz had the effect of a special dispensation from Newton's laws of mechanics. But in 1895, and still more so when first suggested, it was still quite possible that material contraction might be worked into the classical mechanical theories” (SWENSON, 1972, p. 110).

vii19

“The balance of evidence at this stage seems to incline in the sense that there is no ether drift, that the ether near the earth is stagnant, that the earth carries all or the greater part of the neighbouring ether with it – a view which, if true, must singularly complicate the theory of ordinary astronomical aberration (...).

But now put the question another way. *Can* matter carry neighbouring ether with it when it moves? Abandon the earth altogether; its motion is very quick but too uncontrollable, and it always gives negative results. Take a lump of matter that you can deal with, and see if it pulls any ether along.

That is the experiment which I set myself to perform, and which in the course of the years 1891-97 I performed” (LODGE, 1909, p. 70).

Capítulo 8

viii1

“C'est en suite l'extrême finesse des franges qui doivent se produire dans cette circonstance et qui ne pourront être aperçues qu'à l'aide du microscope. Enfin, c'est la faiblesse de l'intensité lumineuse qui, même avec la lumière solaire, doit nécessairement résulter de la très-petite dimension qu'il faudra donner à la source de lumière destinée à servir de point de départ commun aux rayons interférents” (FIZEAU, 1868, p. 934).

viii2

“Il existe en effet pour la plupart des phénomènes d'interférence, tels que les franges d'Yung [*sic*], celles des miroirs de Fresnel et celles qui donnent lieu à la scintillation des étoiles d'après Arago, une relation remarquable et nécessaire entre la dimension des franges et celle de la source lumineuse, en sorte que des franges d'une ténuité extrême ne peuvent prendre naissance que lorsque la source de lumière n'a plus que des dimensions angulaires presque insensibles; d'où, pour le dire en passant, il est peut-être permis d'espérer qu'en s'appuyant sur

ce principe et en formant par exemple, au moyen de deux larges fentes très-écartées, des franges d'interférence au foyer des grands instruments destinés à observer les étoiles, il deviendra possible d'obtenir quelques données nouvelles sur les diamètres angulaires de ces astres" (FIZEAU, 1868, p. 934).

viii3

“Couvrons l'objectif d'une lunette par un écran percé de deux fentes parallèles A et B, symétriquement placées par rapport au centre optique de l'objectif, et que je suppose, pour un instant, réduites à deux lignes infiniment minces. On sait que, si l'on fait tomber sur l'écran des rayons parallèles issus d'une même source, on obtient au foyer des franges d'Young, et que l'angle sous lequel la distance des deux premières franges noires est vue du centre optique de l'objectif est exprimé, en secondes d'arc, par la formule très-simple

$$x = \frac{103,1}{l}$$

l représentant la distance des fentes A et B, évaluée en millimètres; c'est-à-dire, et c'est là le point capital, que l'angle x est inversement proportionnel à la distance des deux fentes, quelle que soit la lunette employée.

Si l'on vise une étoile dont le diamètre est nul, les franges auront toujours lieu, et, pour les faire apparaître, il suffira d'employer un grossissement assez fort; mais, si l'étoile a un diamètre sensible, c'est-à-dire si elle envoie à l'écran des faisceaux de rayons dans des directions un peu différentes, à chaque direction correspond un système de franges; ces divers systèmes empiètent les uns sur les autres, et, pour que les franges disparaissent tout à fait, il suffit que le diamètre de l'étoile soit égal à l'angle x .

Le phénomène se produit encore quand, au lieu de deux fentes très étroites, on pratique dans l'écran des ouvertures d'une assez grande largeur.

On se trouve donc en possession d'un procédé de mesure dont la sensibilité croît avec l'écart des fentes, c'est-à-dire avec l'ouverture de la lunette mais, le phénomène étant négatif, une expérience ne deviendra probante que si, la disposition expérimentale restant la même, certaines étoiles donnent lieu à des franges, tandis que d'autres, placées dans des conditions tout à fait analogues, n'en donnent pas” (STÉPHAN, 1873, pp. 1009-1010).

viii4

“(…) I am working up the applications of interference methods to astronomical measurements and am confident of being able to measure discs with an accuracy of about one to two per cent where the telescope barely shows a disc” (LIVINGSTON, 1973, p. 146).

viii5

“(…) Possibly, he first learned of Fizeau's idea while in Europe in the early 1880s. Michelson was deeply involved in studies of interferometry in Germany and France and, characteristically, Stephan's inconclusive measurements might have fascinated and prompted him to re-examine the problem” (DeVORKIN, 1975, p. 1).

viii6

“On account of the narrowness of the interference-fringes when a very minute body is under examination, the method of obtaining these fringes (by a pair of adjustable slits in front of the objective of a telescope) is open to objection, from which the refractometer method is entirely free. Further, this last modification makes it possible to extend the effective aperture of the equivalent telescope without limit. Thus, while it would be manifestly impracticable to construct objectives much larger than those at present in use, there is nothing to prevent increasing the distance between the two mirrors of the refractometer to even ten times this size. If among the nearer fixed stars there is any as large as our sun, it would subtend an angle of about one hundredth of a second of arc; and the corresponding distance required to observe this small angle is ten metres, a distance which, while utterly out of question as regards the diameter of a telescope-objective, is still perfectly feasible with a refractometer” (MICHELSON, 1890b, p. 21).

viii7

“This beautiful and simple method was applied successfully by the author in 1891 to the accurate measurement of the size of Jupiter's satellites but was not tested on stellar objects, probably because it was supposed to require ideal seeing conditions. Last year, however, the author discovered by tests at Yerkes Observatory and at Mount Wilson that even when the “seeing” was bad, clear and relatively steady fringes could be obtained” (MICHELSON, 1920, p. 257).

viii8

“Eddington's estimates of star diameters in his British Association address (*Nature*, Sept. 2) are so large that we are planning to measure Betelgeuse with the 100-inch as soon as possible. Dr. Anderson will make the trial very soon, and I will report the results to you” (DeVORKIN, 1975, p. 10).

viii9

“(…) [I have] made reference to the fact that this experiment which was being carried out would be of the very greatest importance. We have of course had theories, and, working on those theories, I gave a table of what I thought would be the angular diameter of certain stars, and I am delighted to find that the figures so nearly correspond. This would seem to show the theories have been on the right side. (...) That is a very interesting confirmation of the theory of Russell and Hertzsprung of giant and dwarf stars, giving direct evidence that Betelgeuse is one of the inflated stars and very different from the sun” (*SCIENCE*, 1921, p. 22).

Capítulo 9

ix1

“Interferometer measurements of length can be regarded as either measurements of the wavelength of a spectral line, or measurements of length in terms of a known wavelength. Historically both view-points have had their day” (*STEEL*, 1967, p. 135).

ix2

“Il est donc certain que l'observation de ces anneaux ou franges d'interférence donne le moyen d'apprécier des changements de longueur si faibles, qu'ils seraient insensibles aux moyens de mesure ordinaires. L'application de ce principe à l'étude des dilatations se présente d'elle-même à l'esprit, lorsqu'il s'agit surtout des corps de dimensions trop petites (...)”

On voit donc qu'un rayon de lumière avec ses séries d'ondulations d'une ténuité extrême, mais parfaitement régulières, peut être considéré (...) comme un micromètre naturel de la plus grande perfection, et particulièrement propre à déterminer des longueurs extrêmement petites qui échapperaient à tout autre moyen de mesure. Cependant, deux conditions sont évidemment nécessaires pour légitimer une application de cette nature; c'est d'abord la connaissance très-exacte de la longueur d'onde de la lumière employée, et, en second lieu, la certitude que les ondulations successives se suivent à des distances toujours rigoureusement égales (...)" (FIZEAU, 1864, p. 147).

ix3

"If there is any difference, then the central fringe of the white-light system will not be in the same position on both mirrors, and we shall know that one is twice as long as the other less, say, two fringes, which would mean less one-half micron. In this way we can tell whether one is exactly twice as long as the other or not; and if not, we can determine the difference to within a very small fraction of a wave.

When we multiply the number of waves in the first standard by two, any error in the fractional excess is, of course, also multiplied by two. So the fraction of a wave which must be added to the second number is uncertain. If we observe the fringes produced by one radiation, for example, the red, we get a system of circular fringes upon both mirrors of the standard; and if these two systems have the same appearance on the upper mirror as on the lower, then we know this fraction is zero; and the number of waves in the second standard is then the nearest whole number to the number determined. If this is not the case, we can by a simple process tell what the fraction is, and can obtain this fractional excess to any required degree of accuracy. As an example, we may multiply the numbers obtained for the first standard by two, and we find 2,424.74 for the number of red waves in standard n° 2. The correct value of this fraction for red light was found to be .93 instead of 74. Thus the same degree of accuracy which was obtained in measuring the first standard can be obtained in all the standards up to the last" (MICHELSON, 1903, p. 97).

ix4

"The standard light waves are not alterable; they depend on the properties of the atoms and upon the universal ether; and these are unalterable. It may be suggested that the

whole solar system is moving through space, and that the properties of ether may differ in different portions of space. I would say that such a change, if it occurs, would not produce any material effect in a period of less than twenty millions of years, and by that time we shall probably have less interest in the problem” (MICHELSON, 1903, p. 105).

ix5

“(…) the idea came to me that it would be easy to solve the problem if it were possible to observe the interferences produced across the metal, and I thought that would be possible by using a lightly silvered glass plate (...). I was immediately struck by the singular appearance of the fringes which were visible as very fine lines (...). I had already met with similar conditions in fringes observed in the neighbourhood of total reflection (Herschel's fringes); the high reflective power of the silvered surfaces was evidently the cause of the phenomenon” (FABRY, 1926 *apud* CONNES, 1986, p. 20)