

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS E DAS
TÉCNICAS E EPISTEMOLOGIA

OCTAVIO FERREIRA FILHO

A HISTORICIDADE DA AÇÃO À DISTÂNCIA E A LEI DA GRAVITAÇÃO: de Isaac
Newton a Einstein

RIO DE JANEIRO

2022

OCTAVIO FERREIRA FILHO

A HISTORICIDADE DA AÇÃO À DISTÂNCIA E A LEI DA GRAVITAÇÃO: de Isaac
Newton a Einstein

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia (HCTE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Benevenuto
Guisard Koehler

RIO DE JANEIRO

2022

CIP – Catalogação na Publicação

F383h Ferreira Filho, Octavio
A historicidade da ação à distância e a lei da gravitação: de Isaac Newton a Einstein / Octavio Ferreira Filho. -- Rio de Janeiro, 2022.
90f.

Orientador: Carlos Benevenuto Guisard Koehler.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Decanato do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Programa de Pós-Graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia, 2022.

1. Ação à distância. 2. Gravitação. 3. Historicidade. 4. Eletromagnetismo. 5. Eletricidade. I. Koehler, Carlos Benevenuto Guisard, orient. II. Título.

OCTAVIO FERREIRA FILHO

A HISTORICIDADE DA AÇÃO À DISTÂNCIA E A LEI DA GRAVITAÇÃO: de Isaac
Newton a Einstein

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia (HCTE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

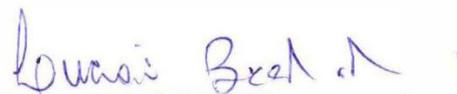
Aprovada em: 13 de abril de 2022.



Carlos Benevenuto Guisard Koehler, Doutor (HCTE/UFRJ)



Gastão Galvão de Carvalho Souza, Doutor (UFRJ)



Luciano Bicchieri Medeiros, Doutor (C. Militar RJ)



Mércio Pereira Gomes, Doutor (HCTE/UFRJ)

Dedico minha dissertação a meus pais
Octavio Ferreira e Zenaire Alves Ferreira
(*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

Aos meus filhos Ignacio, Beatriz e Bárbara por me incentivar sempre e a minha querida esposa Emília Carolina que me ajudou a realizar essa árdua jornada.

Aos queridos colegas de curso Alex, Humberto e Leonardo pela força que me deram, e ao secretário Robson. Ao meu orientador professor Carlos Koehler, aos professores Gastão Galvão, Luciano Bicchieri e aos demais membros da banca professores Mércio Gomes, Antonio Borges e Celso Péricles meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

FERREIRA FILHO, O. **A Historicidade da Ação à Distância e a Lei da Gravitação**: de Isaac Newton a Einstein. Rio de Janeiro, 2022. Dissertação (Mestrado em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia)- Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Esta dissertação se configura como um trabalho de análise histórico-filosófico que busca refletir sobre o caminho iniciado pela revolução astronômica dos modelos geocêntrico e heliocêntrico através dos escritos de Aristóteles, Ptolomeu, Copérnico; passando por Kepler, Tycho Brahe, Galileu e René Descartes, que antecederam Newton no processo de criação do conceito de ação à distância para a gravitação. Trazemos os embates epistemológicos que Newton teve com seus contemporâneos, como Leibniz, Robert Hooke, John Flamsteed, Boscovich e outros que formularam diferentes críticas à ideia de ação à distância. Os que sucederam os estudos de Newton, após a publicação de sua lei universal da gravitação, destacam-se Faraday com a apresentação das linhas de força e sua natureza física, André-Marie Ampère, Jean Baptista Biot e Felix Savart que refletiram sobre de uma lei newtoniana para o eletromagnetismo. Em outra linha, Maxwell e Poisson se debruçaram sobre o conceito de campo e a ação à distância. Já Einstein, apresentou as inconsistências na teoria de Newton para a ação à distância, onde destacamos as observações sobre o eclipse de Sobral no Ceará e a sua teoria da Relatividade Geral. O que propomos é uma reflexão sobre as várias confrontações e semelhanças que foram formuladas ao longo da história da ciência a respeito da ação à distância apresentada por Newton.

Palavras-chave: Ação à Distância; Gravitação; Historicidade; Eletromagnetismo; Eletricidade.

ABSTRACT

FERREIRA FILHO, O. **A Historicidade da Ação à Distância e a Lei da Gravitação**: de Isaac Newton a Einstein. Rio de Janeiro, 2022. Dissertação (Mestrado em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia)- Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

This dissertation is configured as a work of historical-philosophical analysis that seeks to reflect on the path initiated by the astronomical revolution of the geocentric and heliocentric models through the writings of Aristotle, Ptolemy, Copernicus; passing through Kepler, Tycho Brahe, Galileo and René Descartes, who preceded Newton in the process of creating the concept of action at a distance for gravitation. We bring the epistemological clashes that Newton had with his contemporaries, such as Leibniz, Robert Hooke, John Flamsteed, Boscovich and others who formulated different criticisms of the idea of action at a distance. Those who followed Newton's studies, after the publication of his universal law of gravitation, stand out Faraday with the presentation of the lines of force and their physical nature, André-Marie Ampère, Jean Baptista Biot and Felix Savart who reflected on a Newtonian law for electromagnetism. In another line, Maxwell and Poisson focused on the concept of field and action at a distance. Einstein, on the other hand, presented the inconsistencies in Newton's theory of action at a distance, where we highlighted the observations about the eclipse of Sobral in Ceará – Brazil and his theory of General Relativity. What we propose is a reflection on the various confrontations and similarities that have been stated throughout the history of science action at a distance presented by Newton.

Keywords: Action at a distance. Gravitation. Historicity. Electromagnetism. Electricity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fenômeno das marés motivado pela atração gravitacional.....	13
Figura 2 – Modelo do sistema geocêntrico de Ptolomeu e Aristóteles	16
Figura 3 – Terra no centro do Sistema Solar	17
Figura 4 – A lei das áreas de Kepler.....	18
Figura 5 – Planetas que orbitam o Sol.....	19
Figura 6 – Revelação da luneta de Galileu	20
Figura 7 – O paralaxe estelar	21
Figura 8 – Dialogo di Galileo	22
Figura 9 – Constancia do movimento horizontal.....	26
Figura 10 – Queda do mastro de um barco em movimento.....	27
Figura 11 – Esquema de aceleração de corpos	30
Figura 12 – A casa de Newton.....	31
Figura 13 – Teoria da Gravitação	31
Figura 14 – Movimento dos cometas	32
Figura 15 – Estrelas binárias	33
Figura 16 – Gottfried Wilhelm Leibniz.....	37
Figura 17 – Vórtices de Descartes	38
Figura 18 – A lei da força entre partículas de Boscovich.....	42
Figura 19 – Experimentos clássicos do globo de Guericke.....	45
Figura 20 – Jarra de Leyden	46
Figura 21 – Hipótese de ímãs na área de seção de um fio F condutor (Biot).....	50
Figura 22 – Força exercida pelo condutor	51
Figura 23 – Força exercida pelo condutor com fio quebrado.....	51
Figura 24 – Primeira hipótese de Ampère	53
Figura 25 – Um fio reto e um sinuoso	53
Figura 26 – Aparelho de medição da força entre o condutor móvel (vertical) BC e o condutor fixo RS, com inclinação ajustável	54
Figura 27 – Modelos de “circuitos astáticos”	56
Figura 28 – “casos de equilíbrio”	56
Figura 29 – Condutor flutuante em mercúrio	57
Figura 30 – Um manuscrito de Ampère	58
Figura 31 – Arco de um círculo.....	59

Figura 32 – Manuscrito de Ampère	59
Figura 33 – Royal Institution Christmas Lectures	62
Figura 34 – Linhas de força magnética traçadas por limalha de ferro	65
Figura 35 – Uma representação de linhas de força magnética obtidas por Faraday com limalha de ferro.....	68
Figura 36 – Maxwell	68
Figura 37 – Interpretação de Hertz para indução elétrica.....	73
Figura 38 – Lei da força	75
Figura 39 – Esquema de aceleração de corpos	75
Figura 40 – Dispositivo experimental	77
Figura 41 – Balança de torção usada por C. A. Coulomb	79
Figura 42 – Trajetória de Mercúrio	80
Figura 43 – Ilustração mostrando o planeta Mercúrio muito próximo do Sol	80
Figura 44 – Princípio da relatividade galileana	81
Figura 45 – Referenciais não-inerciais	82
Figura 46 – Representação artística do desvio causado pela atração gravitacional do Sol sobre o raio de luz de uma estrela	83
Figura 47 – Notícia sobre a descoberta da deflexão da luz	84
Figura 48 – Imagem da carta escrita por Einstein	84
Figura 49 – Terra e a Lua deformando o espaço-tempo.....	85
Figura 50 – Linha do tempo	88

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 A HISTORICIDADE DA REVOLUÇÃO ASTRONÔMICA QUE ANTECEDEU ISAAC NEWTON.....	15
2.1.1 A historicidade da teoria da gravitação universal de Newton.....	30
2.2 AS CRÍTICAS À IDEIA DE AÇÃO À DISTÂNCIA: “A DISCORDÂNCIA DE LEIBNIZ A AÇÃO À DISTÂNCIA PROPOSTA POR NEWTON”.....	37
2.2.1 Os argumentos de Boscovich e Leibniz sobre a ação à distância	40
2.3 AS ATRAÇÕES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS E A TENTATIVA DE ASSOCIÁ-LAS A AÇÃO À DISTÂNCIA	44
2.3.1 A Lei de Jean Baptista Biot e Felix Savart: Em busca de uma lei newtoniana para a eletrodinâmica.....	50
2.3.1.1 A lei de Biot-Savart	50
2.3.1.2 A “Apresentação” de Ampère	52
2.4 CONSIDERAÇÕES FEITAS POR FARADAY EM RELAÇÃO A PROPOSTA DE NEWTON SOBRE AÇÃO À DISTÂNCIA NO SÉCULO XVII	61
2.4.1 A natureza física das linhas de força e campo	61
2.4.2 Os critérios de Faraday para ação à distância e a natureza física das linhas de força	65
2.4.2.1 Primeiro, com relação à gravitação:	66
2.4.2.2 Segundo, com relação à radiação:	66
2.4.2.3 Terceiro, com relação à indução elétrica:	66
2.4.2.4 Quarto, com relação à corrente elétrica:	66
2.4.2.5 Assim há três tipos de forças exercidas à distância.	67
2.5 A CRIAÇÃO DO CONCEITO DE CAMPO FEITA POR MAXWELL E A AÇÃO À DISTÂNCIA.....	68
2.5.1 Hertz e as interpretações das equações de Maxwell.....	72
2.6 A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE G DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL DE ISAAC NEWTON.....	74
2.6.1 Comentário inicial sobre a gravitação newtoniana	74

2.6.2 A determinação do coeficiente G da Gravitação Universal pelo método de Cavendish	76
2.7 ALGUMAS INCONSISTÊNCIAS APRESENTADAS NA TEORIA DA GRAVITAÇÃO DE NEWTON E UMA BREVE PASSAGEM PELA TEORIA DA GRAVITAÇÃO DE EINSTEIN	79
2.7.1 Uma breve passagem pela Teoria da Gravitação de Einstein (1915)	82
2.7.1.1 O eclipse de Sobral (Ceará)	82
2.7.2 A teoria da Relatividade de Einstein	84
3 CONCLUSÃO.....	87
REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

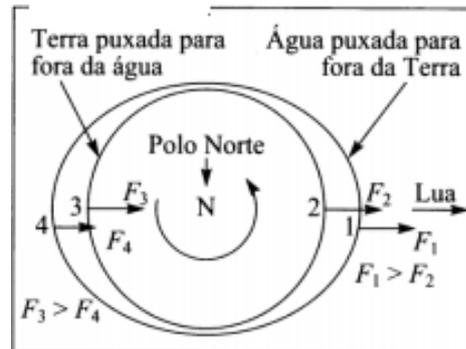
Teoricamente podemos propor que o senso comum é construído a partir do contexto histórico no qual os indivíduos estão inseridos e que ao longo dos tempos este senso comum vigente é constantemente questionado e problematizado, mas após o período de questionamentos e buscas um novo senso comum se instala demonstrando que nem toda forma de construção do conhecimento é racional na sua totalidade. Entendemos que deixado à própria sorte, o senso comum é conservador e prepotente, mas quando relacionado a outros saberes ele pode ser a base de um novo saber. É nesse contexto que historicamente observamos o saber do senso comum caminhar entre diferentes saberes constituídos nas sociedades como o mítico, o religioso, artístico, filosófico e científico.

A construção do pensamento de Newton na elaboração do conceito de ação à distância e da lei gravitação universal trouxe questionamentos sobre o fato de dificilmente o senso comum levar em consideração o contingente, o incerto na elaboração de uma teoria já que a própria história da ciência é farta em exemplos sobre este assunto. Por outro lado, temos na formação histórica do pensamento científico moderno, sua necessidade de ordenar o mundo, sua busca obsessiva pelo novo, pelo rompimento com o antigo, sua jornada em busca do progresso e da fuga do atraso. Desse modo, devemos refletir sobre como o paradigma moderno na ciência trouxe ao mundo a crença na razão e levantou suspeita sobre qualquer relato baseado em fé, tradição ou intuição. Ao longo dos últimos séculos criou-se um saber baseado na comprovação pelo método científico rigoroso e devemos refletir em como essa premissa desencadeou nas ideias de liberdade do ser humano para reger seu destino.

Nesse sentido, as descobertas de Isaac Newton que estudamos hoje, representam o ponto máximo da Revolução Científica das órbitas celestes iniciada no fim do século XVI, com Copérnico (1473-1543) “Sol é o centro e não a Terra”, Kepler (1571-1639) e Galileu (1564-1642). Mesmo que todos os interesses desses grandes pensadores não fossem todos voltados para o que temos hoje como ciência e aplicabilidade (várias de suas atividades intelectuais englobam a interpretação das escritas sagradas, cronologia, teologia e profecias bíblicas, além da alquimia). Sabemos que é através dos estudos de Newton que temos grandes revoluções em diferentes campos. No estudo da Mecânica que é a parte mais importante, na Matemática ele nos legou o cálculo infinitesimal, linguagem das ciências naturais pioneira no uso das séries infinitas e introdutória aos métodos de cálculo e aproximação que ainda hoje são usados. Na óptica, Newton estabeleceu a diversidade da luz solar e reformulou todo nosso entendimento da natureza da cor. Newton também nos trouxe todo o princípio da gravitação

universal onde ele pode elaborar seu próprio “sistema do mundo” a fim de explicar os fenômenos do céu e da Terra em um único sistema que hoje somos capazes de entender os movimentos de planetas, satélites e cometas e ainda o movimento dos corpos na Terra. Newton também conseguiu explicar que os fenômenos das marés (Figura 1), são causados por essa atração gravitacional das massas da água pelo Sol e a Lua.

Figura 1 – Fenômeno das marés motivado pela atração gravitacional



Fonte: Herch Moysés Nussenzveig (2013)

As marés foram atribuídas as forças gravitacionais da Lua e do Sol, a figura nos mostra as duas marés altas e as duas marés baixas. A força centrífuga também age no efeito das marés.

A coletânea dos escritos de Newton mostra a importância de seu pensamento ao longo dos tempos e como suas realizações passaram a simbolizar a racionalidade do Iluminismo em sua forma mais elevada. Assim, temos uma medida da grandeza de Isaac Newton ao saber que ele foi autor não apenas de uma, mas de várias revoluções no campo científico.

Desse modo, a filosofia e a ciência se mantem ligadas, pois ambas são saberes dotados de teoria, buscando a episteme (conhecimento). Sabendo que a palavra cientista não existia no século XVII, compreendemos que é possível que Newton se denominasse filósofo natural, alguém que procurava refletir e compreender a natureza do mundo em que vivia. Isaac Newton foi capaz de ler o universo e tentou dominá-lo para além das incertezas.

Newton dominou e revolucionou diversas áreas de atividade como no estudo da Matemática pura, em 1687 publicou sua famosa obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, a comparação prática, a Física experimental, a Óptica, a Mecânica racional e a Astronomia. Suas experiências e descobertas não foram tranquilas e prontamente aceitas. Sua

vida foi pontuada por disputas intelectuais com outros acadêmicos como Robert Hooke¹, John Flamsteed² e sobretudo Leibniz³. Entretanto é de Albert Einstein⁴ a definição sobre Newton que mais o define quanto este outro grande cientista declarou que para Newton, “a natureza [...] era um livro aberto, cujas letras ele sabia ler sem esforço”.

Analisaremos as propostas de Newton e suas teorias relativas à Ação à Distância, sua construção na elaboração da Lei da Gravitação Universal, sua recepção e sua rejeição no meio acadêmico da época, as críticas recebidas e sua aceitação como nova base teórica na Física.

¹ Filósofo inglês e meteorologista, formulou a teoria do movimento planetário e a primeira teoria sobre as propriedades elásticas da matéria.

² Foi primeiro astrônomo real da Inglaterra e fundador do observatório de Greenwich.

³ Filósofo alemão e matemático.

⁴ Físico teórico alemão, desenvolveu a Teoria da Relatividade Geral e Restrita.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Durante os últimos cem anos, mais ou menos, essa questão tem se tornado aguda. Considerando que, desde as disputas do século XVII, tornou-se moda o cientista considerar a filosofia como, na melhor das hipóteses, irrelevante e, na pior, um obstáculo ao seu trabalho, é comum encontrarmos físicos fazendo julgamentos filosóficos sobre suas teorias e termos como “realidade”, “epistemologia” e “construção mental” aparecem em exposição séria da física moderna e até invadem a atmosfera inibidora dos periódicos científicos.

Ao longo da história da ciência pode-se rastrear a influência de dois relatos contrastantes sobre que são as teorias da ciência, que tipo de informação elas fornecem sobre o mundo e, intimamente ligado a isso, qual é o melhor procedimento a seguir para desenvolvê-las. Outro exemplo ocorre no início do movimento da ciência moderna quando Copérnico (1473-1543), formulador da Teoria Heliocêntrica século XVI em seu livro “*De Revolutionibus Orbium Coelestium*” e Galileo (1564-1642), introdutor da ciência moderna, no estudo em relação ao movimento da Terra: reter, isto é, apenas a conveniência de um dispositivo de cálculo para o sistema heliocêntrico, não que isso representasse um relato verdadeiro da estrutura do mundo. A visão de Newton da ciência pelo menos em escritos *não-especulativos*, expressa nas famosas “hipóteses *non fingo*”, uma vez que Newton desejava limpar das teorias o que poderia ser deduzido dos fenômenos: “o que não é deduzido dos fenômenos devem ser chamados de hipóteses; e hipóteses, sejam elas metafísicas mecânicas não tem lugar na filosofia experimental” (NEWTON, 1947, p. 547). Ao que parece Newton acreditava que a força gravitacional acabaria sendo explicada em termos mecânicos ou não mecânicos, mas em seus escritos científicos ele nunca se posicionou a respeito de tais termos. A física newtoniana conhece a força e a gravitação como dados irreduzíveis da experimentação e não fornece informação de sua natureza metafísica.

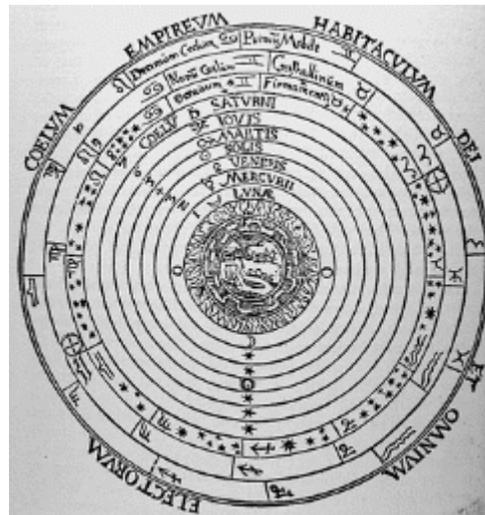
Newton não chegou a concluir o dispositivo de cálculo do sistema heliocêntrico; para ele o “verdadeiro sistema do mundo, na qual considerava as leis de Kepler como fenômenos, tomadas por indução”, e a sua teoria gravitacional como uma ação do mesmo tipo. E ele, diferentemente da maioria, não tinha medo de especular sobre possíveis “causas ocultas”, embora sempre se interessasse por apologias e com a esperança implícita de que tais causas acabariam sendo deduzíveis dos fenômenos e conseqüentemente não hipotéticas.

2.1 A HISTORICIDADE DA REVOLUÇÃO ASTRONÔMICA QUE ANTECEDEU ISAAC NEWTON

Johannes Kepler (1571-1630), e Galileu (1564-1642), reconheceram em Copérnico (1473 – 1543) como seu mestre, ambos dedicaram seus trabalhos voltados a revolução na astronomia que Copérnico havia iniciado. Cada um deles deu sua contribuição para tal teoria, embora essas contribuições não teriam sido aceitas por Copérnico.

Copérnico havia proposto uma reforma na estrutura da teoria planetária de Aristóteles. O Modelo do Sistema Celeste de Aristóteles (384 a.C – 322 a.C) e Ptolomeu (83 d.C - 161 d.C.), era o (Sistema Geocêntrico), onde a Terra ocupava o centro do Universo, para Aristóteles existiam dois mundos, um mundo supralunar (feito de éter), onde os planetas se movimentavam e um mundo sublunar (terrestre), feito de ar, fogo, terra e água. Na última casca esférica teriam as estrelas.

Figura 2 – Modelo do sistema geocêntrico de Ptolomeu e Aristóteles



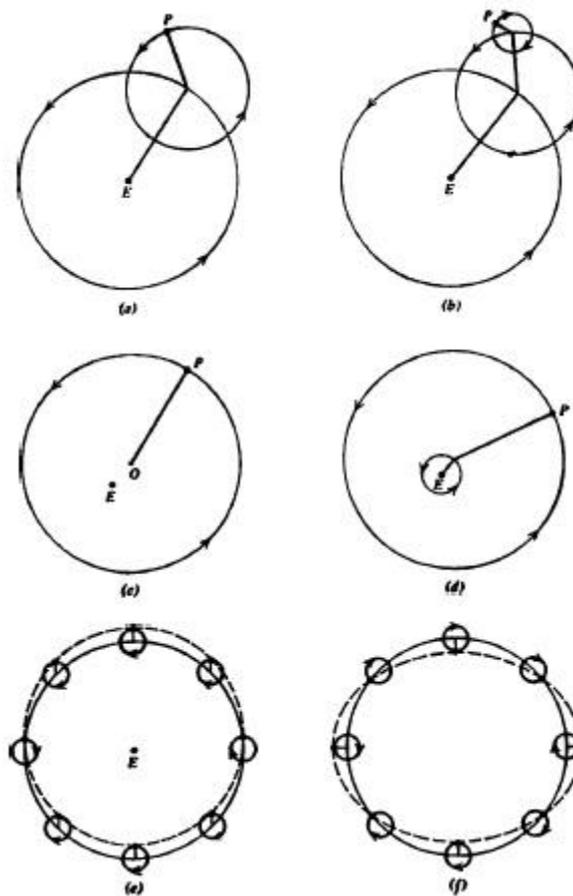
Fonte: Roberto de Andrade Martins (1994)

O trabalho de Kepler consistiu no aperfeiçoamento da teoria astronômica de Copérnico de acordo com os princípios neoplatônicos. Kepler estava convencido de que a teoria astronômica deveria ser mais do que um simples conjunto de recursos matemáticos que explicavam os fenômenos observáveis. Kepler criou a física celeste, seu maior trabalho, foi o primeiro a insistir categoricamente que a estrutura cristalina dos céus, há tanto tempo aceita, não existia e que o novo conjunto de questões sobre o movimento celestial deveria ser reformulado. Kepler considerava existir uma única física para o céu e a Terra, ele desejando descobrir a verdadeira estrutura matemática e as verdadeiras causas físicas. Nos casos de Mercúrio e Saturno a teoria divergia das observações aceitas, Kepler estava ciente de que as observações aceitas não eram confiáveis e que as observações de um contemporâneo seu Tycho Brahe havia coletado um conjunto de dados, mais preciso. Em 1600, Kepler se tornou assistente de Tycho, mas em 1601 ele morreu. Kepler aproveitou as observações de Tycho e

desenvolveu seu trabalho sobre as Leis do movimento planetário. Marte foi o objeto principal do seu trabalho.

Desde a evolução da ciência grega a astronomia tentou explicar os fenômenos celestiais por um arranjo de movimentos uniformes, o círculo era a figura perfeita e a única para descrever os céus. Kepler também começou a considerar Marte através do círculo, mas desde o início seu tratamento era diferente dos precedentes. Astrônomos anteriores a Kepler já haviam combinado círculos que representavam desenhos geométricos da astronomia Ptolemaica que colocava a Terra no centro do Sistema Solar (Figura 3).

Figura 3 – Terra no centro do Sistema Solar



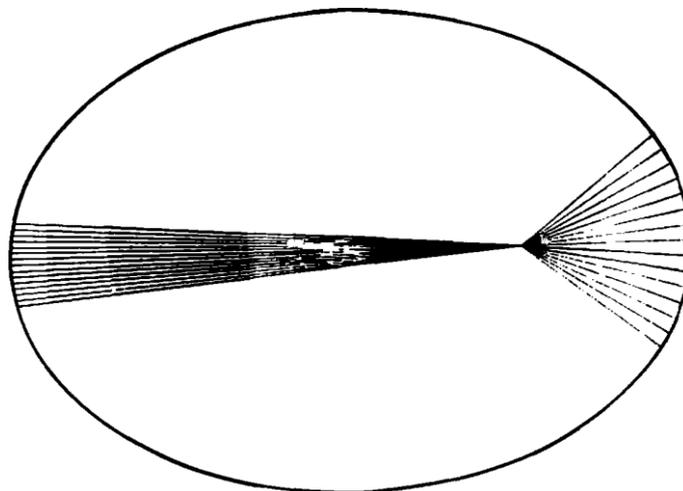
Fonte: Richard Westfall (1970)

O Sistema Geocêntrico é por excelência o Sistema Ptolomaico. A figura (a), representa um epiciclo principal em um deferente, a figura (b), representa dois epiciclos, um principal e um epiciclo, a figura (c), um excêntrico, a figura (d), um excêntrico e um deferente, a figura (e), representa o efeito de um epiciclo menor com o mesmo período do deferente e a figura (f), representa o efeito de um epiciclo menor com um período.

Nenhuma teoria havia proposto que a trajetória dos planetas era circular, Kepler foi o primeiro que tentou situar Marte em uma órbita circular, no entanto Kepler começou a rejeitar o movimento uniforme e a trajetória circular e em cima de evidências propôs que Marte se movimentava com velocidade variável. Kepler havia se dedicado na teoria quando, eventualmente, falhou. As observações de Tycho continham uma imprecisão de 8'(minutos), e as de Kepler de 2'(minutos), essas observações feitas por Tycho Brahe partiam de uma estrela fixa para uma estrela que se movia, Tycho elaborou tabelas conhecidas como Tábuas Rudolfinas (Marte, Vênus, Júpiter e outros), foram observações elaboradas em relação as estrelas fixas. Nas observações de Tycho havia um erro de 8'(minutos), nos cálculos de Marte e Kepler não deveria esquecer que essa observação exigia mais precisão. Kepler abandona temporariamente as observações sobre a órbita de Marte e dedica-se a órbita da Terra, mas aproveita os princípios aplicados em Marte e chega à conclusão que a velocidade da Terra $V \propto 1/d$, à distância da Terra ao Sol, Lei esta que Newton provou que estava incorreta, mas serviu para Kepler deduzir a lei das áreas que hoje consideramos correta.

A excentricidade da elipse está exagerada e o espaçamento entre as linhas representa uma pequena unidade de tempo (dt).

Figura 4 – A lei das áreas de Kepler

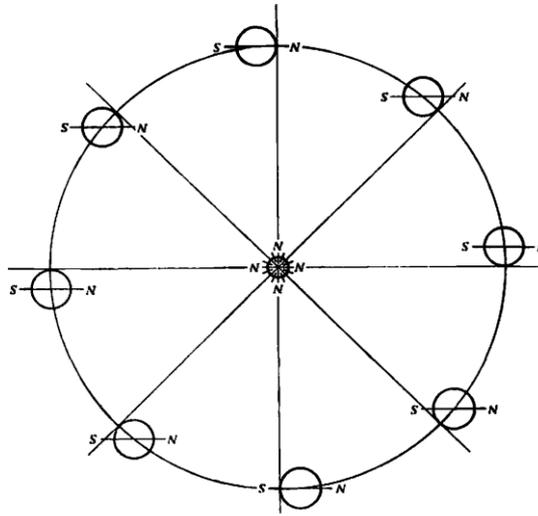


Fonte: Richard Westfall (1970)

A área varrida ($A \propto \Delta t$) é proporcional ao intervalo de tempo. O raio vetor que liga o planeta ao Sol varre áreas iguais em intervalos de tempos iguais. Vale ressaltar que Kepler partiu de uma premissa falsa $V \propto 1/d$, mas chegou à conclusão correta. A segunda lei de Kepler pode-se dizer que é equivalente a lei da conservação do momento angular, na qual não faremos a demonstração. A lei das velocidades também influenciou Kepler na sua mecânica celeste, cuja dinâmica central era atribuída ao Sol, o Sol era a fonte de todo o movimento, o

centro dinâmico do Sistema Solar. Enquanto o Sol girava em torno de seu eixo, os raios vetores empurravam os planetas (Figura 5).

Figura 5 – Planetas que orbitam o Sol



Fonte: Richard Westfall (1970)

De acordo com Kepler à medida que os planetas orbitam o Sol, a posição dos seus eixos mantém constante alinhamento. O Sol funciona como um ímã, cuja superfície forma um polo e o centro representa outro polo. O planeta durante sua órbita é atraído numa metade e repellido na outra metade.

Na mecânica celeste de Kepler não havia a concepção de força atrativa que fizesse o planeta orbitar em torno do Sol. Kepler se baseava na mecânica de Aristóteles, cujo movimento do corpo permanecia durante o tempo em que se deslocava sendo sua velocidade proporcional a força ($V \propto F$), Kepler parecia místico em relação a energia emanada do Sol, era uma espécie de “mistério cosmológico”.

Kepler observava o movimento dos planetas e o associou a uma razão mecânica da alavanca de Arquimedes, em outras palavras, quanto mais distante o planeta está do Sol mais lento ele se desloca e quanto mais próximo ele está mais rápido ele se desloca. Todo esse raciocínio desenvolvido por Kepler se baseava na energia radiante emanada do Sol. Essa energia que emanava do Sol era para Kepler um “*Mysterium Cosmographicum*”, uma “alma motora”, tudo muito místico.

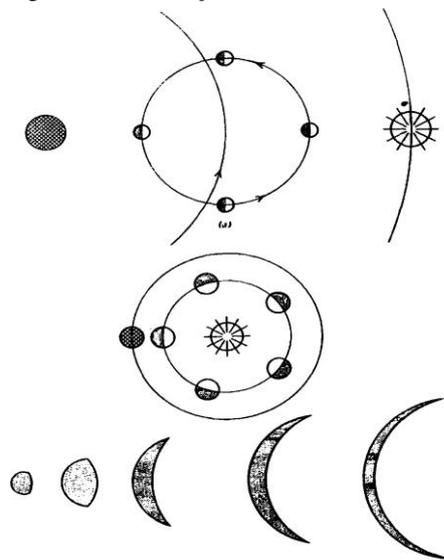
Kepler conclui que as órbitas são elípticas, onde o Sol ocupa um dos focos da elipse, essa seria então a Lei das Órbitas (primeira Lei de Kepler), mais tarde descobriu a terceira lei (Lei dos Período). O período de cada planeta em órbita em torno do Sol seria: $T^2/R^3 = C$, onde C representa uma constante do Sistema Solar ($C = 4\pi^2/GM$), M massa do Sol e G constante

da gravitação universal. Quase um século antes, Copérnico iniciou o caminho para mostrar o sistema planetário que contemplava a simplicidade geométrica. Kepler resolveu o problema de Copérnico levando a simplicidade geométrica a um nível histórico da astronomia. Se a observação de Copérnico que o Sol, em vez da Terra é o centro do Sistema Solar, podia confirmar-se uma única cônica serviria para descrever a órbita dos planetas. Toda a complexidade de seus excêntricos e epiciclos havia dado lugar a elipse, as leis de Kepler permanecem em nosso tempo, as observações de Tycho e os dados fornecidos por essas observações confiáveis deram a Kepler condições para que ele desenvolvesse suas leis.

Em 1609 Galileu construiu o telescópio, o mirou para o céu e fez observações voltadas ao Sistema heliocêntrico, observações essas que apenas reforçavam argumentos já propostos por outras bases. As crateras e manchas solares da Lua pareciam negar a perfeição a invariabilidade dos céus, mas a “nova estrela” que surgiu na constelação de Cassiopéia em 1572 e o cometa Halley em 1577, contribuíram ainda mais. Antes do descobrimento dos satélites de Júpiter, a Lua era considerada como único planeta a orbitar ao redor de outro planeta, isto parecia inexplicável no Sistema heliocêntrico e para tanto uma repulsa a existência de satélites em Júpiter.

No Sistema geocêntrico o planeta Vênus está sempre entre o Sol e a Terra, aproximadamente e deve aparecer sempre na fase crescente, já no Sistema heliocêntrico ele se move atrás do Sol e pode aparecer na fase cheia, isto é que a luneta de Galileu revelou (Figura 6).

Figura 6 – Revelação da luneta de Galileu



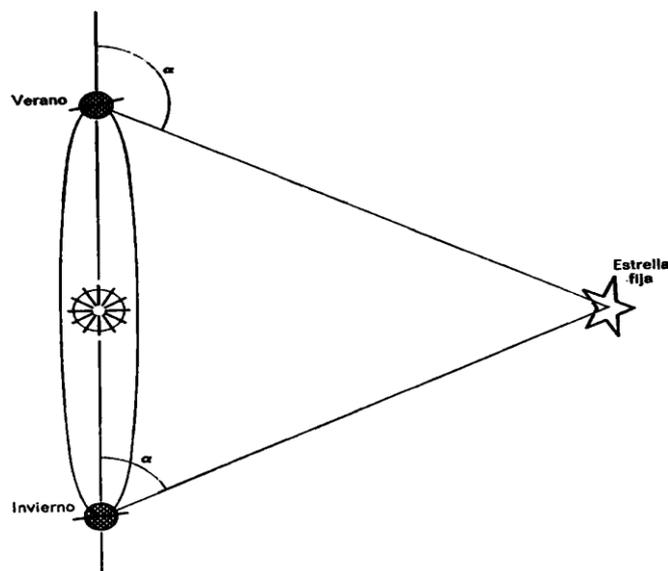
Fonte: Richard Westfall (1970)

As fases de Vênus (a) O Sistema ptolemaico, (b) O Sistema copernicano. No Sistema ptolemaico Vênus aparece mais ou menos em fase crescente. No Sistema de Copérnico, ele aparece quase na fase cheia quando passa atrás do Sol.

A luneta de Galileu não revelou a paralaxe estelar, quando o Sistema copernicano surgiu, a importância da paralaxe estelar, se tornou óbvia, se a Terra se move ao redor do Sol em uma órbita gigantesca as posições das estrelas fixas também mudam à medida que um observador se desloca de uma extremidade da órbita para a outra.

O Paralaxe⁵ estelar (Figura 7). A órbita da Terra é mostrada ao lado. Para as posições da Terra que estão a seis meses de distância, os dois ângulos em que uma estrela fixa é observada devem distinguir se a Terra orbita em torno do Sol.

Figura 7 – O paralaxe estelar



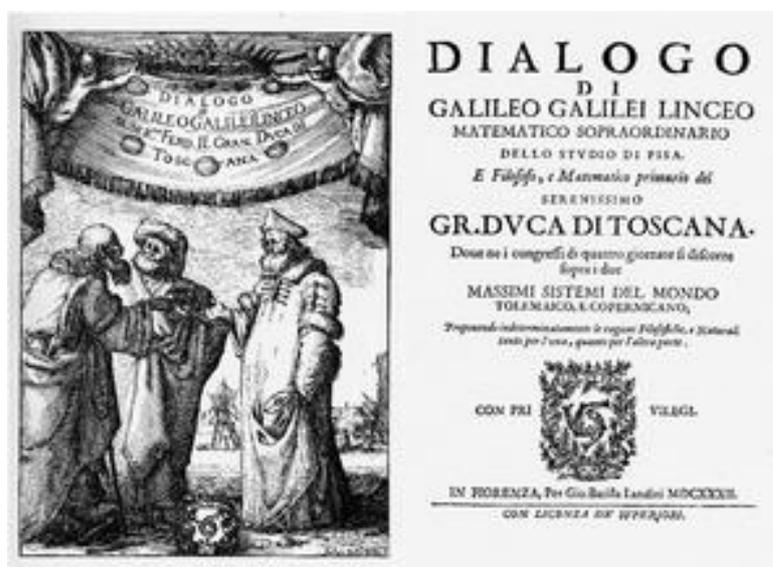
Fonte: Richard Westfall (1970)

A olho nu ou com telescópio não se via a paralaxe estelar, as estrelas fixas estão muito longe, tão longe que haveria necessidade de o telescópio ter uma potência muito grande algo não desenvolvido até o século XIX, para detectar pequenos ângulos. O telescópio de Galileu não foi capaz de distinguir, e a aparição da paralaxe estelar não foi possível. Isto equilibrou a princípio o teste positivo fornecido pelas fases de Vênus. Para o Sistema copernicano foi usado o argumento da harmonia geométrica e a simplicidade. O senso comum não era o menor sacrifício exigido em nome dessa simplicidade. Tem sido frequentemente mostrada que a ciência moderna tem exigido uma reeducação do bom senso. O que poderia ter mais

⁵Desvio aparente de posição qualquer estrela.

bom senso que o Sistema geocêntrico? “o Sol nasce e a Terra é sólida. O maior obstáculo para a aceitação da nova astronomia (Sistema heliocêntrico), foi o senso comum, a nova astronomia era vulgarizada diariamente. O senso comum achou uma expressão adequada ao Sistema heliocêntrico, finalmente aceito. Como diz Simplício no “Diálogo”⁶ (Figura 8), de Galileu “o importante é mover a Terra sem provocar milhares de obstáculos”. Os obstáculos se referiam ao movimento da Terra em torno do seu próprio eixo e isso era considerado um absurdo. Antes do sistema heliocêntrico ter aceitação total, os obstáculos teriam que se justificar de modo hábil, e o homem que o fez era o mesmo que colocou a frase na boca de Simplício.

Figura 8 – Dialogo di Galileo



Fonte: Galileos Dialogue (1632)

Os trabalhos de Galileu, desde o princípio, se concentraram na dinâmica do movimento. Seu trabalho inicial se de una primeira metade da última década do século XVI – aproximadamente na época da primeira obra de Kepler –, intitulava-se “De Motu”. Por “De Motu” vemos que Galileu começou sua carreira como apoiador da escola da mecânica do ímpeto. O conceito de ímpeto se desenvolveu na Alta Idade Média (século V ao X) como solução para problema que a mecânica aristotélica encontrou mais ostensivamente. Aristóteles baseou sua mecânica no princípio – em si mesmo tão evidente ao senso comum – a estabilidade da Terra, segundo a qual todo o movimento requer uma causa, e que um corpo se move somente quando algo se move e apenas em tal caso.

⁶ Diálogo é um livro de Galileu escrito em 1632, em língua italiana, que compara o sistema de Copérnico com o sistema de Ptolomeu.

O princípio parecia tão evidente quanto trivial. Os gregos, também lançaram um disco, um projétil, o que os mantém em movimento uma vez que o lançador se separou dos objetos? Aristóteles respondeu que a causa era o meio na qual os movimentos se moviam. O conceito de ímpeto, por outro lado transferiu a causa do movimento – a causa era necessária, exigida pela própria natureza do movimento – do meio para os objetos. Um corpo em movimento adquire impulso que o mantém em movimento uma vez que é separado do lançador.

Do século XIV ao XVI, o conceito do ímpeto perdurou na dianteira do pensamento criativo na mecânica aristotélica, Galileu quando jovem havia adotado a mecânica aristotélica. Ao conceito de ímpeto Galileu acrescentou as influências de Arquimedes, achando uma maneira de esclarecer o conceito de ímpeto em termos de estática dos fluidos e com isso fez uma dinâmica quantitativa exata que contemplava a estática de Arquimedes. Depois de uma década abandonou esse conceito de ímpeto, e *De Motu*⁷ se consolidou como obra científica de Galileu.

Ao longo de sua carreira Galileu foi atrás de uma ciência quantitativa do movimento, e a Revolução Científica experimentou a sua mais espetacular conquista, a mecânica a partir das bases por ele estabelecidas. A mecânica *De Motu* (trabalho inicial de Galileu sobre o movimento). A mecânica “*De Motu*” foi deixada de lado por Galileu na medida em que ele se sentiu incapaz de resolvê-la. Parecia uma contradição existente entre o fenômeno do movimento que observamos ao nosso redor e a razão de que a Terra gira em torno do seu próprio eixo. “Suponha que um objeto é deixado cair de uma torre, de acordo com o Sistema de Copérnico, a torre gira com a Terra que possui uma velocidade muito grande de oeste para leste, assim o objeto deveria cair a oeste da torre, no entanto sabemos que o objeto cai em linha reta no pé da torre.

Portanto, não parecia plausível a Terra girar em seu próprio eixo. Apesar da inconveniência de uma Terra em movimento, na qual insistiu no “Diálogo” de Galileu, possa ser descrita de diversas maneiras, o problema da queda vertical do objeto pode ser entendido como uma síntese razoável de todos eles. Deve-se entender que a objeção não era absurda. Na concepção aristotélica de movimento, ou seja, aceita por todos, no Sistema mecânico seria

⁷ *De Motu* é um tratado inicial de Galileu sobre o movimento natural, tratado este que confrontava toda física aristotélica, sobre o movimento.

sugerir que a Terra estava se movimentando. A objeção a ser respondida exigia a criação de novo Sistema mecânico.

O problema colocado pela astronomia copernicana tinha como solução a criação de uma nova mecânica, o conceito de inércia. “Um corpo em movimento permanece em movimento com velocidade constante até que uma ação externa venha a alterá-lo. “Correr de mãos dadas com a Terra, disse Galileu ao problema da queda do objeto, é o movimento principal e eterno que este objeto experimenta, como um objeto terrestre que por natureza sempre a terá”. Como nenhuma causa atua para parar o movimento do objeto de oeste para leste, este cai no solo paralelamente a torre quando é abandonado. “Em suas discussões socráticas com Simplicio, Salviati⁸ (porta-voz de Galileu em sua grande polêmica em defesa do Sistema copernicano, “De motu,” “*sopra i due massimi sistemi del mundo, 1632*”), o que aconteceria com uma bola se esta fosse colocada a cair de um plano inclinado? Ela rolaria plano abaixo com velocidade acelerada. Subiria o plano inclinado? Não, a menos que recebesse um impulso inicial e a sua velocidade iria diminuir gradativamente à medida que fosse subindo. E se fosse colocada num plano horizontal e sofresse um empurrão? Segundo Simplicio não haveria causa que a fizesse acelerar ou desacelerar, a bola continuaria a rolar até onde conseguisse. Se a superfície fosse infinita? Aristóteles respondeu que a bola teria movimento infinito “é assim que me parece”. Como Descartes resumiria mais tarde, os homens tinham perdido a pergunta sobre o movimento. Eles se perguntaram o que mantinha a bola em movimento, mas a pergunta certa seria: o que a faz parar?

Galileu, na verdade, não utilizou a palavra inércia. Galileu não usou o conceito de inércia como se usa hoje. Galileu não rompeu completamente com o passado e ao formular uma nova concepção de movimento foi limitado a elementos da antiga astronomia. O círculo era a figura perfeita, compatível com ordenação do cosmos. Somente em um círculo um corpo pode se mover infinitamente em seu lugar natural, sempre mantendo a distância do mesmo ponto, apenas em movimentos circulares os corpos celestes podem manter suas principais relações. O movimento retilíneo implica em desordem, um corpo retirado de seu lugar retorna ao ponto da linha reta. Uma vez estando ali, o corpo permanece em seu lugar e retoma o movimento circular natural.

Portanto, a astronomia do Diálogo era tal que nenhum astrônomo o teria aceitado. Publicado mais de vinte anos após a “Nova Astronomia” de Kepler, o “Diálogo”, que

⁸ Simplicio e Salviati são personagens criados por Galileu.

pretendia apoiar o Sistema heliocêntrico, ignorou as conclusões de Kepler, e a técnica dos epiciclos das teorias anteriores. O Sistema de Copérnico foi discutido como se cada planeta executasse um movimento circular. A relação de Galileu e Kepler está cheia de contradições. Kepler tratou o Sistema Solar em termos mecânicos e procurou entender as “forças físicas que regem o movimento”, utilizou uma norma da mecânica baseada em princípios que Galileu havia abandonado. Galileu reformulou os princípios básicos da nova mecânica e ignorou os problemas para os quais a mecânica celestial de Kepler era orientada e usou como alegação que os planetas se movem em órbitas circulares.

Galileu pensou igual a Kepler quando se deparou com o problema da Terra girando em torno do seu próprio eixo, e o conceito de inércia, que ele próprio formulou, reflete bem os termos em que o problema foi apresentado a ele. Como vimos, Salviati leva Simplicio a concordar que uma bola se movendo num plano horizontal não experimenta causa alguma que a acelere ou a desacelere e, portanto, ela deve se mover com velocidade constante para sempre. O movimento inercial foi aceito como um movimento circular uniforme, um movimento natural em um Universo bem distribuído.

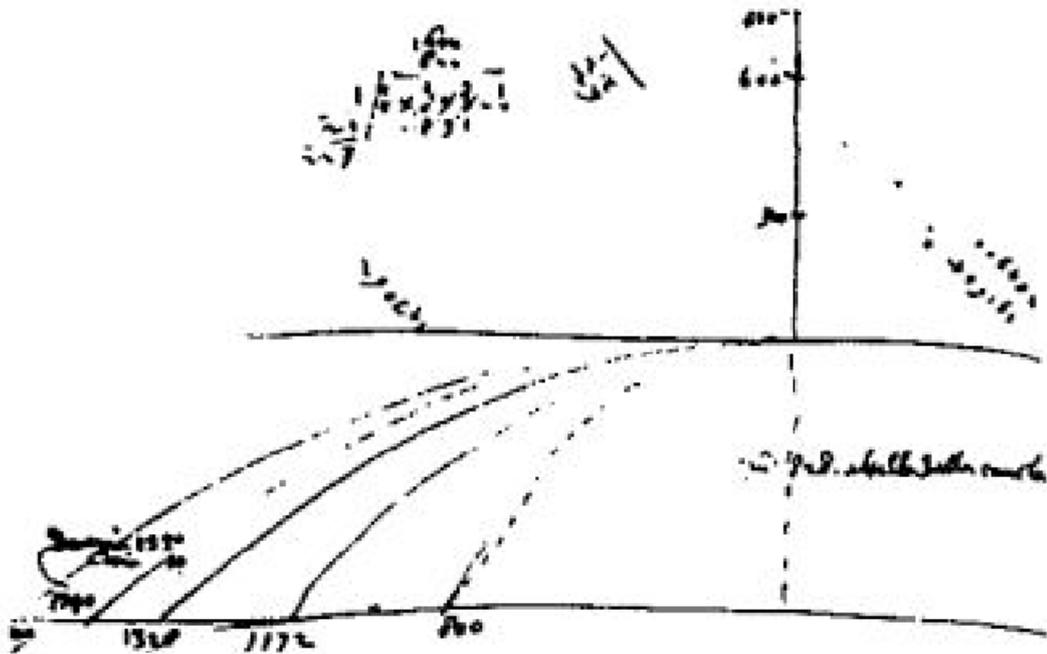
Por trás do Princípio da inércia tinha-se uma nova concepção de movimento. Para Aristóteles, o movimento foi algo que envolvia a própria essência do corpo. Para Aristóteles a palavra movimento era apenas um exemplo de uma concepção muito mais ampla que se destinava a abranger qualquer tipo de mudança, como o crescimento de uma planta, a educação de uma pessoa, movimentos semelhantes a queda de um corpo. Do mesmo modo, que uma semente se desenvolve para se transformar numa planta, um corpo caindo procura o seu lugar natural. A parte essencial galileana do movimento está na separação do movimento da natureza dos corpos. De maneira nenhuma um corpo é afetado pelo seu próprio movimento horizontal uniforme. O movimento é apenas um estado em que se encontra o corpo, como disse Galileu “um corpo é indiferente ao seu estado de movimento ou de descanso”. Essa ideia do indiferente foi importante para a conclusão de Galileu sobre o movimento no universo de Copérnico. Como somos indiferentes ao movimento, podemos estar nos movendo a uma velocidade grande sem notar, uma afirmação absurda para Aristóteles, no qual o movimento expressa a natureza de um corpo.

Considere (argumentou Galileu): O *movimento*, na medida em que é e age como um *movimento*, existe relativamente para as coisas que não as tem; e entre as coisas que qualquer *movimento* compartilha na igualdade, ele não age, e é como se não existisse. Por exemplo, as mercadorias com as quais um navio que parte de Veneza, passa por Corfu, Creta, Chipre, e até Aleppo está carregada. Veneza, Corfu, Creta etc., permanecem em repouso nos seus

lugares e não se movem juntos com o barco; mas em relação as mercadorias, caixas e pacotes com os quais o navio está carregado, o movimento de Veneza para a Síria em relação ao barco é inexistente, e não altera de forma alguma a relação entre eles; isso é porque é comum a todos eles e todos eles compartilham igualmente. Se um saco da carga do barco fosse movido alguns milímetros, isso seria muito mais *movimento* para ele do que a viagem de 2000 milhas feita por todos (WESTFALL, 1977, p. 36).

O movimento assim compreendido não requer mais causas do que aquela que exige descanso (repouso). Somente alteração no movimento requer uma causa. Devido à sua indiferença ao movimento, um corpo pode participar de mais de um movimento de cada vez. Nenhum deles interfere sobre o outros, e eles se combinam para traçar uma trajetória por mais complexa que seja. Um dos maiores feitos de Galileu foi demonstrar o lançamento horizontal de um objeto, com a combinação de dois movimentos, um na vertical em direção à Terra de forma acelerada e outro na horizontal em movimento constante (Figura 9).

Figura 9 – Constancia do movimento horizontal



Fonte: Galileu (1608)

Figura 9 apresenta um desenho de Galileu de 1608 ilustrando a constância do movimento horizontal do projétil e as componentes horizontal e vertical do movimento que compõem a trajetória parabólica do corpo lançado horizontalmente.

Galileu afirmou que a trajetória parabólica se forma assim que o projétil sai da mão do lançador, no entanto a ideia de movimento natural permaneça em sua mente. Não havia mais a diferença entre movimento violento e o natural, são idênticos. O mesmo acontece com um

objeto que cai no pé de uma torre, mesmo que a Terra gire em torno de si mesma e explicou por que uma bola cai ao pé de um mastro de um barco (Figura 10).

Figura 10 – Queda do mastro de um barco em movimento

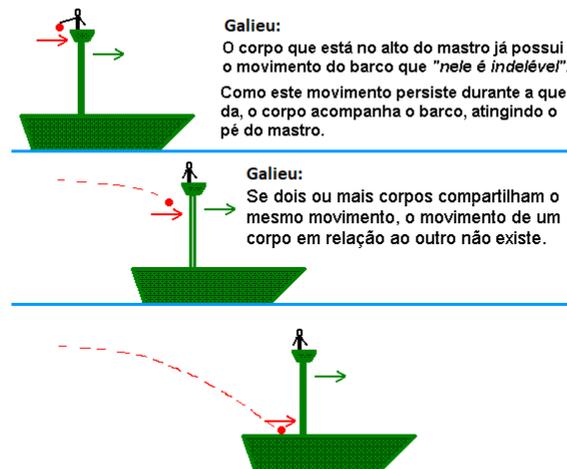


Figura 2 - O argumento galileiano da queda do mastro de um barco em movimento.

Fonte: UFRGS

Na Figura 10 o argumento galileiano da queda de um corpo do mastro de um barco. Mais adiante falaremos sobre as transformações de Galileu – Newton.

A concepção de inércia de Galileu, de que o movimento é retilíneo, tornou-se importante para a física moderna. Como tal é aceita em nossos dias no sistema educacional de modo natural. Não podemos examiná-lo objetivamente; imaginemos as dificuldades em formular a ideia em um mundo predisposto a não aceitar a concepção de inércia.

O princípio da inércia, não simplesmente expressa, os fatos observados? A sugestão implica nossa convicção de que a ciência moderna é baseada em fundamentos sólidos de fatos empíricos, de que nasceu quando o homem deixou de lado o sofisma vazio da escolástica medieval para se dirigir à observações diretas da natureza. Ao longo do “Diálogo”, é Simplicio, a criação de Galileu para apresentar o ponto de vista do aristotelismo, que afirmo a “santidade” da observação. Salviati, que fala por Galileu, tem que negar as exigências dos sentidos em favor de razões superiores.

“Tão pouco pude admirar suficientemente a excepcional perspicácia daqueles que tem essa visão Copernicana e aceitá-la como verdadeira; eles têm exercido pela força do intelecto tal intimidação aos seus próprios sentidos que preferem que a razão lhes diz o que, pelo

contrário, é claramente mostrado a eles por uma experiência sensata que tem sentido”. A força que é necessária para manter um corpo em movimento não era menos importante que a experiência sensata mostrada aos homens, ou parecia mostrá-los antes que Galileu os ensinasse a interpretá-lo de forma diferente.

Qual realmente é a experiência do movimento inercial? O movimento inercial é uma concepção ideal incapaz de se materializar nos fatos. Galileu partiu da análise de condições ideais que a experiência nunca pode confirmar. Para Galileu, o mundo real era o mundo ideal das relações matemáticas. O mundo material era uma realização imperfeita ao mundo ideal que servia de modelo para Galileu. Só no mundo perfeito a esfera perfeita rola no plano perfeitamente suave, no mundo material, os planos nunca são perfeitos e as esferas nunca são perfeitamente esféricas e ao final param.

Com Galileu, no entanto, a geometrização da natureza tomou um novo rumo. Para Kepler bem como para toda a tradicional astronomia anterior apenas movimentos celestes, perfeitos e eternos, pareciam oferecer um caminho para análise geométrica. Galileu propôs a geometrização aos movimentos da Terra. Este é o último sentido de sua afirmação de que a Terra se torna um corpo celeste dentro do Sistema de Copérnico. Se o problema básico ao qual seu trabalho em mecânica foi dirigido e proposto pela revolução copernicana, o princípio da inércia que ele formulou para respondê-la ofereceu os meios para desenvolver uma ciência matemática do movimento como ele já havia tentado em seu trabalho inicial, o “De Motu”. A importância que ele deu a essa conquista se reflete no título que seu trabalho recebeu que o expôs: “Discurso sobre duas novas ciência em 1638”.

Uma dessas duas novas ciências foi a Dinâmica, limitada ao caso particular do movimento uniformemente acelerado da queda de corpos pesados. Embora se recusasse a discutir suas causas. Ele tratou a queda livre em termos dinâmicos, como uma causa uniforme que produziu um efeito uniforme.

Quando comparamos os “Discursos” com o “De Motu”, vemos que Galileu olhava para características diferentes de uma ação dinâmica. De Motu tentou comparar Dinâmica com Estática do Fluidos. Os “Discursos” reconheceram que a Dinâmica deve ser baseada em seus próprios princípios.

Quando vejo uma pedra, partindo do repouso, cai de uma altura e constantemente ganha novos aumentos de velocidade, por que não acreditar que essas adições são feitas da maneira mais simples e fácil de todas? O corpo em queda permanece o mesmo, e portanto, também o início do movimento. Por que os outros fatores não permanecem igualmente

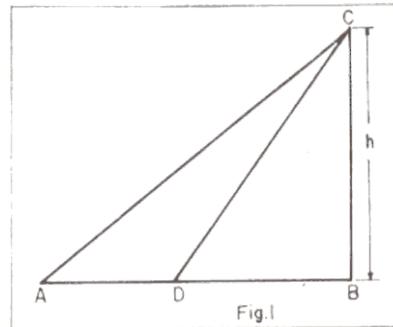
constantes? Você vai dizer: a velocidade então é constante. De jeito nenhum! Os fatos afirmam que a velocidade não é constante, e que o movimento não é uniforme. É necessário, portanto, situar a identidade, ou se preferir, uniformidade e simplicidade, não na velocidade, mas em seu aumento, ou seja, na sua aceleração (WESTFALL, 1977, p. 40).

A nova concepção de movimento indica o caminho da nova compreensão da queda livre dos corpos. O modo de focar a questão de “De Motu” através da estática dos fluidos expressa a concepção aristotélica de que cada efeito requer uma causa. Quando o movimento começou a ser visto como um estado que persiste a menos que seja alterado, um novo efeito poderia ser identificado. Galileu especificou que o efeito dinâmico do “Princípio do Movimento” (neste caso referindo-se ao peso), é a aceleração; e como o princípio do movimento permanece constante, a aceleração também permanece. Galileu concluiu que todos os corpos, sendo compostos da mesma matéria mais ou menos densa, caem com a mesma aceleração.

A análise da queda livre forneceu o protótipo da equação básica da Dinâmica moderna. Galileu, no entanto, nunca considerou o peso como uma força. Para Galileu era uma propriedade única dos corpos, e ele sempre se referia à tendência dos corpos pesados de se moverem na direção e sentido do centro da Terra como movimento natural. Galileu não se encontrava sozinho no seu desconhecimento de tratar a gravidade como uma força externa agindo sobre a matéria. Galileu conseguiu construir as bases de uma ciência matemática do movimento, ele definiu o movimento uniforme e o movimento uniformemente acelerado, e descreveu ambos em termos matemáticos. Uma vez que a geometria, a seu ver, representava o verdadeiro modelo da ciência, ele expressou seus resultados com razões geométricas e não com equações algébricas, mas as razões eram idênticas as equações básicas do movimento, que relacionam velocidade, aceleração, tempo e distância, e hoje os estudantes começam a estudar Mecânica e aprendem que: $V=a.t$; $S=\frac{1}{2}at^2$; $V^2=2as$.

Galileu também foi capaz de mostrar que os corpos experimentavam acelerações iguais em qualquer deslocamento vertical igual. Se um corpo cai livremente do repouso, e outro que parte do repouso descendo um plano inclinado seu caminho deve ser mais longo e o tempo no deslocamento maior, para que ambos tenham a mesma velocidade ao final (Figura 11).

Figura 11 – Esquema de aceleração de corpos



Fonte: Antônio Brito (1985)

Na Figura 11 os planos inclinados CB e CD possuem altura $CA = h$.

A última conclusão desempenhou um papel importante na concepção de universo de Galileu e nos leva ao novo sistema de Copérnico que propôs em sua cosmologia. O movimento circular que conserva a integridade de um universo bem harmônico, ordenado e idêntico ao movimento inercial dos corpos pesados ao redor de um centro gravitacional.

Desde que eles não se aproximem do centro ou se afastem dele, não há causa que interfira para mudar sua velocidade, O movimento inercial só pode manter a velocidade, ele nunca pode criá-lo. O movimento de corpos pesados em direção a um centro gravitacional é a única fonte de velocidade crescente, e a distância ao centro é o meio pelo qual os movimentos são desfeitos. Em ambos os casos em incrementos iguais de velocidade correspondentes a iguais deslocamentos radiais.

Para Galileu a aceleração da gravidade era constante para todas as distâncias ao centro, do mesmo modo que o peso era uma propriedade constante de todos os corpos, mesmo que sua causa fosse desconhecida.

Kepler e Galileu confirmaram e completaram a revolução Copernicana, quando Galileu morreu, em 1642, provavelmente apenas uma minoria de astrônomos aceitava o sistema heliocêntrico. No entanto, suas vantagens plenas foram evidentes nas obras de Kepler e Galileu e as principais objeções foram respondidas. Sua aceitação geral era apenas uma questão de tempo. A importância de Kepler e Galileu, no entanto, reside menos em sua relação com Copérnico e o passado, do que em relação com o século XVII que se seguiu.

Ao resolver os problemas do passado, eles levantaram os problemas futuros, Kepler iniciando a questão da Dinâmica celeste e Galileu a da Mecânica terrestre. A ciência do século XVII atingiu suas grandes realizações completando o trabalho iniciado por eles.

2.1.1 A historicidade da teoria da gravitação universal de Newton

Newton enunciou a Lei da gravitação Universal em 1666 e a publicou em 1687, na sua obra (*Philosophie Naturalis Principia Mathematica*) e prova que a atração entre os planetas envolve a Lei do inverso do quadrado da distância, mas não mostra a origem da força atrativa.

Em seu trabalho sobre a Teoria da Gravitação Newton focou nas observações do Sistema Solar. Existe relatos de sua época a respeito da queda de uma maçã que teria caído de uma macieira e, com isto Newton teria associado à Lei da Gravitação. Na verdade, ele estava preocupado com o movimento da Lua em torno da Terra. Por que o satélite não seguia em linha reta?

Figura 12 – A casa de Newton

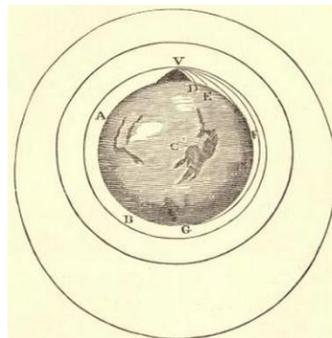


Fonte: Tecmundo

Há um episódio sobre a queda da maçã. Existe uma descrição do próprio Newton, embora tardia; também do marido de uma sobrinha sua, Newton teria saído de Cambridge e voltado para a fazenda de sua mãe, passeando pelo jardim (a palavra jardim é do relato) e ao observar uma maçã caindo, casualmente ocorreu-lhe a ideia de que o mesmo poder que fazia com que a maçã caísse talvez fosse responsável por reter a Lua à Terra, impedindo-a de se afastar da Terra (MARTINS, 1990, p. 11).

Há relatos e manuscritos de Newton que mesmo do alto de uma montanha existia gravidade (Figura 13).

Figura 13 – Teoria da Gravitação



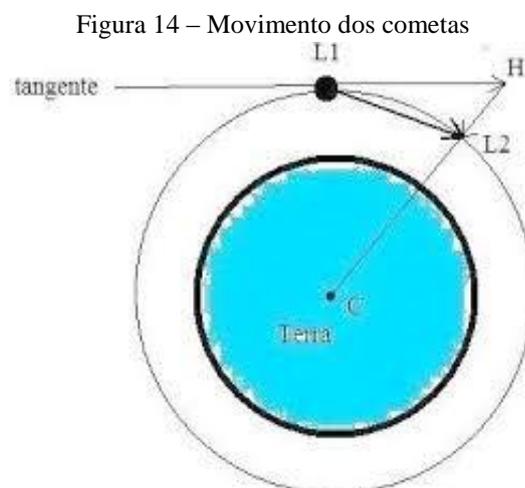
Fonte: UFRGS

Esta figura é apresentada no Livro III da obra de Isaac Newton denominada “Princípios Matemáticos da Filosofia Natural”. Pedras são lançadas do alto de uma montanha

com velocidades cada vez maiores, até que uma delas entra em órbita da Terra e, portanto, não atinge mais o solo.

Newton se baseou na terceira lei de Kepler, que é a lei dos períodos de revolução, para mostrar que dentro de uma boa aproximação, as órbitas dos planetas eram circulares e que a aceleração era inversamente proporcional ao quadrado da distância que liga os centros dos planetas. Em seus manuscritos consta que Newton testou isso com a Lua orbitando em torno da Terra, se a distância da Terra à Lua é aproximadamente 60 vezes o raio da Terra ($D \approx 60.R_T$), e se a aceleração é inversamente proporcional ao quadrado da distância então teremos: $A \propto 1/D^2$; logo A_L (aceleração na lua) seria $1/60^2$ da aceleração terrestre. Assim a aceleração A_T/g (aceleração Terra/Lua) seria $\frac{A_T/g}{g} \sim 1/60^2$, o que Newton fez foi comparar a distância (h), que um objeto percorre numa queda em 1 segundo na Terra, com a queda do objeto em 1 minuto (60 segundos), se este estiver a mesma distância da Lua. Lembrando que a distância percorrida $h \propto t^2$. Nesse sentido Newton mostrou que o mesmo acontecia com a Lua que também deveria cair no sentido da Terra devido a ação da força centrípeta. Observe a figura abaixo (Fig. 14), de L_1 para L_2 , a Lua executa um movimento orbital em torno da Terra, no mesmo instante realiza um movimento tangencial de L_1 para H e de H para L_2 , direção na qual atua a força centrípeta no sentido da Terra. Contudo havia anomalias no movimento da Lua orbitando a Terra, provocada pela atração do Sol sobre a Lua (MARTINS, 1990).

Então, o que faz a lua não cair sobre a Terra? A combinação de sua velocidade tangencial orbitando a Terra e a força centrípeta exercida pela Terra sobre a Lua dada pela lei do inverso do quadrado a seguir $F \propto 1/D^2$, isto também se aplicava ao movimento dos cometas (Figura 14).



Fonte: Domingos Soares

Newton se guiou muito pelas leis de Kepler e fez algumas correções, pois para Kepler o Sol estaria estacionário no centro do Sistema Solar, ocupando um dos focos da trajetória elíptica. Mas o Sol recebe também influência dos planetas e todos interagem entre si. Num sistema binário de corpos celestes por exemplo entre o Sol e um planeta a força gravitacional mútua entre eles faz com que eles orbitem em torno do centro de massa (C.M). As leis de Kepler, como podemos ver, se mostram importantes para o desenvolvimento dos estudos feitos por Newton sobre o movimento de planetas, satélites e cometas. Newton também determinou as massas de alguns planetas; até o século XVII eram conhecidos, Marte, Mercúrio, Terra, Vênus, Júpiter e Saturno. Newton observa e explica que o movimento dos cometas se encaixa na lei do inverso do quadrado da distância, e que também suas órbitas são praticamente circulares (excentricidade ≈ 0). A figura abaixo ilustra o movimento sobre o centro de massa (C.M), (Figura 15)

Figura 15 – Estrelas binárias



Fonte: UFRGS (2004)

Podemos apontar outras considerações feitas por Newton a respeito da gravitação como a descoberta do achatamento da Terra em razão da velocidade angular que ela possui em torno de seu próprio eixo ($\mathcal{W} = 7,292 \times 10^{-3}$ rad/s). Devido ao seu achatamento ela se aproxima mais de um elipsoide de revolução. Esse achatamento foi determinado por Newton usando sua rotação, além da atração gravitacional de acordo com a latitude, segunda a equação: $g_{\lambda} = g_0 \cdot (1 + \square \cdot \text{sen}^2 \lambda)$, λ representa a latitude em graus (MAJORE, VITORINO e PEREIRA, 2007), g_0 representa a gravidade no equador ao nível do mar e $\square = 5,300 \times 10^{-3}$

é um coeficiente numérico usado considerando-se a rotação da Terra em torno do próprio eixo. Sem a rotação da Terra o coeficiente $\kappa = 3,388 \times 10^{-3}$ (RESNICK e HALLIDAY, 1970), essa diferença $5,300 \times 10^{-3} - 3,388 \times 10^{-3} = 1,92 \times 10^{-3}$ representa justamente a contribuição do achatamento da Terra.

Ainda no século XIX e início do século XX, a gravitação permanecia fora da síntese eletromagnética que parecia, em princípio, compreender o resto da física. Faraday (1791-1867), havia argumentado em seu artigo de 1852 que a gravitação parecia exibir pura ação à distância, mas em 1855 ele expressou sua convicção de que, se fosse esse o caso, violava o que chamava de princípio de ‘conservação da força’ ou ‘poder’ ou ainda força viva ($m.v^2$), o próprio Newton não aceitou a ação à distância como suficiente e, continua Faraday, “não posso deixar de acreditar que o tempo está próximo, quando seu pensamento sobre a gravidade produzirá frutos”. De acordo com a ação à distância, o Sol e a Terra não têm poder gravitacional quando totalmente removidos um do outro, mas esse poder surge repentinamente, instantaneamente quando estão em relação um ao outro. Mas Faraday considera: ‘Que um corpo sem força deva aumentar a força de um corpo a uma distância dele, é muito difícil de imaginar; mas é ainda mais difícil, se possível, aceitar a ideia quando consideramos que ela inclui a criação de força’. Existem apenas três possibilidades consistentes com a conservação da força:

1- Que ‘a força gravitacional do Sol, quando direcionada a Terra, deve ser removida em um grau equivalente de alguns outros corpos e, quando retirada da Terra (pelo desaparecimento deste último), deve ser descartada em outros corpos’, mas nada foi observado.

2- Que “deve assumir uma nova forma de poder quando deixar de ser gravitação e consumir outra forma de poder quando se desenvolver como gravitação”, mas o próprio Faraday tentou experiências com o objetivo de conectar eletricidade com corpos em movimento no campo gravitacional, com resultados totalmente negativos, e a ideia nunca foi sugerida por outros.

3- Que “deve sempre existir ao redor do Sol um espaço infinito”. Esta é a única possibilidade restante: este caso é a condição constante necessária para a ação no espaço, quando, respectivamente o Sol, a Terra não estão no lugar, e de uma certa ação gravitacional, o resultado dessa condição anterior, quando a Terra está no lugar, este resultado que prevê a condição quando a Terra está no lugar, posso conceber, consistentemente, como penso, com a conservação da força: e acho que é o caso que Newton olhou na teoria da gravidade; é, em

respeito filosófico, o mesmo que todos admitiram em relação à luz, ao calor e aos fenômenos radiantes; e ...é isso agora direcionado à nossa atenção de maneira especialmente forçada e instrutiva, pelos fenômenos da eletricidade e do magnetismo.

Este artigo intitulado ‘A Conservação da Força’ publicado no mesmo ano, Faraday tem um argumento quantitativo. Quando dois corpos se aproximam sob a força gravitacional mútua, essa força aumenta quatro vezes quando a distância é reduzida pela metade e o movimento dos corpos também é aumentado. De onde vem esse poder? É muito provável que ‘exista um poder de gravitação por si só, sem relação com outro poder natural, e não respectivamente para uma Lei de conservação de força’. Faraday não deixa claro sobre a distinção entre força e energia (ele fala, por exemplo, do desaparecimento da ‘força’ quando o gelo derrete), mas em algumas considerações adicionais colocadas neste artigo, um ano depois, ele parece estar respondendo à objeção de que a energia potencial é introduzida para equilibrar a diferença de energia no exemplo que cita. Mas a energia potencial é a energia de atração entre corpos que desaparece quando esse corpo desaparece, enquanto Faraday diz que pretende “força” significar, não "tendência de um corpo passar de um lugar para outro", mas a causa do poder gravitacional no espaço e, portanto, mera satisfação da equação da energia não é suficiente para ele. Porém, nenhuma evidência independente de tal causa foi encontrada; também não havia nenhum modelo satisfatório de atração gravitacional em termos de ação do éter, embora tenha havido muitas tentativas durante o século XIX de construir teorias *sic* da gravitação em termos de movimentos mecânicos do éter, alguns deles baseados na teoria de Georges Louis Le Sage de 1747, nessa engenhosa teoria de visão mecanicista da gravitação Le Sage presumiu que um número infinito de “partículas ultramundanas” de pequenez transcendental e enorme velocidade atravessava o espaço em todas as direções, em linha reta. Um corpo sozinho, situado bem longe de todas as outras formas de energia tangível permaneceria em repouso, pois seria igualmente afetada por essas partículas em todas as direções; mais tarde todo esse trabalho de Le Sage foi revisado e corrigido (JAMMER, AAAA, p. 240). Em 1864, Maxwell (1831-1879), diz que desistiu da tentativa de encontrar um modelo de gravitação semelhante ao do campo eletromagnético, porque onde há atração entre corpos semelhantes, a energia do campo (energia potencial) diminui à medida que a força gravitacional resultante aumenta e os corpos se aproximam com velocidade crescente. Assim, onde não há força gravitacional resultante, o meio deve possuir uma energia enorme e, assim se expressou Maxwell.

Como sou incapaz de entender de que maneira um meio pode possuir tais propriedades, não posso ir mais longe nessa busca pela causa da gravitação (HESSE, 1970).

[...]

Em seu último trabalho publicado, Hertz (1857-1894), sugeriu que ações mecânicas aparentes à distância, como a gravitação, fossem redutíveis aos movimentos de um meio que consistisse em ‘massas ocultas’ rigidamente conectadas, pois as ações elétricas haviam se mostrado redutíveis polarizações ocultas, mas ele foi incapaz de seguir a sugestão em detalhes. No Prefácio da edição em inglês das ondas elétricas de Hertz, Kelvin (1824-1907), expressa sua opinião de que: Absolutamente nada foi feito para a gravidade, seja por experimento ou observação para decidir entre Newton e John Bernoulli, quanto à questão de sua propagação através de um meio até o presente momento, não temos luz, mesmo que indique um caminho para a investigação nessa direção.

Não ficou nem claro se a gravidade foi propagada instantaneamente. Larmor, por exemplo, escrevendo em 1900, afirma que se sabe que sua velocidade de transmissão se é finita, transcende enormemente a da radiação. A influência dos cálculos de Laplace para esse efeito ainda era forte, mas, apesar deles, havia sugestões para conciliar uma velocidade de propagação da gravidade da ordem da (velocidade da luz) com fatos astronômicos. Laplace assumiu que, se a gravidade fosse propagada com velocidade finita, ela apresentaria efeitos variados como os da luz, mas, como o desenvolvimento de teorias de ação não instantânea entre cargas em movimento, era possível e mais plausível comparar a interação de massas gravitacionais com elas do que com fontes que emitem luz.

[...]

Leis de força como as de Weber e Riemann foram investigadas no caso da gravidade, e mostraram levar à proposição aproximada ao longo da linha, unindo as posições simultâneas de dois corpos em movimento, ou seja, com quase nenhum desvio considerado padrão, de modo que o sucesso de ‘A Suposição de Newton de propagação instantânea poderia ser olhada com uma aproximação adequada à hipótese da propagação com a velocidade da luz’. Em geral, porém, não havia razão teórica para buscar essas especulações até a Teoria da Relatividade apresentada por Einstein. No final do século XIX, o conceito acerca da gravitação não era melhor do que no século XVII, embora nesse meio tempo tivesse servido como modelo essencial para a demanda eletromagnética ter sido superada por ela. A lei de força de Ampère para cargas costumava a ser comparada à de Newton para massas e existe

uma semelhança de método e de brilhantismo de realização. Contudo, os trabalhos de Ampère e Maxwell se encontraram num intervalo de quarenta anos, enquanto mais de duzentos anos separaram os estudos de Einstein e Newton.

Newton tinha uma visão do Universo, no qual o espaço é imutável, com a geometria Euclidiana. No espaço Euclidiano a menor distância entre dois pontos é uma reta, a soma dos ângulos internos de um triângulo vale π e a circunferência de um círculo vale $2\pi r$, onde r é o raio da circunferência.

2.2 AS CRÍTICAS À IDEIA DE AÇÃO À DISTÂNCIA: “A DISCORDÂNCIA DE LEIBNIZ A AÇÃO À DISTÂNCIA PROPOSTA POR NEWTON”

Figura 16 – Gottfried Wilhelm Leibniz



LEIBNIZ (1646-1716)
(Quadro da Galeria
Uffizi, Florença)

Fonte: Encyclopædia Britannica (2022)

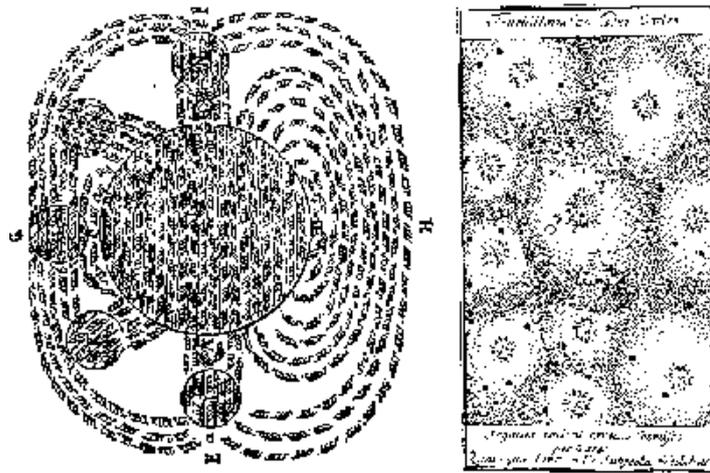
A teoria de Newton sobre gravitação foi de imediato, bem recebida na Inglaterra, onde inúmeros discípulos e admiradores a expuseram e a defenderam. No entanto, a situação na Europa continental foi muito diferente. Os cartesianos consideravam a noção de atração uma qualidade oculta, uma rendição ao Aristotelismo. Para Aristóteles existia uma física para o céu, mais perfeita, e uma física para a Terra. Galileu e Newton, principalmente, desmitificaram aquela ilusão aristotélica de que existia uma física para o céu e uma para Terra, Newton unificou a física do céu com a física da Terra, em sua formulação matemática da gravitação universal mostrou que havia um retrocesso às influências e simpatias imateriais aristotélicas, que foram banidas da Física.

Huygens um notável matemático foi incapaz de concordar com a nova teoria como ela estava proposta, Huygens em 1668, tentou explicar a Teoria da Gravitação através da teoria dos Vórtices de Descartes. Ele fez generosos reconhecimentos ao trabalho de Newton e aceitou sua prova de que os planetas são dotados de uma força centrípeta proporcional ao inverso do quadrado de sua distância ao Sol, força esta gerada pelo efeito da rotação da Terra,

isso tornou a teoria dos vórtices de Descartes insustentável, “para os cartesianos a ideia de ação à distância contida na teoria da gravitação, era inaceitável uma vez que Descartes só aceitava a ação por contato direto e não atrativas entre partes materiais”.

Abaixo um diagrama que representa os vórtices de Descartes. (Figura 17)

Figura 17 – Vórtices de Descartes



Fonte: USP (2003)

Todavia, Huygens continuou em busca de uma reformulação da teoria dos vórtices que se adequasse aos fatos demonstrados por Newton.

[...]

Como Descartes expôs o fenômeno da gravitação?

Agora, porém, desejo que considereis o que é gravidade desta Terra, ou seja, a força que une as partes dela e faz todas tenderem para o seu centro, conforme cada qual seja mais ou menos volumosa e sólida, o que nada mais é do que apenas isso: que as partes do pequeno espaço celeste que a cerca, girando muito mais depressa do que as partes dela em torno de seu centro, também tendem com muito mais força a se afastar dela e, por conseguinte, a empurrá-la de volta para lá (JAMMER, 2011, p. 139).

[...]

Em 1730, o matemático suíço John Bernoulli (1667 – 1748) que ganhara um prêmio da *Academie des Sciences* por um trabalho no qual ele deduziu a terceira lei de Kepler partindo de uma hipótese cartesiana de vórtices e quatro anos depois, ele concluiria que em sua teoria, a lei da atração deveria depender do inverso do cubo e não do inverso do quadrado. Mais tarde, Euler também se recusava a aceitar que o inverso do quadrado fosse uma propriedade universal dos corpos, embora admitisse isso empiricamente como descrição do movimento dos planetas.

Leibniz, que mantinha a ideia de uma teoria da gravitação semelhante à de Huygens, também foi um crítico ferrenho a teoria da gravitação de Newton. Embora não fosse um Cartesiano, pois seus estudos em dinâmica o levaram a criticar a identificação da matéria com extensão, Leibniz manteve princípios Cartesianos em seu repúdio à ação à distância. Podemos dizer que ele foi um dos grandes filósofos do século XVIII a contestar seriamente as bases teóricas da nova ciência, em bases puramente metafísicas. Pois a maioria dos seus argumentos em física dependia, não de fatos empíricos, mas da convicção de que a explicação teórica dos fatos deve estar de acordo com certos princípios que, para ele, eram auto evidentes, especialmente os princípios da razão suficiente e da continuidade. De acordo com o princípio da razão suficiente, nada ocorre no mundo a menos que haja razão suficiente para que aquele evento específico ocorra em vez de outro [evento]; até mesmo Deus está sujeito a este princípio em seus atos de criação: sua mera vontade para criar não é o bastante, deve haver uma razão suficiente para que Ele crie uma coisa ao invés de outra. E de acordo com o princípio da continuidade, todas as substâncias criadas formam séries nas quais, cada possível gradação quantitativas e qualitativas são realizadas uma e apenas uma vez. Leibniz mantinha que estes princípios permitem que se distinga a priori entre fatos contingentes e os fatos logicamente possíveis, ou seja, [permite] decidir quais dentre as muitas situações logicamente auto consistentes, são, realmente, realizadas no mundo.

O uso por Leibniz desses princípios o levou a pôr sentido em algumas inconsistências importantes nas teorias mecânicas correntes do atomismo e do Cartesianismo. Contra o atomismo, ele argumenta que as verdadeiras unidades de matéria não podem ser átomos rígidos, extensos e indivisíveis, uma vez que isso envolveria uma quebra da continuidade na natureza e não haveria razão suficiente para que o processo de subdivisão terminasse em um ponto ao invés de em qualquer outro [ponto]. Os átomos seriam indistinguíveis entre si e isso implicaria que Deus não teve razão suficiente para tê-los originalmente criado em determinada ordem ao invés de em outra. Outros argumentos estavam mais apoiados em considerações puramente físicas. Leibniz, rejeitando as forças de atração, pensa que a coesão entre átomos exigiria um milagre perpétuo. De novo, se todas as substâncias são feitas de átomos extensos, no que consiste a substância dos próprios átomos? Outro argumento vem da teoria do impacto elástico, que fora explicada por Huygens e outros: Supõe-se que átomos são corpos perfeitamente rígidos, mas em colisão entre corpos perfeitamente rígidos, todo movimento é perdido, de modo que a colisão de corpos que são, em última instância, supostos serem feitos de átomos, jamais poderia ser elástica. Se, por outro lado, os átomos fossem

supostos perfeitamente elásticos, seriam deformáveis e, portanto, não seriam atômicos de fato. O leitor moderno é tentado a responder a esses argumentos do seguinte modo: ao opor-se as noções de substância do átomo e de sua elasticidade, Leibniz está exigindo muito. Do ponto de vista científico, não há razão pela qual os átomos não poderiam ser em última instância e inexplicavelmente substanciais ou elásticos, se eles provêm, com isso, modelos úteis para interações físicas. Mas deve ser lembrado que Leibniz não pode aceitar estes argumentos, pois este compromisso com a crença, isto é, que a racionalidade, que é, inteligibilidade em detalhe para a mente humana, é parte da essência das coisas, e requer portanto, que as descrições da estrutura última da matéria devam ser compreendidas literal e não metaforicamente, embora, como veremos, ele estivesse preparado para admitir descrições por propósitos práticos,

[...]

Leibniz usa o princípio de continuidade para mostrar que deve haver continuidade da causa e efeito no espaço e no tempo. Então, sua polêmica contra atração em suas cartas para Clarke e muitas alegações explícitas de que ação envolve contato: um corpo nunca é movido naturalmente, exceto por outro corpo que o toca e o empurra; depois disto ele continua a se mover até que seja impedido por outro corpo que o toca. Qualquer outro tipo de operação, entre os corpos é milagrosa ou imaginária.

Como sustentamos que a atração só pode acontecer de uma forma explicável, isto é, por um impulso de corpos mais sutis, não podemos admitir que a atração seja uma qualidade primitiva essencial à matéria.

Contudo, Leibniz não vislumbra contato em última instância entre átomos rígidos extensos, já que rejeitara átomos desse tipo pelas razões mencionadas anteriormente. É que toda colisão é elástica, não importa o quanto foi analisada em termo de pequenas partes dos corpos, com a colisão de dois balões inflados.

2.2.1 Os argumentos de Bosovich e Leibniz sobre a ação à distância

A vaga e não satisfatória natureza dos argumentos de Leibniz do princípio de continuidade para ação por contato é indicada pelo uso do mesmo princípio por Bosovich (1711 – 1787) para chegar à conclusão oposta. Em seu livro, *Theoria Philosophiae Naturalis*, de 1758, Bosovich deriva seu princípio metafísico a partir de Leibniz, mas os integra com a física Newtoniana. Ele sugere que a matéria consiste em pontos idênticos sem extensão, sem ter propriedades essenciais, exceto inércia e a capacidade de exercer forças um sobre o outro

de magnitudes que dependem de suas distâncias mútuas. Esses centros de força pontuais são versões espaciais das mônadas⁹ de Leibniz e Boscovich alega que Leibniz, assim como Newton, requer cada partícula conectada com a outra à distância. Como vimos, entretanto, isto não pode ser compreendido nos termos físicos de Leibniz.

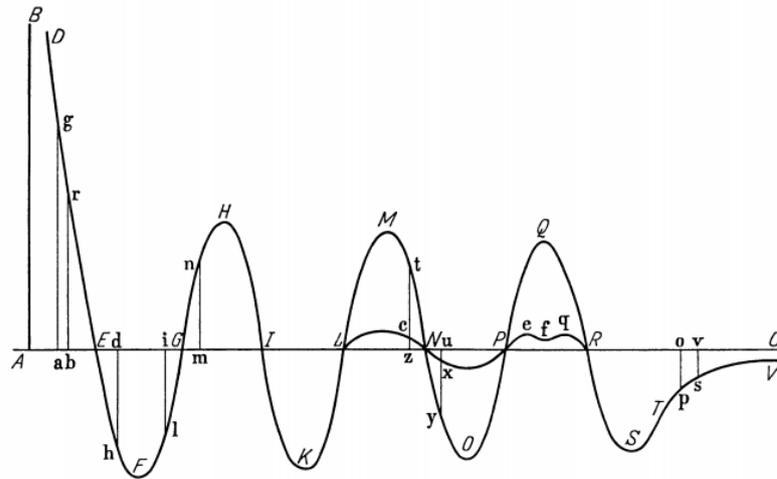
Boscovich recorre a uma lei de Leibniz de continuidade para mostrar que mesmo o impacto de corpos deve, em última instância, envolver forças à distância. Ele concorda com Leibniz que, se as partículas últimas da matéria são finitas, haveria uma alteração descontínua de densidade em suas fronteiras e que se elas estivessem contato total, suas velocidades mudariam descontinuamente e uma força infinita seria necessária. Mas ao invés de invocar uma regressão infinita de partes elásticas, ele conclui que os elementos primários da matéria devem ser pontos simples. A força exercida entre duas partículas pontuais é uma função contínua da distância entre elas atendendo, a repulsão infinita a distâncias muito curtas, atuando alternativamente, repulsiva e atrativa na medida em que a distância aumenta e atendendo, a um momento a uma lei de atração do inverso do quadrado a distâncias comparáveis ao tamanho de corpos ordinários. Dessa forma, Boscovich tenta resumir sob uma função força contínua a atração gravitacional a distâncias finitas, as forças repulsivas que produzem deflexão que são ordinariamente chamadas de impactos, a coesão e estabilidade dos agregados de massas pontuais, que estão em equilíbrio mútuo, e as forças repulsivas e atrativas da eletricidade e do magnetismo, alegando que a teoria unifica os três princípios de Newton de gravidade, coesão e fermentação.

O conceito de força de Boscovich¹⁰ é um desenvolvimento, em termos físicos, do conceito matemático que vimos em Newton, pois ele alega assim como Newton ‘força’ não denota nenhum particular modo de ação, nem qualquer qualidade misteriosa, mas apenas a tendência das massas de se aproximarem e se afastarem: Como apresentamos no gráfico abaixo (Figura 18).

⁹Substância simples e indivisível no sistema de Leibniz.

¹⁰ Gráfico da concepção de força de Roger Boscovich.

Figura 18 – A lei da força entre partículas de Boscovich



Fonte: Spencer (1967)

Os vários movimentos que surgem das forças desse tipo, tal quando um corpo colide com outro corpo, quando uma parte de um sólido é presa e outra parte segue, quando partículas de gases e molas repelem uma a outra, quando corpos pesados descem, estes movimentos, digo, são de ocorrência diária diante de nossos olhos... Em todos eles não há nada misterioso; ao contrário, todos tendem a tornar a lei de forças deste tipo perfeitamente simples (BOSCOVICH, 1962, p. 95).¹¹

Boscovich apresentou a lei fundamental na forma de uma curva contínua, em que a força entre dois elementos primários de matéria é representada graficamente. Um dos elementos de matéria foi fixado na posição “A”, enquanto o outro foi considerado em qualquer outra posição sobre o eixo AC. A magnitude da força mútua experimentada pelos dois elementos foi dada pela ordenada da curva na posição determinada.

O sentido da força foi definido pelo sinal, de modo que as porções situadas na curva acima do eixo representam as forças de repulsão, enquanto as que estão abaixo do eixo denotam a atração entre os dois elementos de matéria. Assim, se o segundo elemento de matéria fosse localizado em “d”, haveria uma força atrativa entre ele e o primeiro elemento em “A”, que será dado pelo comprimento “d-h”. Da mesma forma o segundo elemento no ponto “m” iria sofrer uma força de repulsão de “m-n” (SPENCER, 1967). Boscovich considerou que apenas os segmentos extremos da curva, ou seja, “DgrE” e “TpsV”, eram conhecidos com alguma certeza. O último arco correspondia à lei do inverso do quadrado e, portanto, a região coberta por este segmento se estendia por todas as distâncias sensíveis.

¹¹ Russell suggests (Philosophy of Leibniz, p. 91) that Boscovich has here a more logical development of the monadology than Leibniz himself.

Boscovich não pretendia examinar a natureza última seja da força, seja da inércia e considera que provavelmente, essas possam ser descobertas, mas alega que a mera ideia da mudança de movimento não torna o filósofo compromissado com ação à distância, embora esse método de explicar fenômenos... Ser fortemente recomendado e já que se trata de mudança de movimento ser tão mecânica quanto à explicação pelo impulso. Em última análise, para Boscovich “força” era uma determinação, uma propensão à aproximação ou ao afastamento, e era medida pela aceleração produzida. Em nenhuma parte de seus escritos ele tentou explicar as causas dessas determinações; só postulou sua existência. Assim em termos escritos, as ordenadas na curva de forças só representam acelerações. Que esta é uma interpretação válida evidencia-se pela observação de Boscovich de que “a área de uma curva cujas abscissas representam distâncias e cujas ordenadas representam forças expressa o aumento ou a diminuição do quadrado da velocidade”. Na matemática moderna, isso significa: $\text{Área} = \int a \, dx = \int dv/dt = \int v \, dv = V_2^2 - V_1^2$

[...]

Hume em seu *Tratado da Natureza Humana* (1739) assume não totalmente a existência da atração gravitacional e a utiliza para discutir, por analogia, coesão e atração entre as ideias simples de nossas mentes, cuja conexão em ideias complexas experimentamos, porém não compreendemos:

Aqui há um tipo de atração que se achará ter no mundo mental efeitos tão extraordinários como no natural, e se mostrará em muitas e variadas formas. Seus efeitos todos serão todos os lugares; mas que não suas causas, são completamente desconhecidas. Nada é mais notável para um verdadeiro filósofo do que restringir o seu desejo descontrolado de buscar as causas (HESSE, 1970, p. 168).

Hume considera gravidade como uma propriedade indubitável da matéria, e concorda com Locke que não é possível ir além da sequência de impressões sensoriais para ter conhecimento das causas últimas. O problema da causalidade, com o qual Hume se debatia, era o problema de descobrir razões para nossa crença em conexões necessárias entre causa e efeito e esse problema surge tanto da experiência de ver uma bola de sinuca mover uma à outra, como de qualquer outra sequência de eventos da física ou psíquica, incluindo interações gravitacionais. Mas Hume comenta que, geralmente, precisamos perceber contiguidade no tempo e lugar entre dois eventos antes de alegarmos uma relação causal: “Embora objetos distantes possam, às vezes, parecer que produzem um ao outro, comumente, acha-se, após exame, que são unidos por uma cadeia de causas, que são contíguas entre si e ao objeto distante; e quando em uma instância particular não podemos descobrir a conexão, presumimos

que exista. Mas, como todas as generalizações, de acordo com Hume, isso não pode ser fundamentado senão em hábito”.

2.3 AS ATRAÇÕES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS E A TENTATIVA DE ASSOCIÁ-LAS A AÇÃO À DISTÂNCIA

Resta ainda descrever brevemente as aplicações que foram feitas com cada vez mais frequência, durante o século XVIII, dos conceitos de atração e repulsão em todos os ramos da Física e na ainda imatura ciência química.

O ‘fenômeno’ de coesão, capilaridade, e de atração elétrica e magnética foram considerados os mais impossíveis de tratar do ponto de vista do mecanismo do século XVII. Experimentos mostraram que a subida dos líquidos nos tubos capilares não resultava de diferença de pressão do ar, como era sugerido, portanto redutível à ação por impacto e logo foi sugerido de que a [subida] não era devido à atração mútua das partículas. A mesma sugestão era vista como explicação da coesão e da elasticidade embora, nesse estágio, houvesse pouca razão para associar forças atrativas com atração elétrica.

A elasticidade dos gases recebeu duas explicações, ambas consistentes com a lei de Boyle, mas conceitualmente muito diferentes uma da outra. A primeira foi provada por Newton pela qual se partículas de um gás se repelem mutuamente com forças inversamente proporcionais à primeira potência de sua distância, o gás se comportará de acordo com a lei de Boyle, a segunda foi provada por Daniel Bernoulli (1738) que o mesmo comportamento resulta de uma coleção de pequenas partículas elásticas em movimento aleatório, em que os efeitos das colisões mútuas, os quais são raros, são insignificantes e a pressão do gás é interpretada em termos de colisões das partículas com as paredes do recipiente. Essas explicações alternativas utilizam, assim, dois tipos de forças: repulsões à distância e impactos. Mas, no segundo caso, o problema da elasticidade pode ter sido meramente postergado, transferindo a elasticidade do gás como um todo às partículas que o constituem e essa explicação parece ter tido pouca influência até ter sido revivida como o fundamento da teoria estatística de gases no século XIX. Durante o século XVIII, uma vez que forças a distâncias foram aceitas, parecia mais satisfatório e econômico pensar nas forças fundamentais dessa forma, pois o impacto pode ser reduzido a forças à distância, enquanto a gravitação, o magnetismo e a coesão não podem ser reduzidos a impacto elástico.

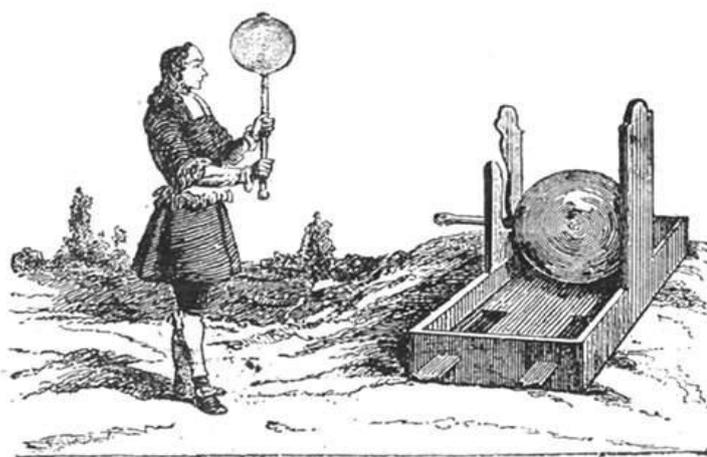
[...]

Então se tornou comum descrever fenômenos físicos em termos de matéria grossa e fluidos sutis, cujas partículas exercem atrações e repulsões. Esses fluidos são descendentes diretos dos vapores e emanações do início do século XVII, despidos de propriedades quase animistas, exceto os poderes atrativos e repulsivos, aos quais se poderiam dar descrição matemática exata. Em um livro com um título revelador, senão em palavras, chamado *Anattempt to demonstrate that all the phnenomena in nature may be explained by two simple active principles, attraction and repulsion: where in the attractions of cohesion, gravity and magnetism are shown to be one and the same; and the phenomena of the latter are more particularly explained*, Gowin Knight adota uma forma matemática moldada de acordo com *Principia* e seu raciocínio físico não mostra evidência alguma do animismo do qual Leibniz suspeitou ao ler sobre os ‘princípios ativos’ de Newton, mas tem na verdade uma afinidade notada com alguns métodos qualitativos da física de partículas de data muito mais recente.

[...]

Entretanto, teorias abrangentes eram prematuras e o progresso, durante esse período deu-se mais pela paciente ação e interpretação fragmentada de acumular resultados experimentais. Isso foi particularmente verdadeiro no caso da eletricidade. Conhecimento dos fatos mais elementares da eletricidade era escasso, durante o século XVII e é digno de nota que mesmo os experimentos clássicos do globo de Guericke (Figura 19), com um globo de enxofre, não foram feitos, para descobrir propriedades de eletricidade.

Figura 19 – Experimentos clássicos do globo de Guericke



Fonte: Benoiteb (2016)

[...]

Mas para mostrar que o globo friccionado tinha, entre outras virtudes, a de atrair corpos para si, e é, portanto, uma ilustração do mesmo poder pertinente a Terra; uma das

poucas ocasiões em que a gravitação foi comparada com efeitos verdadeiramente elétricos, ao invés de magnéticos.

Durante o século XVIII, entretanto, interesse em eletricidade por si era amplamente espalhado e um acúmulo de resultados experimentais seguiu-se à invenção de máquinas elétricas e da Jarra de Leyden (Figura 20). A invenção precedeu os capacitores usados em circuitos elétricos de hoje.

Figura 20 – Jarra de Leyden



Fonte: UFPA (2015)

Na Figura 20 é apresentada um dispositivo capaz de acumular carga elétrica por meio do processo de indução. Construída pelo cientista holandês Pieter Van Musschenbroek em 1745.

Havia duas teorias quanto à natureza da eletricidade assim produzida. Franklin sugeriu que existisse um único fluido elétrico (que atualmente conhecemos como carga elétrica), cujas partes seriam mutuamente repulsivas, ou seja, que o fluido fosse elástico e suas partes fossem atraídas por matéria comum ‘como uma esponja absorve água’. Ele introduziu os termos ‘positivo’ e ‘negativo’ para descrever o excesso ou a deficiência de fluido elétrico nos corpos eletrificados.

A teoria explicava a repulsão de dois corpos positivamente carregados, pois seu excesso de fluido é mutuamente repulsivo e a atração entre dois corpos, quando um é negativamente e o outro é positivamente carregado, mas não explicava a repulsão entre dois corpos negativamente carregados, porque, nesse caso, segue-se que a única força entre eles, é a gravitação da sua matéria comum. Aepinus e Cavendish sugeriram que a força entre partículas de matéria (presumivelmente a certas distâncias somente) é, na verdade, repulsiva; mas uma teoria mais satisfatória para explicar esse efeito foi a dos dois fluidos elétricos, cada

partícula dos quais repele partículas de espécie semelhante e atraem aquelas de espécie diferente.

O magnetismo era geralmente atribuído a um fluido que se pensava ser, como Franklin colocou ‘em muitos aspectos análogos ao fluido elétrico’. Havia teorias de um ou mais fluidos para o magnetismo bem como para eletricidade. Nas mãos de Coulomb e Poisson a teoria de dois fluidos começou a se aproximar da visão moderna da natureza de substâncias magnéticas, pois se assumia que partículas de cada tipo de magnetismo eram associadas em pares, de forma que as menores partes da substância são elas mesmas, pequenos ímãs, e então a magnetização de um corpo como um todo consiste na orientação dos pequenos ímãs na mesma direção. Coulomb (1736-1806), em 1785, descreveu na terminologia das teorias dos fluidos os experimentos de torção, através dos quais ele mostrou que forças de atração e repulsão de eletricidade e magnetismo são ambas proporcionais ao inverso do quadrado da distância entre os centros de força.

[...]

As teorias do calor adicionaram-se ao número rapidamente crescente de fluidos elásticos exigidos pela física durante o século XVII o calor foi explicado, muito frequentemente, em termos de vibrações de partes pequenas da matéria ou do éter.

[...]

A tendência de substituir vibrações pela matéria do éter como explicação do calor foi encorajada pela inclusão tradicional do fogo como um dos elementos e pela versão contemporânea da teoria antiga dos elementos, especificamente o flogístico da teoria de Becher e Stahl. Aqui, os quatro elementos tradicionais foram substituídos por três, dos quais um deles é o elemento flogístico ‘de combustão’, que se supunha ser liberado de metais, na ignição. A teoria do flogístico foi capaz de fornecer explicações satisfatórias para muitas reações químicas e foi amplamente aceita até o fim do século XVIII, mas havia fenômenos que eram mais bem explicados pela teoria rival do fluido de calor ou ‘calórico’. Por exemplo, uma dificuldade da teoria do flogístico para a combustão de metais era o fato de que o metal oxidado resultante pesava mais que o metal original, então se o óxido foi produzido pela liberação de flogisto, este deveria ter um peso negativo, e o ganho num peso seria simplesmente o peso do calórico adicional. Muitas experiências foram realizadas para confirmar que o calórico tinha peso, porém a maior parte teve resultado negativo.

[...]

A ideia de ‘atmosferas de calor’ consistindo em partículas repulsivas de calórico cercado as partículas de matéria foi desenvolvida para explicar as propriedades dos gases e combinações químicas. Brian Higgins postulou que átomos de materiais esféricos duros atraem uns aos outros inversamente com uma potência da distância e um fogo infiltrante ou calórico, que exerce forças repulsivas. Vários tipos de combinação química foram então atribuídos ao equilíbrio estabelecido entre essas forças. Higgins pôde, desse modo, explicar a combinação de substâncias em proporções definidas. A teoria de Dalton de gases mistos também utilizou a ideia de que suas elasticidades eram devidas a atmosfera de calórico ao redor de cada partícula do gás. Em seu *Researches into the laws of Chemical Affinity* (1801), Berthollet lista entre as forças que afetam a combinação química: Coesão, gravidade, elasticidade da própria substância ou do calórico; mas ele pensa que todas são, provavelmente, originalmente gravitacionais, e atribui as diferenças entre as atrações astronômica e química às diferentes distâncias nas quais agem.

A gravitação é exercida a distâncias em que as formas particulares e as disposições das moléculas não têm efeito, enquanto a afinidade química depende, em grande parte das condições locais. As forças de afinidade química podem, portanto, ser descobertas só por observação, mas Berthollet acha ser provável que, quanto mais geral a teoria da afinidade se tornar, mais analogia ele terá com os mecanismos da gravitação.

A teoria do fluido de calor começou a perder plausibilidade como resultado de experimentos de Rumford sobre o calor produzido por fricção, ao final do século XVIII. A aparentemente inesgotável quantidade de calor assim gerada o levou a crer que não seria possível ser uma substância material e ele diz que ele não pode

formar qualquer ideia distinta de qualquer coisa capaz de ser excitada e comunicado na forma em que calor é excitado e comunicado nesses experimentos, exceto se for movimento (HESSE, 1970, p. 186).

Lavoisier parece ter pensado que o calórico não precisaria ser assumido como uma substância real, mas, apenas, ‘como um tipo de causa repulsiva que mantém as moléculas da matéria separadas, cujos efeitos podem ser considerados matematicamente. Mas a teoria do fluido teve seus adeptos em pleno século XIX e eles incluíam Carnot, cujo trabalho se tornou mais tarde, a base da ciência da termodinâmica. Fourier, em seu *Théorie Analytique de La Chaleur* (1822), aponta que a hipótese de que a razão de fluxo de calor, não importa como produzida, ser proporcional à diferença de temperatura, seja suficiente para fundamentar a teoria de calor, independentemente de qualquer hipótese sobre sua causa:

De qualquer forma que nos agrada imaginar, a natureza desse elemento, quer se considere uma coisa material distinta que passa de uma parte do espaço para outra, quer que o calor simplesmente consista na transferência de movimento, chegaremos sempre às mesmas equações (HESSE, 1970, p. 187).

A teoria dinâmica não suplantou por inteiro a teoria do calórico até que um equivalente de energia mecânica e térmica fosse estabelecido, em meados do século XIX, por Clausius, Helmholtz e Kelvin. A hipótese de repulsão à distância, no caso de partículas de um gás, então se tornou desnecessária e foi substituída pela hipótese de Bernoulli, de impactos aleatórios. Forças à distância eram, no entanto, necessárias, ainda, para explicar desvios da lei de Boyle (equação de Van der Waal) e no caso da energia térmica dos líquidos e sólidos, pois isso era interpretado como energia do movimento aleatório de suas moléculas em oscilações em torno de posições de equilíbrio sob suas forças de atração mútua.

Durante a segunda metade do século XVIII, todas essas teorias químicas e físicas precisaram de grande número de tipos de fluidos elásticos. Às vezes, éter, flogisto, fogo, luz e os fluidos elásticos; às vezes são identificados como distintos. Todos tinham em comum serem sutis, altamente elásticos e geralmente imponderáveis. A maior parte dessas teorias não deixou vestígio no progresso subsequente da ciência, pois pertenceu a um período quando as propriedades químicas da matéria eram pouco entendidas, antes da mudança de alternância das formas de energia ter sido descoberta antes que as teorias matemáticas do calor, da eletricidade, do magnetismo e a radiação tivessem sido desenvolvidas. No entanto o fato de que eles pudessem ter sido sugeridos indica quão radical clima de pensamento mudou com respeito a atrações e repulsões, desde o século XVII. Tais forças eram, agora, modelos inteligíveis, não exigindo serem introduzidos sob a proteção de um positivismo matemático como o de Principia ou Cotes ou Berkeley, de fato a influência do positivismo é encontrada na tendência de abandonar fluidos elásticos e outros modelos de partículas e substituí-los por uma teoria matemática abstrata, como a teoria do calor de Fourier e nas teorias de elasticidade de Stokes e Green.

Já no século XVIII havia sinais de que a ideia de ação exercida sobre distâncias muito grandes não era mais aceitável com antes, pois o éter ainda era frequentemente pensado como um intermediário, no caso da gravitação, entre corpos distantes.

[...]

A física dos fluidos elásticos imponderáveis foi largamente qualitativa, e seu desaparecimento foi acelerado pelo aspecto cada vez mais matemático das teorias, a partir do começo do século XIX.

2.3.1 A Lei de Jean Baptista Biot e Felix Savart: Em busca de uma lei newtoniana para a eletrodinâmica

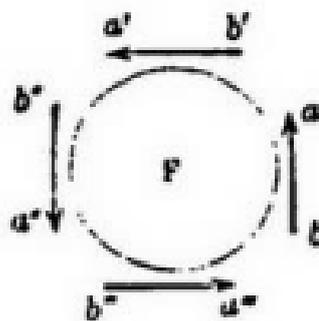
Ampère e Biot foram juntos em busca de uma lei matemática que descrevesse os efeitos magnéticos da corrente elétrica, Ampère era um matemático e se dedicou na procura de uma equação eletrodinâmica, isto logo após de Oersted fazer o seu experimento sobre indução eletromagnética em 1820, mostrando que uma corrente elétrica percorrendo um fio condutor cria em torno do mesmo um campo magnético, isto ficou comprovado pela deflexão de uma agulha imantada de uma bússola, comprovando assim que corrente elétrica em movimento cria um campo e magnético.

Biot havia trabalhado com Coulomb, e admirador de Newton produziu um importante “Tratado sobre a Física Experimental e Matemática”, a unificação da força magnética exercida por um fio condutor e um polo magnético de um ímã a uma distância (r).

2.3.1.1 A lei de Biot-Savart

Segundo Biot um fio condutor cortado transversalmente, uma fina seção reta se transformaria em agulhas magnéticas (Figura 21).

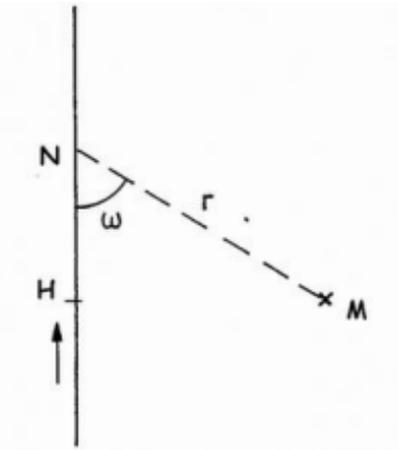
Figura 21 – Hipótese de ímãs na área de seção de um fio F condutor (Biot)



Fonte: Biot

Medidas foram realizadas por Biot e Savart em um fio condutor longo na vertical e a ação desse condutor em uma partícula magnética M de um ímã.

Figura 22 – Força exercida pelo condutor



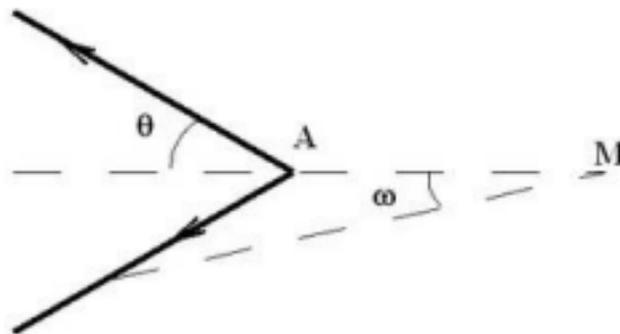
Fonte: Biot

De acordo com a lei de Biot (1820), a força exercida pelo condutor é proporcional ao $\sin \omega/r^2$, r é a distância entre os pontos M e N, (Figura 22).

O resultado experimental veio em 30 de outubro, a força exercida por um fio condutor é inversamente proporcional à distância MH do polo ao fio. Laplace alerta Biot que a força exercida por um elemento infinitesimal de um fio a uma distância (r) do polo, é $F\alpha 1/r^2$, mas a força exercida pelo pedaço situado em N ainda depende do ângulo ω , e isto ainda não foi determinado.

Um outro experimento de Biot foi com fio quebrado, como mostra a figura (Figura 23) abaixo.

Figura 23 – Força exercida pelo condutor com fio quebrado



Fonte: Biot

Na Figura 23 a ação de um fio condutor quebrado em uma partícula magnética M. a força elementar é proporcional ao $\sin \omega/r^2$, mas a integração ao longo de todo o fio quebrado não pode ser $\sin \omega/r^2$, e sim a força ser proporcional a $\tan(\theta/2)$ e não a θ , vê-se que $\sin \omega/r^2$ é uma indução, logo não surgiu do experimento.

A notação moderna da lei Biot-Savart pode ser escrita de duas formas: $dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i \frac{ds}{r^3} \cdot r$

O fator sem ω/r^2 é dividido entre Biot e Laplace e o fator $(i \cdot ds)$ no pedaço magnetizado de Biot é o ganho do elemento infinitesimal da corrente Ampère.

Nesse sentido a força elementar está de acordo com Newton e Coulomb $1/r^2$, embora não se encaixe no princípio da ação-reação, pois não atua ao longo de uma linha reta.

A ação de uma corrente elétrica em um ímã seria reduzida a interações magnéticas puras, Biot afirma que é possível projetar um conjunto de minúsculas agulhas magnéticas na periferia de um fio condutor, do qual se pode deduzir sua lei experimental, mas Biot reconhece as dificuldades.

2.3.1.2 A “Apresentação” de Ampère

Enquanto Biot busca reduzir a ação do fio condutor em um ímã às interações magnéticas, ao contrário, cabe a Ampère reduzi-las a interações entre correntes elétricas. A quantidade de corrente que ele considera não é a fatia infinitesimal delgada imaginada por Biot, mas um elemento de comprimento infinitesimal (ds). A força entre duas correntes finitas pode, pelo menos teoricamente, ser deduzida por duas integrações sucessivas da força elementar entre dois elementos de corrente (ds) e (ds'). Para a ação entre um ímã e uma corrente será necessário uma triplo integração, cada fatia do ímã realmente contendo, segundo Ampère, uma infinidade de correntes elétricas circulares coaxiais.

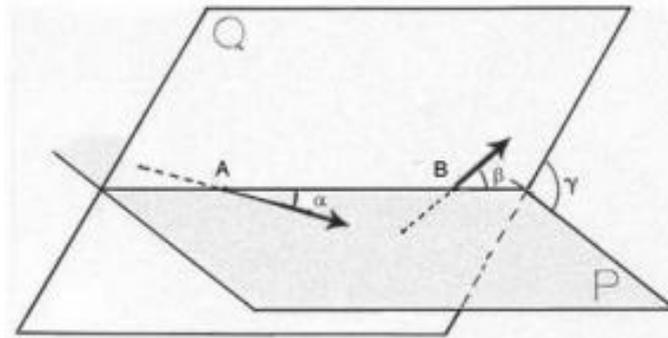
Contudo, se pudermos passar pela integração da força elementar à força total, o inverso é impossível. Biot encontrou esse problema e determinou seu fator angular por intuição e não experimentalmente. Como então determinar a força entre dois elementos de corrente? Ampère adota então uma estratégia muito original. Ele propõe a partir da força de interação mais geral possível e específica sua expressão por meio de experimentos qualitativos em círculos finitos. Como um bom newtoniano, Ampère postula que essa força elementar deva respeitar o princípio da ação e reação (3ª lei de Newton), e, por isso, ser dirigida ao longo de uma linha reta que una os dois elementos de corrente elétrica. Hoje as forças entre circuitos finitos obedecem a este princípio. Nesse sentido manteremos, em linhas gerais, sob risco de dar uma visão muito incompleta do alcance de uma obra várias vezes interrompida e retomada ao longo de vários anos.

Uma hipótese simples de Ampère: considere dois elementos de corrente A e B. Seus comprimentos são considerados infinitamente pequenos em comparação com a distância AB.

É provável que a força entre esses dois elementos dependa apenas da distância $r=AB$, mas também dos três ângulos α , β , γ que definem suas posições relativas ao espaço.

1ª hipótese de Ampère (Figura 24), é que a força elementar decresce na “razão $1/r^2$ de acordo com se observa para todos os tipos de ação mais ou menos análogos a este”. Como Biot, ele ainda precisa determinar a variação com os ângulos.

Figura 24 – Primeira hipótese de Ampère



Fonte: Ampère

Vários experimentos lhe sugeriram a ideia do que hoje chamaríamos de adição vetorial dos elementos de corrente, ou seja, a possibilidade de substituir um elemento da corrente por suas projeções em três eixos. Um dos experimentos que justifica essa propriedade é mostrar que o fio “sinuoso” e o fio reto (Figura 25), exercem forças iguais em um circuito móvel ou em uma bússola.

Em seguida, basta decompor cada elemento de corrente ao longo de três eixos ortogonais e considerar as forças exercidas entre essas componentes tomadas de dois em dois.

Figura 25 – Um fio reto e um sinuoso



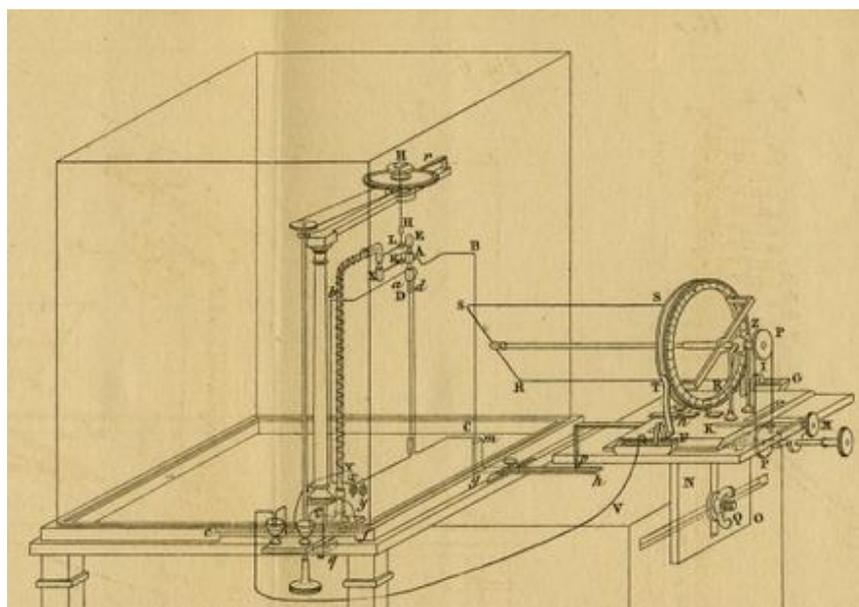
Fonte: Ampère

Sendo percorridos por correntes em sentidos opostos eles exercem a uma distância suficientemente grande na frente às sinuosidades, ações que se compensam.

A experiência lhe mostrou que dois fios paralelos percorridos por correntes de mesmo sentido se atraem e se repelem quando percorridos por correntes de sentidos opostos. Ampère admite que é o mesmo para elementos infinitamente pequenos. Além disso, ele é levado a supor que a força entre dois elementos é zero se um deles estiver localizado no plano perpendicular ao segundo em seu meio. Em seguida Ampère expressa a força elementar proporcional a: $gh(\text{sen}\alpha.\text{sen}\beta.\text{cos}\gamma+k\text{cos}\alpha.\text{cos}\beta)/r^2$, onde gh dependem da quantidade de eletricidade que passa em intervalos de tempos iguais, o que constitui o primeiro passo a uma definição de intensidade de corrente elétrica. O primeiro termo da equação corresponde à força entre os componentes e o segundo à força entre os componentes colineares. Em 1820 Ampère, mesmo hesitante, que a força entre dois elementos colineares é zero, ou seja, $k=0$ se expressa da seguinte forma: “Foi sobre essas considerações gerais que construí uma expressão da atração de duas correntes muito pequenas, que na verdade eram apenas uma hipótese, mas a mais simples que se poderia adotar, e por isso tínhamos que tentar primeiro”.

Em setembro de 1820, Ampère escreve em um manuscrito, propondo primeira fórmula. Seria necessário, após deduzir a ação entre correntes finitas pelo cálculo, comparar os resultados desses cálculos com as medições. Ampère descreve dispositivos complexos mostrados nessa figura.

Figura 26 – Aparelho de medição da força entre o condutor móvel (vertical) BC e o condutor fixo RS, com inclinação ajustável



Fonte: Ampère

Ele os usou? Nenhum resultado numérico foi encontrado em seus rascunhos. Essa engenhosidade de Ampère (Figura 26), de projetar novos dispositivos, combinada com quase total ausência de medições, é uma característica da prática de Ampère.

Nessa primeira fase de suas pesquisas, os experimentos qualitativos tinham forte influência na reflexão teórica.

Ampère encontra a primeira fórmula que confirma o resultado experimental de Biot, uma força para um fio infinito $1/r$, agindo num polo magnético (Figura 23). Para isso, ele compara uma barra magnética a um conjunto de correntes em planos perpendiculares ao eixo do magneto.

A hipótese de Ampère leva, portanto, a resultados consistentes com experiência e, além disso tem o mérito de evitar a “suposição, sem razão aparente” da magnetização do fio condutor. Para Biot e seus apoiadores, ao contrário, são as correntes dentro dos ímãs que representam uma intuição!

A teoria de Ampère está longe de ser unânime, tendo havido muita dificuldade de outros físicos em repetir seus experimentos radicalmente novos. Havia ceticismo em relação a hipótese da existência de correntes elétricas no interior dos ímãs.

Na Inglaterra Faraday elogiou as experiências de Ampère e a criatividade de sua teoria, mesmo assim duvidou da realidade de correntes das quais a experiência não poderia fornecer uma prova concreta.

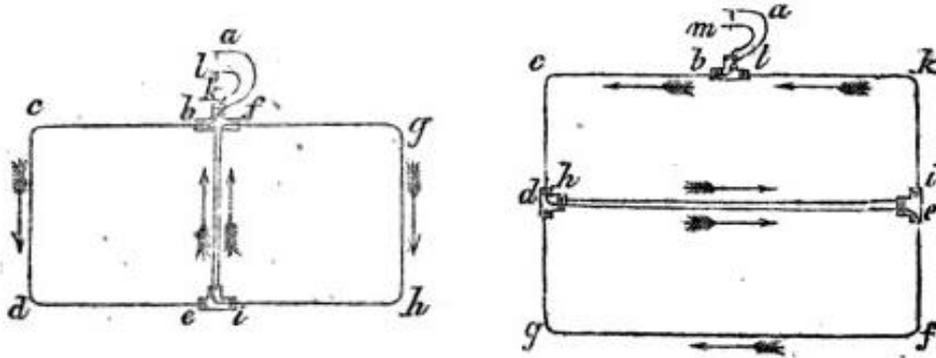
Em 1821 Faraday revive a pesquisa de Ampère. Faraday afirma ter obtido a rotação contínua de um ímã sob a ação de um condutor e vice-versa. Essas rotações contínuas surpreendem Ampère.

Substituindo o ímã por um solenoide, ele consegue rotações contínuas apenas em circuitos, o que fortalece ainda mais a teoria. Por outro lado, é impossível para ele obter essas rotações apenas com ímãs. Para Ampère, isso representa um “golpe” fatal na teoria de Biot: “Não podemos reduzir o eletromagnetismo a interações entre ímãs”.

Deixando de lado as medições das forças eletrodinâmicas, Ampère criou o método do “equilíbrio”, o método zero, e o colocou em prática. Qual era a ideia? Era fazer com que dois circuitos atravessados por correntes iguais atuassem em um condutor móvel, ao mesmo tempo, criando assim forças opostas nos condutores.

Para eliminar a ação permanente do magnetismo terrestre no circuito móvel, Ampère imagina “circuitos astáticos” (Figura 27), definidos como ímãs colocados em sentido inverso, de modo que o momento magnético total fosse nulo.

Figura 27 – Modelos de “circuitos astáticos”

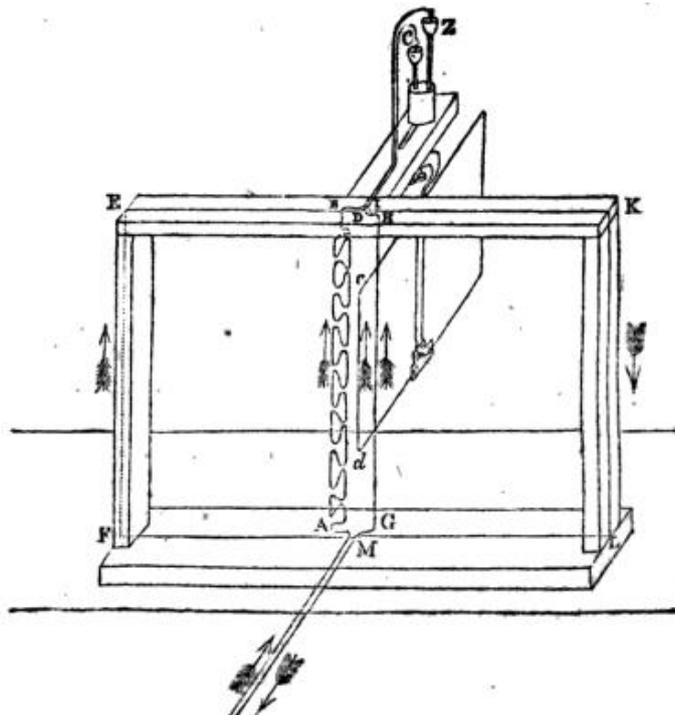


Fonte: Ampère

A Figura 27 representa dois modelos de “circuitos astáticos”. Para tornar um circuito móvel insensível à ação do magnetismo terrestre, Ampère adicionou um segundo circuito oposto unido por outro lado. O todo é considerado astático.

Mais dois experimentos de Ampère “casos de equilíbrio”: São duas correntes paralelas, iguais e próximas e em sentidos opostos, tem efeitos que se cancelam. No caso da corrente num condutor retilíneo e num condutor sinuoso são equivalentes. (Figura 28)

Figura 28 – “casos de equilíbrio”

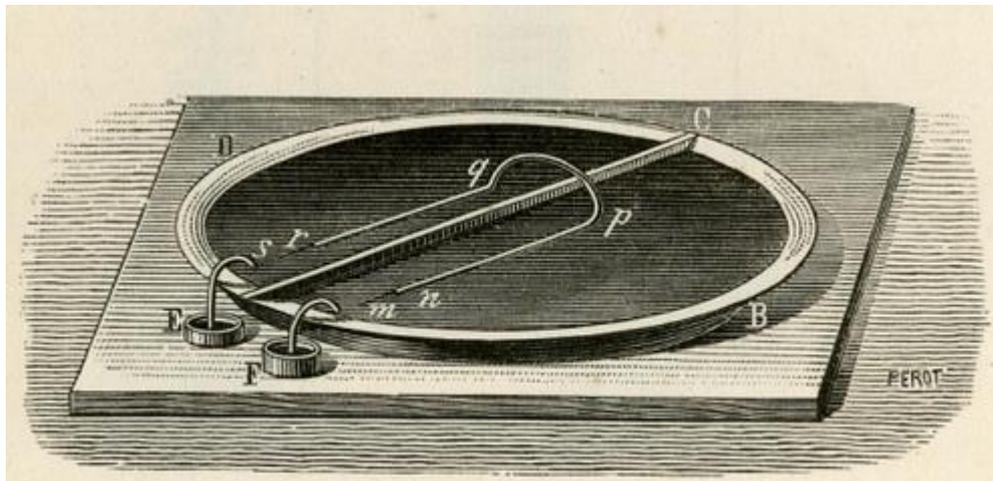


Fonte: Ampère

Na Figura 28 as correntes exercidas simultaneamente por uma corrente retilínea e por uma corrente sinuosa no lado cd de um circuito astático se compensam (o quadro EFKL serve para suportar os fios de conexão entre o condutor móvel e a bateria).

Ampère apresenta o experimento do condutor flutuante em mercúrio e tenta mostrar a repulsão de correntes colineares. Anteriormente vimos que um valor diferente de zero para o parâmetro K, acarreta a existência de uma força entre elementos colineares. Ampère pensara que essa conclusão é confirmada por um experimento realizado em Genebra em 1822. Os dois ramos de um fio metálico em forma de grampo flutuam em mercúrio nos dois compartimentos independente de um recipiente circular, como mostrado na (Figura 29) abaixo.

Figura 29 – Condutor flutuante em mercúrio



Fonte: Ampère

Um dos raros experimentos de Ampère aparecendo nos tratados de física até o século XX, é hoje interpretado pela “regra do fluxo máximo”: Um circuito deformável toma a forma dando-lhe a superfície máxima, de tal modo que é atravessado por um fluxo magnético máximo. Este é o fluxo ideal, ou seja, do campo magnético criado pelo próprio circuito.

A fórmula definitiva de Ampère aponta os fatores g e h da fórmula já mostrada anteriormente, definindo a intensidade de corrente a partir da força que esta corrente exerce sobre um elemento de corrente paralela tomado como referência. Ao substituir K pelo valor $(-\frac{1}{2})$, a ação mútua entre dois elementos de correntes muito pequenos de comprimentos ds e ds' a fórmula torna-se assim: $i \cdot i' ds \cdot ds' (\sin\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma - 1/2 \cos\alpha \cdot \cos\beta) / r^2$.

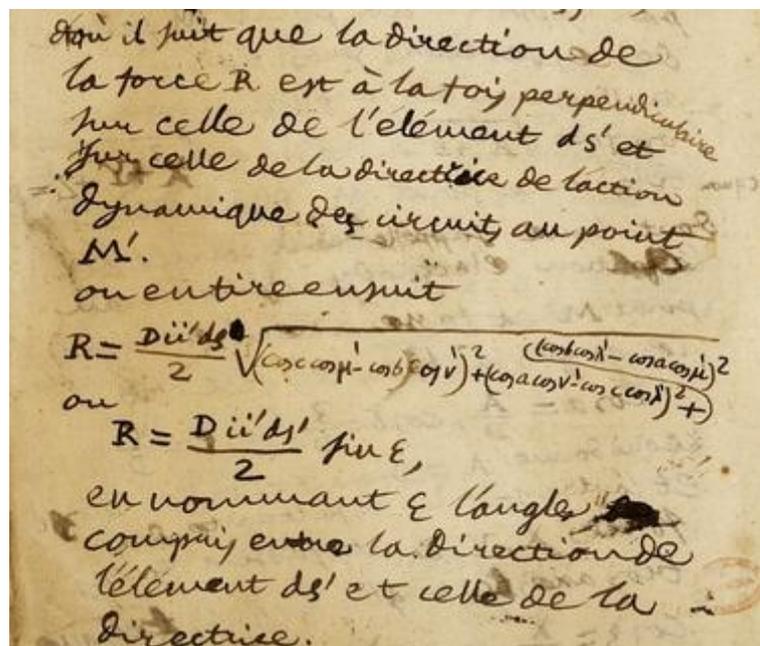
Nesse contexto Ampère, expõe que sua fórmula aceita todos os resultados possíveis entre interações de correntes e ímãs. Em sua obra Ampère conta com a colaboração de Jean-Firmin Demonferrand e Felix Savary. Em 1823 Ampère publica o manual de Eletricidade

Dinâmica, Savary então deduz a lei de Biot e Savart a partir da fórmula elementar de Ampère e observa que há uma inconsistência de Biot em sua lei.

Em fevereiro de 1823, Ampère afirma que, graças a Savary e Demonferrand, “todos os fatos ainda não totalmente explicados, são consequências necessárias de sua fórmula”.

Nesse sentido, se o ângulo entre a diretriz e o elemento de corrente for ε , Ampère mostra que a intensidade da força pode ser escrita na forma: $\frac{1}{2}.D.i.i'.ds'.\text{sen}\varepsilon$, onde D é uma grandeza que depende apenas da geometria do círculo fechado e do ponto onde o elemento de corrente está localizado.

Figura 30 – Um manuscrito de Ampère



Fonte: Ampère

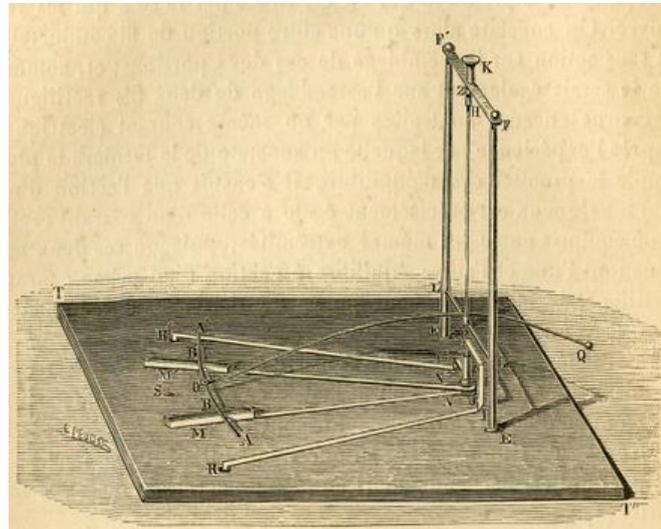
Figura 30 é um manuscrito de Ampère. A força eletrodinâmica R expressa em função da diretriz D.

$$R = 1/2. D.i'.ds'.\text{sen}\varepsilon$$

Reconhece-se aqui a expressão da lei intitulada na França “Lei de Laplace”: $dF = i'.ds'.B.\text{sen}\varepsilon$, onde B, é o vetor indução magnética. Em dois novos casos de equilíbrio Ampère muda a sua fórmula da força elementar ao invés de $1/r^2$, passa a ser $1/r^n$, sendo n é um número inteiro. Assim a fórmula da força elementar pode ser reescrita: $i.ds.i'.ds'(\text{sen}\alpha.\text{sen}\beta.\text{cos}\gamma + K.\text{cos}\alpha.\text{cos}\beta)/r^n$.

Outro caso de equilíbrio, mostra, um circuito fechado colocado nas proximidades de um elemento de condutor de modo que só pode se mover na direção perpendicular ao condutor.

Figura 31 – Arco de um círculo

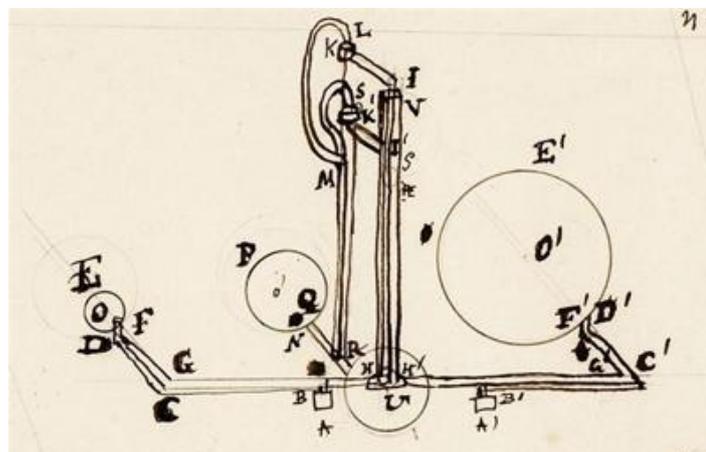


Fonte: Ampère

Figura 31 mostra um arco de círculo (AA), movendo-se sobre canais de mercúrio que o conectam a uma bateria, que só pode girar em torno do seu centro. Quando submetida à ação de um circuito externo permanece parado. Este caso de Ampère prova que a força não tem componente tangencial ao arco e, portanto, é perpendicular a ele.

Devido ao atrito o experimento torna-se não muito preciso, mas serviu para estabelecer a relação entre n e K , sendo $2K+1=n$. Sobre um circuito móvel temos mais um caso de equilíbrio, dois circuitos agindo simultaneamente, um circuito móvel e dois fixos circulares.

Figura 32 – Manuscrito de Ampère



Fonte: Ampère

A Figura 32 possui um manuscrito de Ampère, a perspectiva não é respeitada para a representação dos círculos que, na realidade, estão em um plano horizontal. Os centros dos três círculos estão alinhados. O círculo móvel PQ forma parte, com um segundo círculo percorrido pela corrente, de um circuito astático. A ação do magnetismo terrestre é assim compensada.

Este caso de equilíbrio sobre um circuito móvel onde se tem dois circuitos agindo, simultaneamente, um circuito móvel e dois fixos circulares. Um P vezes menor e outro P vezes maior. Os dois circuitos fixos são colocados em cada lado do circuito móvel, as distâncias entre os centros dos círculos, sendo na mesma proporção de seus raios.

A teoria de Ampère se fundamenta em quatro situações do experimento e em uma hipótese, descreve Maxwell em seu capítulo que dedica, em seu tratado sobre eletricidade e magnetismo (1873). A apresentação final de Ampère. As quatro situações do experimento são os casos de equilíbrio, e a hipótese é a de ação instantânea à distância entre elementos de corrente, obedecendo ao princípio da ação e reação, e, por isso, dirigida ao longo de uma linha reta que une esses dois elementos de corrente.

O título do tratado de Ampère afirma que sua teoria é eminentemente deduzida da experiência. A primeira página de seu tratado apresenta uma entusiástica homenagem a Newton: “Primeiro observe os fatos, varie as circunstâncias tanto quanto possível, acompanhe esse primeiro passo de medidas precisas para deduzir a partir dessas leis independentemente de qualquer hipótese das forças que produzem o fenômeno, o valor matemático dessas forças, isto é, a fórmula que a representa, tal é o caminho seguido por Newton”.

Em geral, isto foi acolhido na França pelos cientistas aos quais a física deve imenso progresso que fez nos últimos tempos, e é isso que tem servido como meu guia em todas as minhas pesquisas sobre fenômenos eletrodinâmicos.

As consequências matemáticas têm para Ampère a mesma importância que as leis empíricas de Kepler para a determinação da lei da gravitação universal de Newton, e por outro lado como apontou Maxwell meio século depois, uma infinidade de equações diferenciais pode dar, por integração, a mesma expressão para a força entre dois circuitos finitos. Mas se aceitarmos o princípio da ação e reação de Newton para os elementos de correntes infinitamente pequenos, somente uma equação elementar é possível, a de Ampère, e para Maxwell é, portanto, a melhor.

Vemos que houve um equívoco por parte de Maxwell, já que a própria teoria de Ampère rompe com a filosofia newtoniana, além disso, se Ampère introduz a teoria matemática dos fenômenos eletrodinâmicos por meio de sua determinação de fé newtoniana e luta vigorosamente contra as concepções de Biot como um anti-newtoniano, ele mostra em outros textos sua repugnância pela ideia de ações instantâneas à distância e sua convicção íntima, de uma propagação gradual no éter, meio hipotético suposto preencher o espaço vazio.

Uma dúvida ficou no ar: Se a fórmula de Ampère é mesmo eficaz, por que, depois de tanto debate, ela desapareceu da ciência atual? Em 1888, o físico inglês Oliver Heaviside, discípulo de Maxwell, reconheceu que essa fórmula havia sido considerada pelo próprio Maxwell como a fórmula principal da eletrodinâmica. Mas acrescentou: “Se isso for verdade, não deveríamos usar sempre? Nunca usamos? Maxwell usou em seu tratado? Há um engano”. E ele sugeriu mudar o nome da fórmula principal de Ampère para aquela que expressa a força sofrida por um elemento condutor colocado em um campo magnético, “Uma fórmula de uso permanente para físicos e engenheiros”.

Nesse sentido a atribuição de um nome a essa fórmula física permanece dependente dos caprichos da história e esta força paradoxalmente carrega, pelo menos na França, o nome de “força de Laplace”!

2.4 CONSIDERAÇÕES FEITAS POR FARADAY EM RELAÇÃO A PROPOSTA DE NEWTON SOBRE AÇÃO À DISTÂNCIA NO SÉCULO XVII

2.4.1 A natureza física das linhas de força e campo

Uma análise da História da Física dentro de um contexto da relevância das questões de como corpos atuam ou agem uns sobre os outros, através do espaço.

Diferentes respostas foram dadas ao longo do tempo para as questões suscitadas em torno da ação à distância e que funcionam como base inicial das comparações e analogias de modelos usados pela física até hoje.

Toda escolha científica ou histórica se pauta numa determinada teoria ou crença através de testes científicos e de forma técnica que levaram o avanço da ciência. Os modelos construídos eram tão essenciais quanto as hipóteses. Por exemplo, as leis de Newton do movimento são verdadeiras para as massas pontuais newtonianas. Para essas massas pontuais como imagem do envolvimento da composição de um gás, usa-se estas massas pontuais como

modelo. Estes modelos são teóricos, mas também podiam ser objetos físicos observáveis usados para representar parcialmente objetos difíceis de ver.

Figura 33 – Royal Institution Christmas Lectures



Fonte: Stock (1855)

Faraday (1791-1867) foi o primeiro a sugerir que a ação à distância era inadequada como explicação das forças magnética e elétrica, mas foi Poisson que mostrou primeiro que um potencial poderia ser introduzido em eletrostática, de modo similar à introdução do potencial gravitacional, apesar de Faraday ter dito que não se julgava matematicamente competente para julgar esse tratamento, ele se convenceu em bases experimentais mais do que em bases matemáticas, que o meio intermediário devia ser visto como portador das ações elétricas e magnéticas em um sentido mais do que formal. Sua descrição de linhas de força emanando de condutores carregados e de magnetos tornou-se a base de extensões dessa teoria, nas mãos de Kelvin e de Maxwell. Seu uso de representações pictóricas levou-o à discussão e reinterpretação do significado de ação por contato e à distância e isso merece estudo detalhado da mecânica da ação à distância e de contato.

Foi em relação à indução elétrica que, inicialmente, Faraday convenceu-se que a ação se propagava em um meio e não à distância. Suas premissas experimentais o levaram a três conclusões, que apontavam para a existência de um meio ativo:

1- A indução da carga elétrica entre condutores, através de um meio isolante, depende quantitativamente da natureza do isolante;

2- Se o isolante é cortado e as partes separadas, cargas opostas surgem nas duas superfícies separadas;

3- As linhas de indução são curvas, como ilustrado pela faísca de uma descarga e por experiências que mostram como a força em uma esfera carregada, envolvidos, devido a um

isolante carregado é afetado pela presença e forma dos condutores, o que pode fazer a indução “mudar a direção”.

Faraday concluiu que o meio isolante propaga a indução elétrica por meio de suas próprias partículas, cada uma das quais é um condutor e torna-se polarizada, um lado tendo uma carga negativa e o outro, uma carga positiva. Essa ação ocorre entre partículas contíguas ao longo de linhas curvas e Faraday pensa que o fato de as linhas serem curvas é “prova forte” de que a indução é “uma ação de partículas contínuas afetando uma à outra, em torno, e não uma ação à distância”. Em “*Experimental Researches*”, de 1837, ele fala de indução como uma ação entre “partículas contíguas” e adiciona uma nota um ano depois, para explicar mais cuidadosamente o que ele entende por “contíguo”.

A palavra contíguo talvez não seja a melhor opção para ser usada aqui e em qualquer outro lugar. Pois como as partículas não se tocam, este termo não é exatamente correto... Por partículas contíguos refiro-me àqueles que estão próximas (HESSE, 1970, p. 199).

Em última análise, parece que até essa ação é a uma distância, se considerada na escala atômica. Faraday é explícito sobre isso em uma correspondência com o Dr. Hare de Pensilvânia, que começou em 1839. Dr. Hare argumentou que a rarefação do ar entre condutores não afetava a transmissão da indução elétrica e, portanto, que o meio material não poderia ser essencial. Ele sugeriu que uma matéria imponderável deveria ser postulada, de modo que a polarização desta matéria entre condutores seria “conectar a cadeia, de outra forma imperfeita, de causas”. Faraday respondeu que seu uso de “contíguos” inclui o vácuo no qual essas partículas de ar podem ser separadas por distâncias da ordem de meia polegada, mas ele não se comprometeu, aqui, com a hipótese de um éter imponderável. Dois anos antes, no entanto, ele havia feito a mesma sugestão: “Pode a ação indutiva ser transmitida por outras partículas, que não as de matéria imponderável, como pelas partículas de um proposto éter”.

[...]

Fisicamente ação à distância, na escala atômica, é aqui analisada por Faraday, porque ele vê cada partícula do meio permeável como sendo elas mesmas um condutor e as propriedades dos isolantes como decorrente da suposição de que partículas condutoras não estão em contato com outras, pois se elas estivessem não haveria isolantes. Porém, cinco anos depois, ele se deu conta que, se esse argumento fosse aplicado a condutores, isso implicaria em conclusões altamente paradoxais e ele é levado a fazer um ataque fundamente à visão corrente da constituição atômica da matéria que dá origem a elas. Em uma carta de 1844,

publicada em “*Philosophical Magazine*” intitulada “*A speculation Touching Electric Conduction and the Nature of Matter*”, ele caracteriza essa visão corrente como segue: Átomos têm certo volume e são dotados de poder que os mantêm juntos em grupos, mas eles não se tocam. Assim apenas o espaço é um todo contínuo através da matéria, considerada como um agregado de átomos. Segue-se, como vimos acima, que em isolantes, o espaço deve ser um isolante, mas em condutores, se seus átomos não se tocam, o espaço deve ser condutor. Tal conclusão contraditória é absurda e mostra que a teoria atual deve ser falsa. Faraday agora passa a fechar a rota de fuga sugerida pela possibilidade que os átomos se toquem nos condutores.

[...]

Ainda, os fenômenos físicos e químicos parecem exigir átomos como centros de força e, sendo assim, o tão pouco quanto possível deve ser assumido sobre eles. Este princípio de economia, junto com a contradição envolvida na assunção de que um átomo é um “pedaço de matéria, impenetrável, imutável e pequeno”, estendido, leva Faraday ao ponto de vista, que ele atribuiu a Boscovich, que um átomo é um ponto com “uma atmosfera de forças agrupadas em torno dele”. As propriedades de um corpo, tais como a condução, a relação com a luz ou o magnetismo, a solidez, a dureza, a densidade, devem, então, pertencer não a um “núcleo” abstraído de suas potências (pois isso é, de qualquer modo, inconcebível), mas às próprias forças.

[...]

Segue-se, em contraste à visão ortodoxa, de que matéria está em todo lugar, contínuo e que ‘átomos’ são altamente elásticos e deformáveis, mutuamente penetráveis e que matéria preenche todo espaço, ou, pelo menos, todo espaço por onde a gravitação estender... Pois gravitação depende de certa força, e é esta força que constitui a matéria... isso, à primeira vista, parece cair em harmonia com... o velho adágio, “matéria não pode agir onde não está”.

Essa narrativa parece marcar uma transição decisiva da ação contínua entendida mecanicamente para a ação contínua em termos de forças preenchendo o espaço. A transição era pronunciada a Boscovich e Kant, mas Boscovich não igualou sua matéria com a força e ainda vê sua teoria em termos da ação à distância enquanto Kant, embora igualasse matéria com força repulsiva, distinguisse entre esse, qual age por contato, e força atrativa, que age à distância. Maxwell interpreta o trabalho de Faraday como uma substituição dos conceitos de ação à distância por ação contínua, no seguinte:

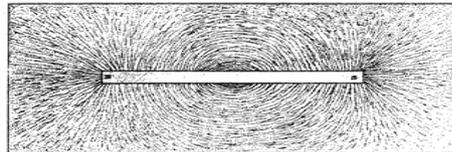
Faraday, com o olho de sua mente, vê linhas de força atravessando todo o espaço, onde os matemáticos viam centros de força atraindo à distância. Faraday viu um meio, onde eles não viam nada além da distância. Faraday procurou o lugar do fenômeno em ações concretas através do meio, eles ficaram satisfeitos que encontraram isso em um poder de ação à distância impressa nos fluidos elétricos (HESSE, 1970, p. 201).

Mais adiante:

Essa (concepção de linha de força) está inteiramente de acordo com a nova concepção de ação à distância reduzindo-o a um fenômeno do mesmo tipo de ação à distância que é exercida por meio de tensão de corda e de tensão de barras. [...]

Essas linhas de força aqui são simplesmente o que poderia ser representado por limalha de ferro espalhado no centro (HESSE, 1970, p. 202).

Figura 34 – Linhas de força magnética traçadas por limalha de ferro



Fonte: Blog The Ciência (2013)

2.4.2 Os critérios de Faraday para ação à distância e a natureza física das linhas de força

Forças propagadas através do espaço têm diferentes características e Faraday compara essas, na terminologia ortodoxa da “ação à distância” e “ação contínua”, sem implicar qualquer coisa sobre a natureza final da matéria e da força, nos artigos de 1851 e 1852. Nestes, ele dá importante critério experimental para a distinção entre ação à distância e ação contínua decorrente do que é sabido sobre forças elétrica e magnética.

[...]

Como a força magnética é transferida através de corpos ou através do espaço nós não sabemos: -- se o resultado é, apenas meramente, ação à distância, como no caso da gravitação; ou por algum agente intermediário, como no caso da luz, do calor, e da corrente elétrica e (como eu acredito) da eletricidade estática. Em seu artigo intitulado “O caráter físico das linhas de força magnéticas” de 1852 no qual Faraday observa que ele está deixando ‘a linha estrita da razão’ em ‘poucas especulações’ e entrando um pouco na ‘especulação’ ele sugere alguns critérios pelos quais diferentes tipos de ação podem ser reconhecidos:

Pode a transmissão da ação à distância ser afetada por mudanças no meio que permeia no que diz respeito, por exemplo, à flexão das linhas, ou efeitos de polaridade?

(i) A transmissão leva um tempo?

(ii) A ação depende do terminal de “recepção”?

Essas questões são respondidas com respeito à gravitação, à radiação e às forças elétrica e magnética.

2.4.2.1 Primeiro, com relação à gravitação:

(i) Nada no meio contínuo afeta uma linha de força gravitacional entre duas partículas. A linha é retilínea não importa que outras partículas possam estar no campo e a ação entre qualquer par de partículas é independente daquela entre qualquer outro par.

(ii) Parece impossível provar ou não que a gravidade leva tempo, aparece aqui o problema da instantaneidade. Se levar um tempo isso mostraria inegavelmente, que um agente físico existe no caminho das linhas de força.

(iii) A ação da gravidade depende da massa de ambas as partículas interagentes e da distância entre elas. ‘Assim, a gravidade nos apresenta o caso mais simples de atração’ [...].

2.4.2.2 Segundo, com relação à radiação:

(i) As linhas de radiação são afetadas pelas propriedades do meio permeante tanto em curvatura quanto na orientação transversal em torno de seu eixo (polaridade).

(ii) Elas necessitam de um tempo para se propagarem

(iii) Elas não dependem de uma segunda partícula interagentes. Aqui nós obtemos a maior prova de que, embora, nada ponderável ‘aconteça, ainda assim as linhas de força têm uma existência física independente, ao modo de um corpo irradiando ou do corpo recebendo os raios’.

2.4.2.3 Terceiro, com relação à indução elétrica:

(i) Linhas de indução elétrica são afetadas pelo meio material, mas não é certo se, no vácuo, [as linhas de indução] seriam lineares como as da gravidade ou curvas. Nenhuma condição de polaridade foi observada.

(ii) Nenhum tempo foi mostrado ser necessário para a sua propagação.

(iii) Uma segunda partícula interagente é necessária.

2.4.2.4 Quarto, com relação à corrente elétrica:

(i) A corrente é afetada pelo meio no que diz respeito à direção e quantidade e está essencialmente relacionada ao meio material.

(ii) Um tempo é necessário para a propagação, mesmo em bons condutores.

(iii) As linhas de fluxo são ou limitadas como em uma descarga [elétrica], ou infinitas e contínuas. Em ambos os casos, a corrente depende de duas extremidades, como, por exemplo, dois condutores carregados, ou as placas de uma célula voltaica.

2.4.2.5 Assim há três tipos de forças exercidas à distância.

1. A gravidade, “no qual a propagação da força por linhas físicas através do espaço intermediário, não é suposta existir”. Radiação, ‘na qual a propagação não existe, e na qual a linha de propagação ou raio, uma vez produzido, tem existência independente seja fonte seja do término’.

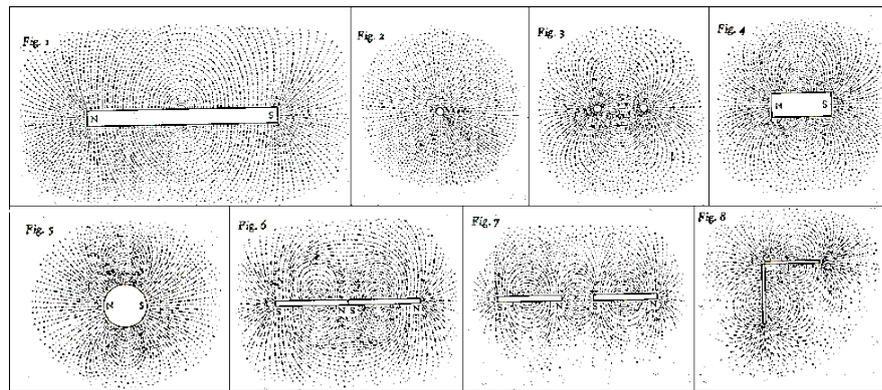
2. Elétrica “na qual o processo de propagação tem existência intermediária, como um raio, mas ao mesmo tempo dependem de ambas as extremidades da linha de força”.

3. A ação magnética é igual às citadas anteriormente? Têm as linhas de força magnética uma existência física, e, se assim são estáticas como a indução elétrica ou dinâmica como a corrente elétrica? Faraday respondeu a essas três questões, no caso de linhas de força magnética, como se segue:

- Elas não foram mostradas serem afetadas, de qualquer modo, por qualquer meio que não o ferro. Por outro lado, parece que as linhas externas devem ser curvadas no caso de barras magnéticas no vácuo, pois elas começam em um polo e terminam no outro e Faraday não pode conceber essas linhas de força curvas sem as condições de uma existência física no espaço intermediário. Se elas existem, não é por uma sucessão de partículas, como no caso da indução elétrica estática, mas pela condição do espaço livre de tais partículas materiais.
- Nenhum tempo foi mostrado ser necessário à propagação da ação magnética.
- As linhas são dependentes dos polos opostos em suas extremidades.

Na percepção de Faraday chega-se na conclusão de que o campo é que exerce uma força e não a partícula.

Figura 35 – Uma representação de linhas de força magnética obtidas por Faraday com limalha de ferro



Fonte: Experimental researches in electricity (1851)

2.5 A CRIAÇÃO DO CONCEITO DE CAMPO FEITA POR MAXWELL E A AÇÃO À DISTÂNCIA

Figura 36 – Maxwell



Fonte: Instituto de Telecomunicações

Começando com o trabalho de Faraday e dos matemáticos que lhe sucederam, devem-se distinguir, claramente, entre duas formas de considerar o problema da ação à distância, formas que podem ser denominadas, respectivamente, a visão mecânica e a visão de campo.

A visão mecânica é herdada da física do século XVII e considera a questão da ação em termos de uma teoria da substância ou matéria tendo propriedades mecânicas: Extensão, duração, movimento, massa, força. No século XIX modelos mecânicos para teorias ainda são procurados, mas está claro que em termos deles, nenhuma resposta para o problema mecânico da ação é possível. A razão para isso é que os modelos mecânicos não são mais pensados como descrições literais de entidades existentes na natureza, mas, apenas, como interpretações em termos de aparelhos mecânicos, de fenômenos que são descritos matematicamente, mas cuja natureza última não pode ser considerada como puramente mecânica.

[...]

Maxwell (1831-1879), está interessado apenas em explicar ‘ação entre corpos distantes sem assumir a existência de forças capazes de agir diretamente a distâncias

sensíveis'. Sobre a questão de saber se éter é discreto ou contínuo, Maxwell comenta: “Muitas vezes é afirmado o simples fato de um meio ser elástico ou compressível é a prova de que o meio não é contínuo, mas composto de partes separadas, tendo espaços vazios entre elas”. Porém, não há nada inconsistente com a experiência em supor que elasticidade ou compressibilidade sejam propriedades de cada parte, não importa quão pequeno, em que o meio pode ser concebido como dividido e, nesse caso, deveria ser estritamente contínuo. Para Maxwell havia duas possibilidades para transmissão de força entre corpos distantes, pela ação do campo ou pela ação à distância.

Como disse o próprio Maxwell em uma palestra na *Royal Institution* (Londres), a respeito da ação à distância: “não tenho nenhuma descoberta nova esta noite para apresentar-lhes. Devo convidá-los a reexaminar o passado e voltar sua atenção para uma questão que tem trazido à baila de tempos em tempos desde que o homem começou a pensar.

A questão se refere-se à transmissão da força. “Sabe-se que dois corpos separados por certa distância exercem influência mútua sobre os movimentos um do outro. Dependerá esta ação da existência de uma terceira coisa, um agente de transmissão que ocupe o espaço entre os corpos, ou será que os corpos agem uns sobre os outros imediatamente, sem a intervenção de nada mais?” (HESSE, 1970, p. 207).

[...]

Isso ilustra o tipo de dificuldade que surge quando se tenta levar a modelos mecânicos como descrições literais da natureza, e extrair deles uma resposta para a questão de saber se a ação à distância ocorre na natureza ou não. Em geral, torna-se envolvido em regressão infinita: ação entre corpos a distâncias finitas é explicada pela contínua tensão, num meio duradouro ou estável, essa tensão é explicada pela constituição molecular do meio, que pode, ela mesma, envolver ação à distância e assim por diante.

[...]

Por outro lado, o aspecto do problema da ação à distância tornou-se cada vez mais importante à medida que a natureza dos modelos mecânicos se tornou mais bem entendido. O problema pode ser dito ser o de reinterpretação a ação à distância e ação por contato, de modo que os conceitos permaneçam relevantes a uma física, cujos fundamentos se tornavam mais abstratos e menos mecânicos e cuja estrutura mais facilmente entendida em termos matemáticos do que de modelos mecânicos.

Kelvin mostrou em uma série de artigos matemáticos a partir de 1842 que o mesmo formalismo matemático poderia ser usado para expressar as leis do fluxo de fluidos, do fluxo de calor, dos fenômenos elétricos e magnéticos e da elasticidade. Assim, uma fonte de fluido ou calor é o análogo de uma carga elétrica, polo magnético ou fonte de corrente elétrica; linhas de fluxo são análogos da força; a temperatura é um análogo do potencial e assim por diante. Kelvin mostrou que as representações de Faraday em termos de linhas de força são consistentes em termos da Lei do inverso do quadrado, e que isso seguiu sem assumir nenhuma hipótese sobre a natureza das linhas de força. Essas linhas são matematicamente definidas quando a distribuição dos centros de força é conhecida.

Kelvin observa que nenhuma hipótese física decorre do fato dessas analogias. Fourier não deduziu que o calor é um fluido material das Leis do fluxo de calor, e Coulomb não deduziu atrações e repulsões baseando-se na Lei do inverso do quadrado da distância, mas as analogias sugerem que, se o calor for propagado de partícula para partícula em um meio contínuo, a ação elétrica e as outras poderão ser propagadas de maneira semelhante.

Maxwell é igualmente cauteloso ao usar as analogias; ele propõe tratar linhas de força como se fossem linhas de um fluido incompressível, mas acrescenta: a substância aqui tratada não deve ser considerada como possuidora de nenhuma das propriedades dos fluidos comuns, exceto as de liberdade de movimento e resistência à compressão. Nem sequer é um fluido hipotético que é introduzido para explicar fenômenos reais. É a penas uma coleção de propriedades imaginárias que podem ser empregadas para estabelecer certos teoremas da matemática pura de um a maneira mais inteligível para muitas mentes e mais aplicável a problemas físicos do que na qual apenas os símbolos algébricos são usados.

Até as concepções de Faraday são essencialmente matemáticas; ao progredir com o estudo de Faraday, Maxwell percebeu que seu método de conceber os fenômenos também era matemático, embora fosse exibido na forma convencional de símbolos matemáticos.

O método de Faraday se assemelha àquele nos quais começamos com o todo e chegamos às partes pela análise, enquanto os métodos matemáticos comuns foram fundamentados no princípio de começar com as partes e construções do todo por síntese. Assim, a noção de potencial desenvolvida por Laplace, Poisson, Green, e Gauss encontra sua interpretação adequada em termos da teoria de Faraday, enquanto na matemática convencional lei do inverso do quadrado $1/d^2$ e da ação à distância, o potencial tem de ser considerado como um somatório dos efeitos de partículas individuais. Em geral, a opinião na física tem seguido Maxwell, que considerou as teorias de campo derivadas das analogias com

o fluxo de fluidos e com os meios elásticos como o novo tipo de teoria da ação contínua. A ação contínua passou a significar que cada ponto do espaço pode ser caracterizado por certas quantidades matemáticas que representam a energia presente ali, sem implicar que ocorram eventos mecânicos:

(...)podemos considerar a concepção de Faraday de um estado de tensão no campo eletromagnético como método de explicar a ação à distância por meio da transmissão contínua de força, mesmo que não saibamos como o estado de tensões é produzido (HESSE, 1970, p. 210).

E em pouco tempo os físicos deixaram de perguntar como o estado de estresse é produzido no sentido mecânico, ou mesmo para permitir que a questão tivesse algum significado. O campo de tensões no espaço tornou-se fundamental: o campo não era para ser explicado em termos de matéria; a matéria era, antes de tudo, uma modificação particular do campo. Lamour, por exemplo, escrevendo por volta de 1900, observa:

“Não é supérfluo repetir que a matéria pode ser provavelmente uma estrutura no éter, mas o éter não é uma estrutura composta de matéria” (HESSE, 1970, p. 211).

Os critérios de Faraday para a ação contínua começaram a ser aceitas como suficientes, a ação deveria ser afetada no espaço por mudanças materiais nas interações e que na propagação dessas interações levaria um tempo, não sendo instantânea e que, como ficou explícito por Maxwell, a energia eletromagnética poderia ser localizada no campo e ser transformada e demonstrada em outra forma de energia de acordo com o princípio da conservação de energia. “Ao falar de energia de campo... eu quero ser entendido literalmente”.

Posteriormente, Poynting desenvolveu essa concepção de energia de campo substancial. Ele observa que, nas teorias de Faraday e Maxwell, a energia do campo não é simplesmente transportada pelas correntes, mas reside no meio intermediário. Isso deve ser seguido, se a continuidade do movimento for afirmada, porque, se uma partícula for colocada no campo em um ponto anteriormente vazio da matéria, ela poderá adquirir uma energia cinética, e essa energia deve passar pelo espaço que sobra. A alternativa que apareceu no corpo sem passar pelo espaço imediatamente ao redor do corpo não precisa ser discutida. A alternativa violaria a conservação de energia, porque se a ação eletromagnética é propagada; entre os corpos em um tempo finito, e se sua energia não estiver presente no espaço livre intermediário no intervalo, ela não será conservada durante esse intervalo. O conceito de fluxo de energia de Poynting permitiu que fossem fornecidas descrições do fluxo

de energia entre o campo eletromagnético e outros sistemas físicos em interação, incluindo suas formas de transformação em calor, produtos químicos, cinéticos e outras formas de energia. Assim, a energia pode ser vista, em alguns aspectos, semelhante a um fluido em satisfazer equações de conservação e continuidade, embora a distribuição de energia não possa de fato ser definida exclusivamente sobre o campo, e existem várias dificuldades em descrever o fluxo em algumas situações físicas. Maxwell também foi capaz de associar o momento ao campo eletromagnético, de modo que o momento e a energia são conservados na passagem da ação de um ponto para outro, e isso foi confirmado posteriormente experimentalmente no fenômeno da pressão de radiação.

2.5.1 Hertz e as interpretações das equações de Maxwell

Admitir com Maxwell que a 'realidade' do campo consiste na presença de energia em regiões desprovidas de matéria e que são as equações matemáticas que descrevem o campo que, são importantes, não é abandonar todas as figuras concretas. do que está acontecendo no campo. A teoria de Maxwell, por exemplo, envolvia a concepção de uma 'corrente de deslocamento' no espaço livre que completa o circuito de corrente em qualquer caso em que, como no carregamento ou descarregamento de um condensador, a carga está se movendo em dielétricos materiais de maneira aparente no circuito aberto. Como o éter é aqui considerado como um dielétrico polarizado, por analogia com os dielétricos dos materiais, no sentido de que equações semelhantes descrevem o comportamento de ambos, é possível ter imagens alternativas da distribuição de energia nos dielétricos dos materiais e, analogamente, no éter. Em sua Introdução à coleção de artigos *Untersuchungen über die Ausbreitung der Elektrischen Kraft*, Heinrich Hertz fez uma análise cuidadosa das várias interpretações possíveis da ação no espaço livre, variando de ação direta à distância e ação realizada inteiramente pelo éter. Ele distingue quatro pontos de vista:

1. Existe um tipo de afinidade espiritual 'entre os corpos reagindo, no sentido de que a força está presente apenas quando há dois ou mais corpos. Essa é a concepção da lei do inverso do quadrado de Coulomb, e está quase abandonada em eletricidade, embora ainda seja usada para a gravitação.

2. Supõe-se que um corpo por si só se esforce continuamente para excitar em todos os pontos circundantes atrações de magnitude e direção definidas 'com as quais' preenchemos o espaço circundante, mas nenhuma mudança é assumida no próprio espaço e, portanto, as

forças a distância ainda devem ser independentes de qualquer meio. Este é o ponto de vista da teoria do potencial.

3.(a). A força é transmitida tanto pela ação à distância quanto pela polarização de pequenas partes do meio, que por sua vez agem à distância. Isso, diz Hertz, é a interpretação de Helmholtz, e aqui a polarização depende de um meio, mas de forças à distância não.

(b) Existe, no entanto, um caso limitante dessa interpretação em que toda energia da interação é presumida como estando presente no meio e nenhuma nas cargas agindo à distância. A expressão matemática deste caso leva às equações de Maxwell, mas não coincide com a interpretação física de Maxwell.

4. Não há forças à distância, somente a polarização está realmente presente; e elas podem ser descritas por alguma hipótese. A expressão matemática desse ponto de vista é idêntica ao de 3b, mas fisicamente é bem diferente, pois aqui a eletricidade (assumida como fundamental) não é registrada como a causa da polarização do meio, mas a polarização é fundamental e considerada como o caso da eletricidade.

No caso 2 das figuras (Figura 38), abaixo removendo B não faz diferença para a força.

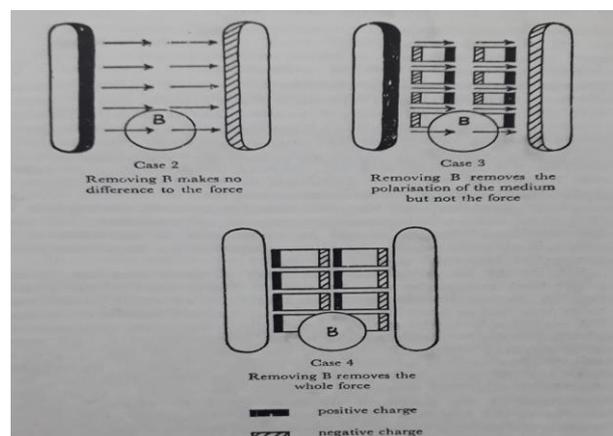
No caso 3. Remover B remove a polarização do meio, mas não a força.

No caso 4. Remover B remove toda a força.

Retângulos escuros representam cargas positivas.

Retângulos hachurados representam cargas negativas.

Figura 37 – Interpretação de Hertz para indução elétrica



Fonte: Mary Hesse (1970)

Hertz considera que o próprio Maxwell usa ambas as concepções (3b) e (4) de maneira que as vezes parecem contraditórias, mas que seu pensamento desenvolvido deve ser

interpretado no sentido de (4), que é também o ponto de vista que Hertz adota em sua própria explicação teórica, da Teoria de Maxwell.

Hertz, no entanto, retorna à visão cientificista do início do século XIX e considera apenas na medida em que são distinguíveis por testes empíricos. Assim, as três interpretações, de Helmholtz (o caso limite 3b), de Maxwell (uma mistura de 3b e 4), e as suas próprias (4), são as mesmas teorias, uma vez que são todas expressas pelas equações de Maxwell.

Maxwell em suas equações, que são quatro, unificou os fenômenos magnéticos com os fenômenos elétricos. Para o eletromagnetismo Maxwell unificou as Leis de Gauss no estudo da eletricidade e do magnetismo, para a indução eletromagnética a Leis de Faraday e Ampère. Vamos aqui apenas apresentar as quatro equações de Maxwell na forma diferencial, sem a formulação matemática $\nabla \cdot E = \rho / \epsilon_0$ (Lei de Gauss); $\nabla \cdot B = 0$ (Lei de Gauss do magnetismo); $\nabla \times E = -\partial B / \partial t$ (Lei de Faraday); $\nabla \times B = \mu_0 \cdot j + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \epsilon_0}{\partial t}$ (Lei de Ampère)¹².

2.6 A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE G DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL DE ISAAC NEWTON

2.6.1 Comentário inicial sobre a gravitação newtoniana

Em seu trabalho sobre a gravitação, Newton elaborou a lei da força (a mais antiga que se conhece), que surge quando duas massas interagem entre si a uma certa distância (r), podemos dizer que um objeto de massa (M) atrai outro de massa (m), obedecendo sua lei de acordo com a famosa equação: $FG = -G \frac{Mm}{R^2} r$, (Figura 38), nesta equação FG representa o vetor força gravitacional entre as massas M_T (massa da Terra) e m_L (massa da lua), r é um vetor unitário na mesma direção e sentido R (R^2) é a distância entre os centros das massas (M_T) e (m_L).

¹² ϵ_0 representa uma constante de permissividade; ρ representa a densidade de carga elétrica, E é o campo elétrico e B é o campo magnético.

Figura 38 – Lei da força

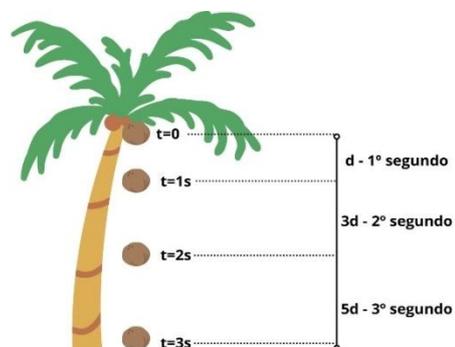


Fonte: Slide Player

A lei da força estabelecida por Newton estende-se ao movimento dos planetas em suas órbitas, como por exemplo, vemos na figura acima entre a Terra e a Lua. As leis de Kepler definiam bem o movimento dos planetas em suas órbitas celeste, Newton impulsionou esse trabalho de Kepler mostrando que esse movimento estava associado a força gravitacional.

Nesse sentido, Newton unificou a física celeste de Kepler (1571-1630), com a física terrestre de Galileu (1564-1642), é importante ressaltar que Galileu já havia observado que todos os corpos caíam com a mesma aceleração quando submetidos a um mesmo campo gravitacional constante, isto ocorre nas proximidades da superfície da Terra, Galileu pode demonstrar isso matematicamente, quando um objeto cai a partir do repouso tem a sua velocidade aumentada, em intervalos de tempos iguais, na mesma proporção do valor da aceleração (g), e que as distâncias percorridas são: $d \sim \Delta t^2$, proporcionais ao intervalo de tempo (Δt) ao quadrado.

Figura 39 – Esquema de aceleração de corpos



Fonte: elaboração própria do autor (2022)

Na superfície, terrestre podemos considerar M_T massa da Terra e R_T raio da Terra, tornando a força gravitacional uma constante, conhecida como força peso (P) teremos:

$P=mg$ e $g=G\frac{M_T}{R_T}$, g é independente da massa do corpo que é atraída para a Terra. Nesse sentido podemos dizer que massa inercial e a massa gravitacional são massas equivalentes, $m_i=mg$, esta igualdade é o princípio da equivalência de Galileu.

$$F=m_i \cdot a \text{ é igual } P=mg \cdot g, \text{ logo } m_i = mg$$

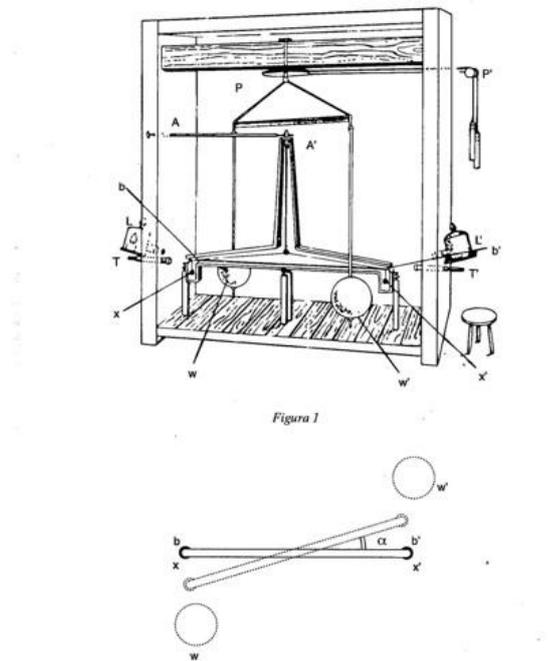
Outras grandes descobertas foram feitas através da lei da gravitação universal de Newton, até o século XVII os planetas conhecidos eram, Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter e Saturno. Após a morte de Newton outras descobertas foram realizadas como os planetas, Netuno (1846) e Urano, essas descobertas também se basearam na lei newtoniana da gravidade. Uma observação feita pelos astrônomos Johann Galle e Heinrich d'Arrest na órbita de Urano levou a descoberta de Netuno, John Couch Adams (1819-1892) e Urbain Le Verrier (1811-1877), usaram cálculos matemáticos baseados na lei da gravitação de Newton, para descobrir Netuno, isso em meados do século XIX.

Newton nunca teve interesse em quantificar sua lei, e neste sentido, não procurou fazer nenhum cálculo na sua famosa equação da gravitação universal anterior a sua publicação.

2.6.2 A determinação do coeficiente G da Gravitação Universal pelo método de Cavendish

O método experimental de Henry Cavendish (1731-1810), filósofo inglês, que construiu uma balança de torção, seu objetivo era “pesar a Terra”, mas na verdade ele estava mensurando o G da Lei da gravidade, isto cem anos após Newton ter enunciado a Lei da Gravitação. A lei da gravitação universal de Newton em seu, Princípio Matemáticos da Filosofia Natural, em 1687, dizia que duas massas M e m, separadas por uma distância r, exercem forças mútuas de acordo com a força $F= G\frac{M \cdot m}{r^2}$, e que G é uma constante de gravitação. A lei da gravitação universal foi verificada por Cavendish com a ajuda de seu amigo John Michell, da *Royal Society* de Londres. Foi Michell quem elaborou o dispositivo experimental, que Cavendish guardou em sua casa em Clapham (Figura 40).

Figura 40 – Dispositivo experimental



Fonte: Flat Earth Research Center

Esta é uma balança de torção, com as seguintes descrições: Uma haste de madeira com 2,0 metros (bb'), com reforço de um fio de prata (bwb'), e suspensa na posição horizontal por um fio de 1,0 metro (Lw), este preso a uma vara (AA'). Em cada extremidade da haste contém uma esfera de chumbo de 5,0 cm de diâmetro ($x x'$). Todo o aparato ficava dentro de uma caixa de mogno completamente fechada a evitar interferências externas.

Duas grandes esferas de chumbo com diâmetro de 30 cm ($w w'$), suspensas por um aparato de cobre e madeira (B), se encontravam próximas das esferas x e x' . Este aparato podia girar em torno de si mesmo por meio de polias acionadas a distância (PP'). O afastamento da posição das grandes esferas devia alterar a posição das pequenas esferas, e da haste da balança. Essa mudança de posição denotava a ação atrativa das grandes esferas. Cavendish usava um marcador de marfim graduado para determinar a posição, aproximadamente, com um décimo de milímetro. Cavendish usou dois telescópios ($Te T'$) e duas lâmpadas (L e L'), que eram colocados do lado de fora do aparato para evitar qualquer erro. Cavendish conseguiu mostrar a atração das esferas grandes sobre as pequenas esferas, que fazia girar a haste da balança de torção de um ângulo α (Figura 2). O par de torção $C.a$ (sendo C a constante de torção do fio), é compensado pela atração: $C.a = 2G \frac{M.m.a}{r^2}$, onde $2a$ é o comprimento da haste da balança de torção, M e m são respectivamente a massa grande e a massa pequena, r a distância entre os centros das esferas.

De acordo com Cavendish $G=6,754 \times 10^{-11} \text{N.m}^2/\text{kg}^2$ (N é a unidade de força em newton, força esta necessária para imprimir uma aceleração de 1m/s^2 a uma massa de 1 kg).

Em 1895 Charles Vernon Boys (1855-1944), Paul Renno Heyl (1872-1961) e J. Zahranicek apresentaram um valor com mais precisão por utilizarem uma balança mais aferida, isto se deu entre 1930 e 1942. Em 1982, G.G. Luther e W.R. Towler apresentaram o valor de $G=6,6726 \times 10^{-11} \text{N.m}^2/\text{kg}^2$. Cavendish determinou a densidade média da Terra, como consta em seu relatório *Experiments to the Density of the Earth* e obteve a massa da Terra igual a $5,98 \times 10^{27}$ kg, e a massa específica da Terra 5,48 vezes maior que a da água. C.V. Boys obteve para densidade da Terra o valor igual a 5,5270 valor este com uma diferença de 1% do valor obtido por Cavendish que era de 5,48. Cavendish em seu experimento conseguiu mostrar rigorosamente a lei da atração universal e uma expressão quantitativa dessa lei.

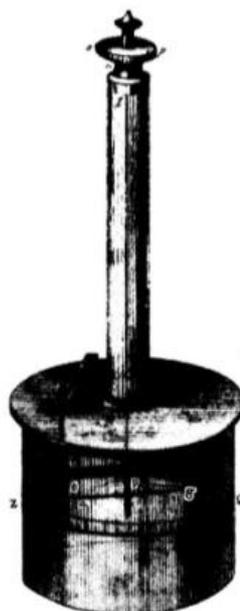
A gravitação assim como como outras forças apresentam algumas semelhanças, a força elétrica estudada por Charles Augustin Coulomb, usando uma balança de torção inventada em (1784), um aparato produzido na mesma época da balança de Cavendish. A força elétrica e a força gravitacional apresentam algumas diferenças, a força elétrica pode ser de atração ou de repulsão, enquanto a força gravitacional é de atração.

Assim sendo a razão entre a atração gravitacional entre dois elétrons e a repulsão elétrica de Coulomb corresponde a $1/4,17 \times 10^4$ esse número é uma constante natural segundo Richard Feynman.

$$\frac{F_g}{F_e} = \frac{1}{4,17 \times 10^4}^{13}$$

¹³ Física Em Seis lições. Richard Feynman, p. 165

Figura 41 – Balança de torção usada por C. A. Coulomb



Fonte: Coulomb

A balança (Figura 41) consistia em duas esferas a e t suspensas separadamente em um cilindro de vidro hermeticamente fechado. A esfera a ficava presa a uma fina agulha e contrabalançada por um contrapeso g . Estava suspensa horizontalmente no meio do cilindro de vidro por um fio de torção de prata IP .

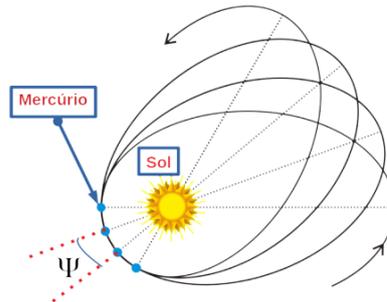
Este por sua vez estava preso à ponta de um tubo de vidro, colocado acima do cilindro. Havia uma escala graduada ZQ . É impressionante como os termos da lei de Coulomb são semelhantes com os termos da lei de atração universal de Isaac Newton.

2.7 ALGUMAS INCONSISTÊNCIAS APRESENTADAS NA TEORIA DA GRAVITAÇÃO DE NEWTON E UMA BREVE PASSAGEM PELA TEORIA DA GRAVITAÇÃO DE EINSTEIN

No início do século XX ainda perdurava a Lei da Gravitação universal publicada por Newton em 1687, mas por volta de 1915 Einstein começou a ver inconsistências na gravitação apresentada por Newton. A Lei precisava ser revista a começar pelo planeta Mercúrio, por estar muito próximo do Sol portanto, sujeito a um campo gravitacional intenso. Mercúrio não se adaptava de jeito nenhum a Teoria da Gravitação Universal, muitos achavam que por erro da estrutura mecânica da Teoria Newtoniana. Nesse sentido a Teoria da Gravitação de Einstein estava mais acertada.

A trajetória de Mercúrio (Figura 42), em torno do Sol, a precessão do periélio de Mercúrio é medida pelo ângulo Ψ , na figura podemos ver as várias trajetórias de

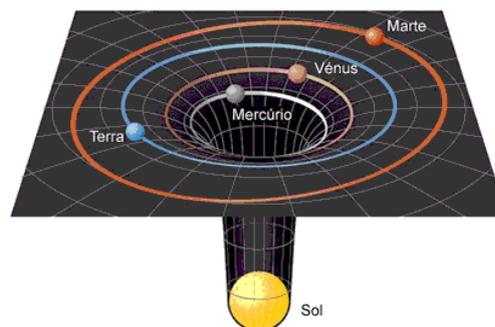
Figura 42 – Trajetória de Mercúrio



Fonte: Oswaldo Duarte Miranda

Mercúrio em torno do Sol, tanto no afélio como no periélio. Podemos dizer que foi o primeiro êxito de Einstein na formulação da Teoria Geral da Relatividade (T.G.R).

Figura 43 – Ilustração mostrando o planeta Mercúrio muito próximo do Sol

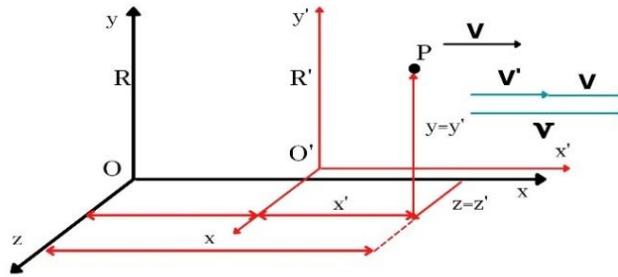


Fonte: Centro de Física Teórica e Computacional

O fato é que a gravitação Newtoniana apresentada em termos de um potencial gravitacional (\emptyset), não apresenta nenhum termo temporal, e sendo a força gravitacional uma força conservativa e derivada de um potencial podemos assim escrever usando a equação de Poisson $F_G = -\nabla\emptyset$ e a Lei da Gravitação Universal toma a seguinte forma $\nabla^2\emptyset = 4\pi G\rho$, onde G é a constante da gravitação universal ρ a densidade absoluta da massa m , colocada a uma certa altura próxima a superfície da Terra. A solução da equação de Poisson nos traz a informação que a velocidade de propagação do campo gravitacional é infinita, algo que Newton sabia, mas não resolveu.

A física de Newton tem como base o princípio da relatividade galileana, em outras palavras, as leis devem seguir as mesmas condições, independente do referencial adotado, no qual fazemos nossas observações (Figura 44).

Figura 44 – Princípio da relatividade galileana



Fonte: elaboração própria do autor (2022)

Usando as transformações de Galileu podemos escrever: $x = x' + v\mathcal{R}\mathcal{R}' .t$, onde $v\mathcal{R}\mathcal{R}'$ é a velocidade do referencial \mathcal{R} em relação ao referencial \mathcal{R}' , representada na figura acima por v . Se dispusermos de dois cronômetros A e B um colocado fixo em R e outro colocado em \mathcal{R}' , respectivamente, os instantes lidos em ambos serão idênticos $t' = t$ (princípio da simultaneidade de Galileu), o tempo é absoluto e é o mesmo em qualquer referencial. Nesse sentido em qualquer referencial inercial as leis da Mecânica são as mesmas, e qualquer aceleração produzida por uma força, segue a equação fundamental da mecânica $F = m . a$, as forças aplicadas nos referenciais R e \mathcal{R}' são as mesmas e com isso as acelerações são idênticas.

Na apresentação da Gravitação de Einstein modificações foram introduzidas na relatividade de Galileu, primeiro por Lorentz (transformações de Lorentz), e Fitzgerald, dois matemáticos que introduziram dois coeficientes γ e δ .

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \text{ e } \delta = \frac{1}{1-vv'/c^2} X' = \gamma(X - V.t) \text{ e } V' = \delta(V - V')$$

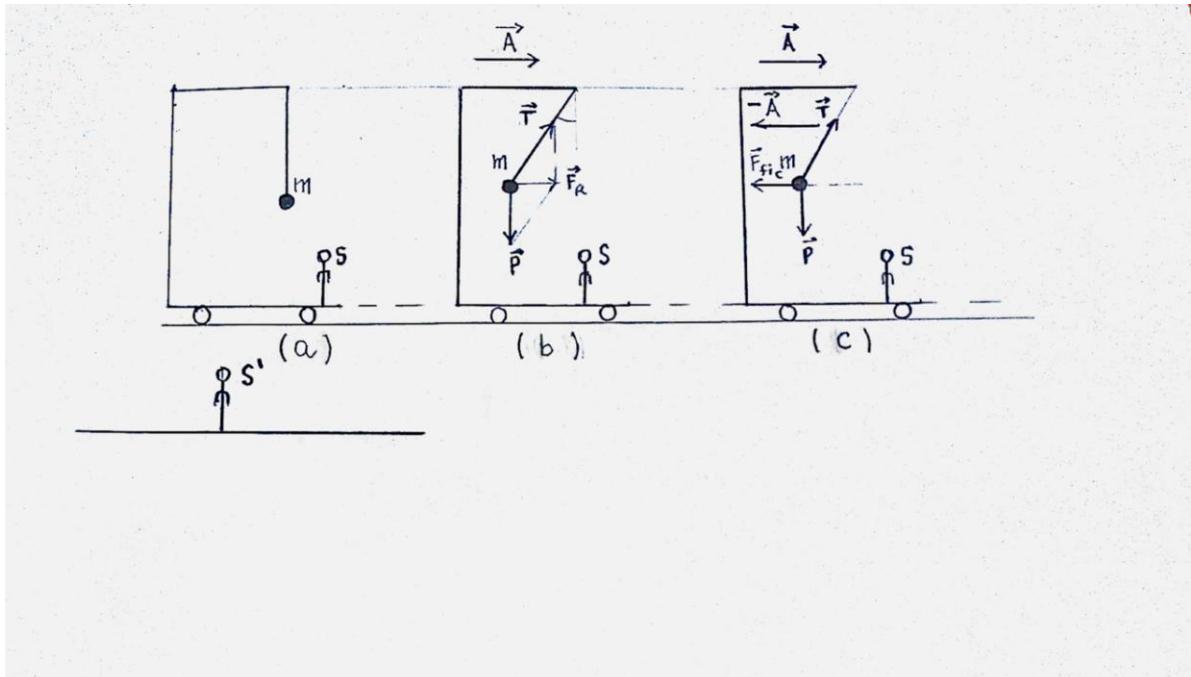
O tempo deixa de ser absoluto e passa a ser relativo, nesse sentido as Leis de Newton devem, portanto, sofrer essas modificações. E estas modificações nos remete a teoria da relatividade restrita ou especial de Einstein. Em referenciais inerciais, a relatividade especial segue dois postulados, as leis da Física são as mesmas e a velocidade da luz no vácuo é constante.

Em referenciais não-inerciais (Figura 45), as leis de Newton não se aplicam, devido não se ter clareza da origem da força que produz uma aceleração, vejamos no exemplo a seguir: Na figura (a) tem-se uma plataforma, onde se tem um observador S, um pêndulo preso

¹⁴ V' , representa a velocidade de P em relação a \mathcal{R}' , V representa a velocidade de \mathcal{R}' e V representa a velocidade de P em relação a R.

a um fio de massa desprezível. Um observador S' está fixo no solo. A seguir a plataforma passa a ter uma aceleração A , representada nas figuras (a) e (b).

Figura 45 – Referenciais não-inerciais



Fonte: elaboração própria do autor (2022)

Sabemos que as leis de Newton são válidas para referenciais inerciais, mas podemos usar o Princípio da Equivalência de Einstein que estabelece uma equivalência entre um referencial inercial e um não-inercial. Nesse sentido o observador S' interpreta o que está representado na figura (b), e o observador S que se encontra num referencial não-inercial, interpreta o que ocorre na figura (c), ele associa uma aceleração a uma força não existente, fictícia.

2.7.1 Uma breve passagem pela Teoria da Gravitação de Einstein (1915)

Einstein na sua Teoria da Relatividade Geral, mostra que, massa e energia se equivalem, como evidencia a famosa equação: $E=mc^2$, além disso, espaço e o tempo (que é linear), formam um espaço-tempo tetradimensional (comprimento, largura, altura e o tempo), na visão de Einstein massa e energia provocam a curvatura do espaço-tempo que orienta a dinâmica do Universo. Einstein foi o primeiro a usar a geometria não-Euclidiana no movimento dos corpos.

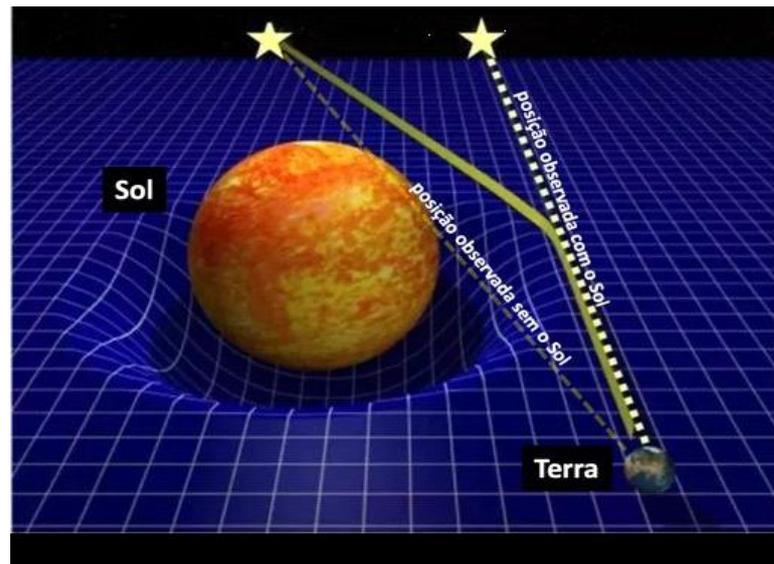
2.7.1.1 O eclipse de Sobral (Ceará)

Em 29 de maio de 1919 durante o eclipse total do Sol, na cidade de Sobral no Ceará, uma expedição inglesa comprovou o que Einstein havia previsto, e fez uma extraordinária observação e conseguiu provar empiricamente a curvatura da luz quando esta passava próxima do Sol, essa deflexão da luz se deve não em função de uma força, mas em função de um corpo massivo, mostrando que a Teoria da Gravitação Einsteiniana estava mais acertada, em outras palavras, Einstein estava ajustando a teoria da Gravitação Universal de Newton. A Teoria Einsteiniana unificava Tempo-Espaço, Energia e Matéria.

Podemos dizer que na ausência de grandes campos gravitacionais e baixas velocidades a Teoria da Gravitação Universal de Newton é perfeitamente válida.

Abaixo, na Figura 46, temos uma representação, embora artística, mostrando o desvio da luz quando esta passa por um campo gravitacional muito intenso.

Figura 46 – Representação artística do desvio causado pela atração gravitacional do Sol sobre o raio de luz de uma estrela



Fonte: David Jarvis

Para um observador na Terra essa é uma posição aparente da estrela. A figura abaixo ilustra a deformação da curvatura espaço-tempo de acordo com relatividade geral proposta por Einstein. A curvatura do espaço-tempo era devida à presença de matéria.

Como a descoberta da deflexão da luz se tratava de algo extraordinário a notícia foi publicada num jornal de grande circulação em sua primeira página (Figura 47).

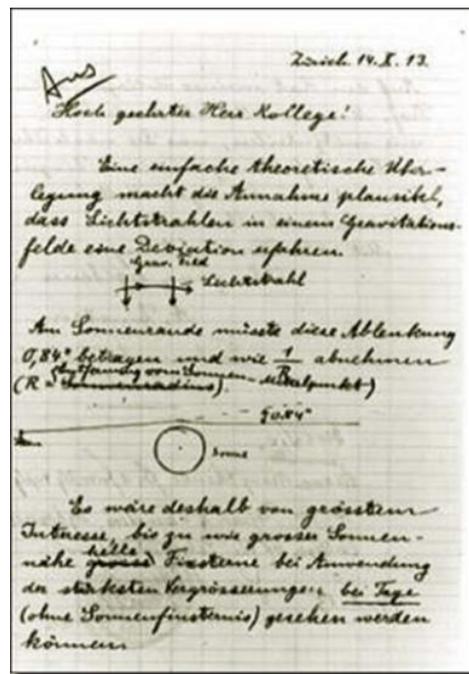
Figura 47 – Notícia sobre a descoberta da deflexão da luz



Fonte: London News (1919)

Em uma carta Einstein descreve o desvio da luz ao passar pelo Sol (Figura 48)

Figura 48 – Imagem da carta escrita por Einstein



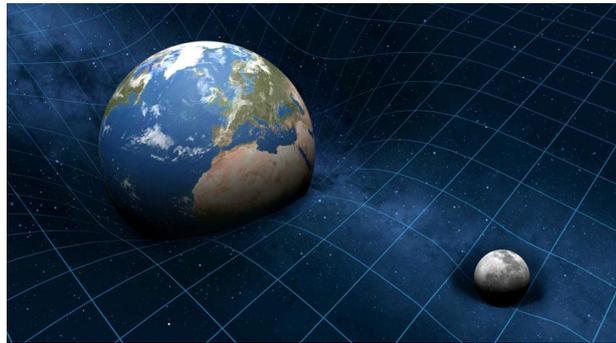
Fonte: Portal do Astrónomo

2.7.2 A teoria da Relatividade de Einstein

A beleza da equação de campo de Einstein na Teoria da Gravitação, também chamada de Teoria da Relatividade Geral, uma revolução conceitual que é a mudança na noção do espaço e tempo da física clássica para o conceito de espaço-tempo, onde se tem a ação da gravidade não por meio de uma ação à distância, mas sim porque a Lua segue, uma geodésica. É como se a matéria dissesse para o espaço como se curvar, e como se o espaço dissesse para a matéria como ela deve se movimentar.

A figura mostra a Terra e a Lua deformando o espaço-tempo. Tecido espaço-tempo.

Figura 49 – Terra e a Lua deformando o espaço-tempo



Fonte: Mark Garlick

Esta imagem mostra que os objetos celestes fazem entalhes no tecido do espaço-tempo. A Terra, sendo 81 vezes mais massiva que sua lua (à direita), induz uma maior curvatura. De acordo com a relatividade geral, esta curvatura é o que nós percebemos como gravidade.

A equação de campo, assim foi formulada por Einstein (1915): $G_{\mu\nu} = 8\pi G.T_{\mu\nu} / c^4$, onde $G_{\mu\nu}$ é o tensor de curvatura do espaço-tempo de Einstein, o segundo termo da equação representa a matéria. É uma equação diferencial de segunda ordem em termos do tensor métrico $\Lambda g_{\mu\nu}$, e $T_{\mu\nu}$ é o tensor de energia-momento. A constante de acoplamento se dá em termos de π , c é a velocidade da luz e G é a constante da gravitação universal.

$8\pi G.T_{\mu\nu} / c^4 = R_{\mu\nu} - g_{\mu\nu}.R / 2 + \Lambda g_{\mu\nu}$, onde $R_{\mu\nu}$ é o tensor de curvatura de Ricci, R é o um escalar de curvatura de Ricci e Λ é a constante cosmológica. Aparte da direita da equação de Einstein representa a geometria do espaço-tempo e a parte da esquerda o conteúdo de matéria-energia do espaço-tempo.

Cita-se que Einstein tomou a única anomalia da Teoria da Gravitação que existia na época, que era o efeito anômalo da precessão do periélio de Mercúrio, e conseguiu explicar esse efeito. Mas, em 1896, Simon Newcomb (1835-1909), havia detectado não uma, mas seis

anomalias no movimento dos planetas do Sistema Solar, que não eram explicados pela Teoria da Gravitação. Uma delas era a precessão do periélio de Mercúrio, a outra a precessão do periélio de Marte, essas duas cabem na Teoria da Gravitação de Newton, as outras quatro não eram explicadas pela Teoria da Relatividade Geral.

[...]

A Teoria da Relatividade Geral não fechou o ciclo, além de não ter resolvido todos os problemas astronômicos, existem problemas teóricos dentro dela que são muito importantes, como a possibilidade de ciclos casuais.

A tendência em cada instante é que os cientistas pensam que chegaram ao ponto final e, portanto, não precisam fazer mais nada. A minha opinião é que daqui a 300 anos, nós teremos uma diferença tão grande entre a Teoria da Gravitação do futuro e a Teoria da Relatividade Geral quanto a diferença entre esta e a mecânica e a Gravitação newtoniana.

3 CONCLUSÃO

A ciência está sempre em busca da verdade e isto pode levar algum tempo, que nós não podemos prever. Pode levar dias, meses e até séculos para se aperfeiçoar uma teoria que se manteve durante séculos. A historicidade da ação à distância e da lei da gravitação universal de Newton nos mostra isso.

A partir da publicação da lei da gravitação universal de Isaac Newton em 1687, no *Princípios da Filosofia Natural*, muito se discutiu a respeito da sua aceitação. Na Inglaterra, por exemplo, foi muito bem aceita, mas na Europa continental a situação se colocou muito diferente. Ao longo dos tempos, alguns importantes personagens contribuíram muito na discussão sobre a ação à distância. Muito antes de Aristóteles, os Pré-Socráticos tinham a ideia de Cosmos e os fenômenos naturais estavam ligados aos caprichos de Deus. Para Aristóteles existiam duas físicas uma supralunar e uma sublunar que depois foram unificadas por Newton. Kepler e Galileu serviram de inspiração para Newton em seu trabalho sobre a ação à distância e a gravitação universal.

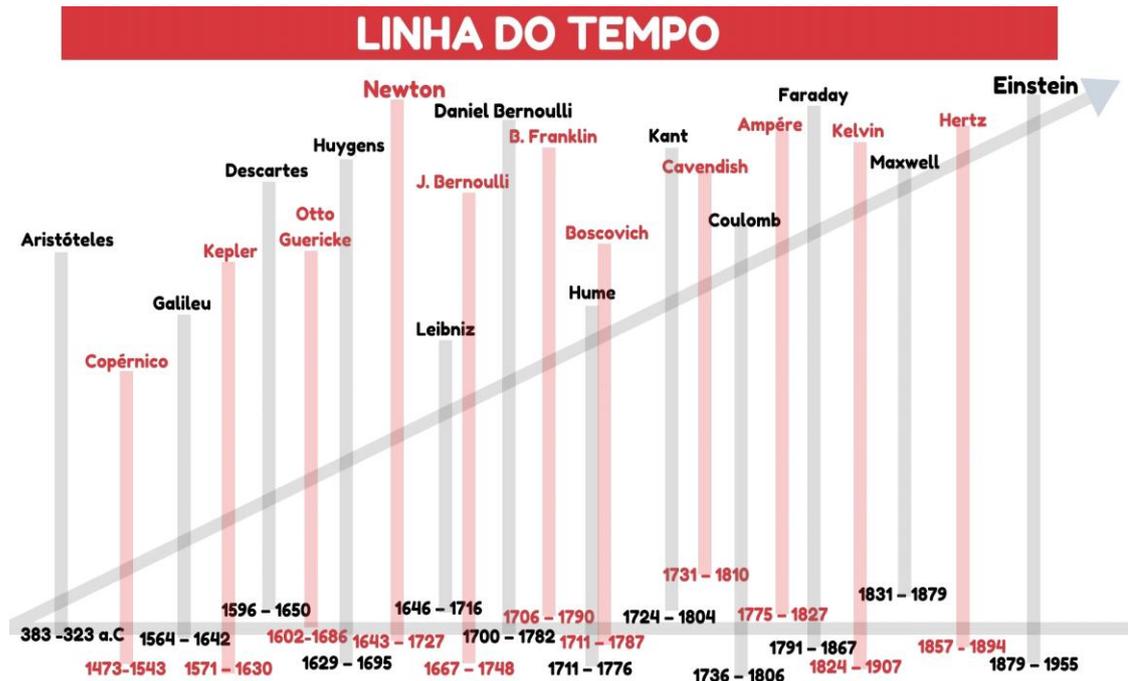
Leibniz, Hooke e John Flamsteed foram bastante críticos à Teoria da Ação à Distância, houve uma disputa intelectual principalmente John Flamsteed um astrônomo que se recusou a publicar suas observações. Huygens e John Bernoulli foram mais condescendentes com Newton. Podemos assim dizer que o senso comum é muito difícil de ser construído a partir de um contexto histórico-filosófico, o senso comum é constantemente questionado e problematizado.

Cem anos após de sua publicação, a lei da gravitação universal, surgiram vários questionamentos desde Faraday até Einstein. O eletromagnetismo introduz o conceito de campo e coloca dúvidas a respeito da ação à distância. Faraday e Maxwell apresentam suas razões e, finalmente, Einstein prova a não instantaneidade da lei universal.

Uma declaração de Einstein define Isaac Newton “a natureza era um livro aberto, cujas letras ele sabia ler sem esforço”.

A título puramente didático mostramos uma linha do tempo de alguns filósofos e cientistas que ajudaram de alguma maneira na construção dessa teoria apresentada por Newton.

Figura 50 – Linha do tempo



Fonte: elaboração própria do autor (2022)

REFERÊNCIAS

- BOSCOVITCH, R. J. **A Theory of Natural Philosophy**. M.I.T. Press, Cambridge, 1966.
- BRITO, A. A. S. O plano inclinado: um problema desde Galileu. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 2, n. 2, p. 57-63, 1985.
- FEYNMAN, R. P. **Física Em Seis Lições**. Rio de Janeiro: Ediouro, 7ª ed., 2004.
- HESSE, M. B. **Forces and a Fields: the concept of Action at a Distance in the history of physics**. Edinburgh: Thomas Nelson and Sons, 1970.
- JAMMER, M. **Conceito de força: estudo sobre os fundamentos da dinâmica**. Tradução Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto: Ed. PUC-Rio, 2011.
- KUHN, T. **A estrutura das revoluções científicas**. São Paulo: Perspectiva, 13ª ed., 2017.
- _____. Notas sobre a experiência e o saber de experiência. **Revista Brasileira de Educação**. n. 19, Jan/Fev/Mar/Abr, 2002.
- MARTINS, M. R.; et al. A concepção de força de Roger Boscovich. **Ensino & Pesquisa**, v. 17, n. 2, 2019.
- MARTINS, R. A. Alguns aspectos da teoria da gravitação. **Perspicillum**, v. 4, n. 1, p. 9-15, 1990.
- NEWTON, I. **Philosophiae Naturalis Principia Mathematica** (2nd ed., London, 1713), m, General Scholium to Prop. XLII; ed. Of F. Cajori, Berkeley, 1947.
- NEWTON, I. **Textos, antecedentes, comentários** / escolhidos e organizados por Bernard Cohen, Richard S. Westfall. Tradução Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto: EdUERj, 2002.
- SILVA, M. C.; KRAPAS, S. Controvérsia ação à distância / ação mediada: abordagens didáticas para o ensino das interações físicas. **Revista Brasileira de ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 471-479, 2007.
- SPENCER, J. B. **Boscovich's Theory and its Relation to Faraday's Researches: An Analytic Approach**. Archive for History of Exact Sciences, v.4, n.3, p. 184-202, 1967.
- TORT, A.; CUNHA, A.; ASSIS, A. K. T. Uma tradução comentada de um texto de Maxwell sobre a ação à distância. História da Física e Ciências afins. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, n. 26, v. 3, 2004.
- VEIGA-NETO, A. Paradigmas? Cuidado com eles! In: COSTA, M. V. **Caminhos investigativos II**. Outros modos de pensar e fazer pesquisa em educação. Rio de Janeiro, Lamparina Editora, p. 35-47, 2002.
- WESTFALL, R. **The Construction of Modern Science Mechanisms and Mechanics**. Cambridge University Press, Cambridge, 1977.