

Elaine Maria de Andrade Senra

# AÇÃO A DISTÂNCIA E NÃO- LOCALIDADE



Elaine Maria de Andrade Senra

AÇÃO A DISTÂNCIA E NÃO-LOCALIDADE

Editora UNIFESO

2019

Copyright© 2019

Direitos adquiridos para esta edição pela Editora UNIFESO

**Coordenação Editorial**

João Cardoso de Castro

**Assistente Editorial**

Jessica Motta da Graça

**Formatação**

Jessica Motta da Graça

**Revisão**

Roberto Loureiro Junior

**Capa**

Thiago Pereira Dantas (Thierry)

S481 Senra, Elaine Maria de Andrade

Ação à distância e não- localidade. / Elaine Maria de Andrade Senra. --- Teresópolis: Editora UNIFESO (Coleção FESO), 2019.

152p.

ISBN: 978-85-93361-41-8

Inclui bibliografia

1. Lei da Gravitação de Newton. 2. Teoria da Relatividade. 3. Lei da Gravitação de Einstein. I. Senra, Elaine Maria de Andrade. II. Título.

CDD 530

**EDITORA UNIFESO**

Avenida Alberto Torres, nº 111

Alto - Teresópolis - RJ - CEP: 25.964-004

Telefone: (21)2641-7184

E-mail: [editora@unifeso.edu.br](mailto:editora@unifeso.edu.br)

Endereço Eletrônico: <http://www.unifeso.edu.br/editora/index.php>

## **CONSELHO DIRETOR**

Antônio Luiz da Silva Laginestra

**Presidente**

Jorge Farah

**Vice-Presidente**

Luiz Fernando da Silva

**Secretário**

José Luiz da Rosa Ponte

Kival Simão Arbex

Paulo Cezar Wiertz Cordeiro

Wilson José Fernando Vianna Pedrosa

**Vogais**

Luis Eduardo Possidente Tostes

**Diretor Geral**

## **CENTRO UNIVERSITÁRIO SERRA DOS ÓRGÃOS – Unifeso**

Antônio Luiz da Silva Laginestra

**Chanceler**

Verônica Santos Albuquerque

**Reitora**

Verônica Santos Albuquerque

**Pró-Reitoria Acadêmica Interina**

José Feres Abido de Miranda

**Pró-Reitoria de Desenvolvimento Institucional**

Elaine Maria de Andrade Senra

**Diretora de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão**

Edenise da Silva Antas

**Diretora de Educação a Distância**

Ana Maria Gomes de Almeida

**Diretora do Centro de Ciências Humanas e Sociais**

Mariana Beatriz Arcuri

**Diretora do Centro de Ciências da Saúde**

Vivian Telles Paim

**Diretora do Centro de Ciências e Tecnologia**

Michele Mendes Hiath Silva

**Diretoria de Planejamento**

Solange Soares Diaz Horta

**Diretoria Administrativa**

Rosane Rodrigues Costa

**Diretoria Geral do Hospital das Clínicas de Teresópolis Costantino Ottaviano**

Roberta Franco de Moura Monteiro

**Diretoria do Centro Educacional Serra dos Órgãos**

# Coleção FESO

A **Coleção FESO**, desde 2004, tem sido o principal meio de difusão da produção acadêmica do Centro Universitário Serra dos Órgãos - Unifeso, realizada a partir das atividades de ensino, pesquisa e extensão dos seus cursos de graduação e pós-graduação, assim como das suas unidades assistenciais e administrativas.

Primando pela qualidade dos produtos editorados e publicados, a Editora UNIFESO publica conteúdos relevantes nas mais diversas áreas do conhecimento através de um cuidadoso processo de revisão e diagramação.

É uma das mais importantes contribuições da Instituição para a sociedade, uma vez que a sua divulgação influencia na recondução de políticas e programas na esfera pública e privada, de forma a fomentar o desenvolvimento social da cidade e região. Todo esse processo fortalece o projeto de excelência do Unifeso como Centro Universitário. Nossas publicações encontram-se subdivididas entre as seguintes categorias:

**Série Teses:** Contempla as pesquisas defendidas para obtenção do grau de “Doutor” em programas devidamente autorizados ou credenciados pela CAPES, publicadas em formato de livro.

**Série Dissertações:** Abarca as pesquisas defendidas para obtenção do grau de “Mestre”.

**Série Pesquisas:** Contempla artigos científicos, resenhas e resumos expandidos/textos completos. Estas produções são divulgadas em formato de livros (coletâneas), periódicos ou anais.

**Série Especiais:** Esta publicação contempla textos acadêmicos oriundos de processo de certificação de docentes como pós-doutores.

**Série Produções Técnicas:** Abrange produções técnicas advindas de trabalhos de docentes, discentes e funcionários técnico-administrativos sobre uma área específica do conhecimento que contemplem produtos ou serviços tecnológicos (com ou sem registro de proteção intelectual); processos ou técnicas aplicados; cartas e mapas geográficos. As formas de divulgação destas produções podem ser em meios impressos ou digitais, no formato de cartilhas, POPs (Procedimento Operacional Padrão), relatórios técnicos ou científicos e catálogos.

**Série Materiais Didáticos:** Reúne os trabalhos produzidos pelos docentes e discentes com vinculação aos componentes curriculares previstos nos projetos pedagógicos dos cursos ofertados no Unifeso.

**Série Arte e Cultura:** Abarca as produções artístico-culturais realizadas por docentes, técnicos-administrativos, estudantes, instrutores de cursos livres e artistas locais, assim como as produções desenvolvidas junto aos eventos do Centro Cultural FESO Pró-Arte (CCFP), podendo ser constituída por livros, partituras, roteiros de peças teatrais e filmes, catálogos, etc.

**Série Documentos:** Engloba toda a produção de documentos institucionais da FESO e do Unifeso.

A abrangência de uma iniciativa desta natureza é difícil de ser mensurada, mas é certo que fortalece ainda mais a relação entre a comunidade acadêmica e a sociedade. Trata-se, portanto, de um passo decisivo da Instituição no que diz respeito à compreensão sobre a importância da difusão de conhecimentos para a formação da sociedade que queremos: mais crítica, solidária e capaz de enfrentar as dificuldades que se apresentam.

Desejo a todos uma ótima leitura!

*Elaine Maria de Andrade Senra*

**Diretora de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão – Unifeso**

- *Em que tom começa?*

- *Sem tom.*

- *Sem tom? Não pode escrever música sem tom!*

- *A única maneira de escrever isso é sem armadura...*

**O Segredo de Beethoven**

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO **9**

CAPÍTULO I **22**

DA NATUREZA DA LEI DA GRAVITAÇÃO DE NEWTON

CAPÍTULO II **60**

*DA AÇÃO A DISTÂNCIA À AÇÃO MEDIADA: DE FARADAY A MAXWELL*

CAPÍTULO III **79**

*DA GRAVITAÇÃO DE EINSTEIN: A RELATIVIDADE GERAL DE EINSTEIN  
RETOMA O PROBLEMA DA AÇÃO A DISTÂNCIA?*

CAPÍTULO IV **99**

*AÇÃO A DISTÂNCIA E/OU NÃO-LOCALIDADE NA MECÂNICA QUÂNTICA*

CONSIDERAÇÕES FINAIS **115**

BIBLIOGRAFIA **126**

ANEXO I **139**

EINSTEIN: ETHER AND RELATIVITY **139**

ANEXO II **152**

*SUMÁRIO DE FIGURAS*

## Introdução

Falar em *ação a distância*, a priori, significa conjecturar que alguma *ação aqui* possa instantânea ou simultaneamente, causar um *efeito lá*, a uma distância qualquer, sem a interferência de algum mediador nesta interação. Apesar de parecer “mágico”, na física, o uso deste termo aconteceu principalmente com o início das teorias da gravidade e do eletromagnetismo. No instrumental matemático e físico do final do século XVII, época em que Newton escreveu sua obra *Principia*, a possibilidade na natureza de velocidades tão elevadas quanto se quisesse supor não contradizia a admissão de uma simultaneidade absoluta. Sendo assim, não havia nenhuma inconsistência física em propor uma interação instantânea entre dois corpos. A estrutura geométrica do espaço-tempo em Newton decorre fundamentalmente dessa aceitação: velocidades arbitrariamente elevadas. O problema maior talvez estivesse na propagação da ação de um corpo ao outro sem o contato mútuo, em um espaço vazio.

No caso da gravitação de Newton, por exemplo, como uma massa poderia reconhecer a outra agindo sobre ela à distância sem nenhum meio interposto? Como essa ação seria propagada? Intuitivamente, a necessidade de um meio capaz de propagar esta ação sempre pareceu primordial. Newton, em sua teoria da Gravitação Universal, se recusou a conjecturar uma possível causa para a gravitação dizendo “*hypotheses non fingo*”. Para Newton, o problema estava justamente em se tentar atribuir uma causa à gravidade. Em uma carta a Richard Bentley (1662-1742)<sup>1</sup>, escreve:

---

<sup>1</sup> De Newton a Bentley, 17 de janeiro de 1692/3. (NEWTON, 1687)

vez por outra, o senhor fala na gravidade como essencial e inerente à matéria; rogo-lhe não me atribuir essa idéia, pois a causa da gravidade é algo que não tenho a pretensão de conhecer e, portanto, levaria mais tempo para considerar.

Admitir que a gravidade pudesse ser incluída entre as chamadas qualidades essenciais da matéria, ao lado da impenetrabilidade, inércia, coesão etc., foi algo acerca do qual Newton não se pronunciou.

As questões da *Óptica*<sup>2</sup> de números 25 a 31, especificamente a de número 31, mostram o quanto Newton se envolveu com o problema de atribuir uma causa à gravidade. Na “Nota à Segunda Edição” desta obra, escreveu:

No fim do Terceiro Livro acrescentei algumas questões. E para demonstrar que não considero a gravidade como propriedade essencial dos corpos, acrescentei uma questão concernente à sua causa, escolhendo propô-la como uma questão porque ainda não estou convencido dela por falta de experimentos.<sup>3</sup>

Contudo, numa interpretação da teoria da Gravitação Universal de Newton, particularmente de seus aspectos metafísicos e metodológicos, Kant coloca que

é impossível exigir que a possibilidade de forças fundamentais seja tornada compreensível; elas são chamadas fundamentais porque não podem ser derivadas de qualquer outra, ou seja, não podem ser compreendidas.<sup>4</sup>

---

<sup>2</sup> NEWTON, 1706.

<sup>3</sup> NEWTON, op. cit.

<sup>4</sup> KANT, 1786.

Kant identificou as forças atrativas e repulsivas como forças fundamentais da matéria.

Ao se colocar desta forma, Kant se apóia no programa de uma “metafísica da natureza” apresentada por ele nos *Fundamentos Metafísicos das Ciências Naturais*, como condição necessária a uma legítima ciência da natureza. Por natureza, Kant entende o encadeamento dos fenômenos, quanto à sua existência, com base nos juízos sintéticos a priori, a partir dos quais a própria natureza e a experiência são possíveis. Para Kant, os princípios matemático-transcendentais determinam a *essência* dos fenômenos.

“Explicar” o que empiricamente é obtido nunca foi uma tarefa trivial para a ciência. Ao contrário, em alguns momentos parece necessário abrimos mão de certa dose de realismo. Teorias são somente teorias, formulações epistemológicas, humanas, que buscam explicar uma possível realidade externa sem necessariamente ter que possuir total identidade com a mesma. Não obstante, se explicar o mundo em que vivemos significa explicar a causa última dos fenômenos, o sentido da palavra “explicar” parece vir, progressivamente, se restringindo a cada passo que o homem dá em busca do conhecimento da realidade. Hoje, não sabemos se estamos realmente em contato com uma possível realidade, ou mesmo se podemos aspirar a tanto.

A ciência moderna a partir de Galileu, propôs explicar *como* as coisas acontecem, abandonando os “por quês” e “para quês” característicos da física aristotélica. Dessa forma, das descobertas feitas até Newton nasceu um universo em que parecia não existir nada na natureza que não pudesse ser descrito experimentalmente, ou através de um modelo, ou ainda pelas leis da mecânica de Newton. O

“demônio de Laplace” foi a figura que melhor encarnou o espírito determinista deste período, criando a figura da “vasta inteligência” que, de posse do conhecimento das variáveis mecânicas das partes e partículas que compõem o universo, seria capaz de prever completamente o futuro deste, em seus menores detalhes.

Ao longo do século XVIII, ao associar o movimento dos corpos celestes ao dos corpos terrestres, propondo que as forças dirigidas para todos os corpos terrestres são as mesmas dirigidas aos corpos celestes, Newton abriu mão da “essência” aristotélica, rompendo a linha demarcatória de um mundo perfeito – supralunar – e um mundo corruptível – sublunar. A física aristotélica atribuía ao corpo uma essência responsável pelo seu movimento, acreditando que através do conhecimento desta poderíamos explicar o mundo. Esta essência poderia ser alcançada através do conhecimento de quatro causas: a causa material, a formal, a eficiente e a final. A “causa material” seria aquilo de que é feita uma coisa, por exemplo, a madeira de um entalhe; a “causa formal”, aquilo que essa coisa vai ser, ou seja, a forma determinada de cada coisa; a “causa eficiente” seria algo que provoca a mudança, como os golpes do escultor sobre a madeira; e a “causa final” seria aquilo para o qual é feita a coisa, ou seja, o fim em si.

É importante, no entanto, observarmos que a teoria da causalidade de Aristóteles constitui o pólo oposto da teoria da causalidade entre os modernos. Para a ciência moderna, a causalidade está relacionada com eventos que acontecem ao longo do tempo na natureza, segundo leis regulares; mas para Aristóteles, a causalidade não é sucessão das coisas no tempo regularmente encadeadas umas às outras. Aristóteles não tem da causalidade a idéia que Hume tem. A causalidade, para Aristóteles, é parte da estrutura do ser. Por isso sua

concepção de causalidade é uma concepção genética, interna da própria coisa.

A partir do mecanicismo da física iluminista newtoniana, busca-se uma nova forma de causalidade, a chamada “causalidade necessária”, que subjaz a noção de ordem natural das coisas, e cujas leis é tarefa da física constituir, através das relações entre os fenômenos que estabelecem a ordem natural, assim como, pela demonstração empírica dessas relações.

Existem diferentes vertentes e interpretações do que veio, a partir de então, a se constituir em uma causalidade física, que se estabelece em ruptura com o sentido metafísico de causalidade que lhe era anteriormente associado. Será através das leis do movimento formuladas como princípios e expressas pelo cálculo diferencial que a idéia de causalidade física é considerada indissociável de seu efeito, que é a mudança de movimento. A causalidade física está associada à causa eficiente ligada à mudança de movimento, que pode ser do tipo mecânico e do tipo dinâmico. É de especial importância para nosso trabalho a transição de uma causalidade do tipo mecânico para a causalidade do tipo dinâmico, inseridas na concepção de causalidade física. Nesta transição, ocorre um significativo deslocamento do ponto de vista filosófico.

A idéia de uma causalidade do tipo mecânico tem como base a geometria, o tempo como parâmetro externo e as forças de contato, que ocorrem durante os choques entre partículas impenetráveis. É um modelo cinético que podemos chamar de mecanismo “tipo Descartes”. Neste modelo, somente as formas geométricas, sua distribuição espacial e os choques entre as partículas são responsáveis pelas cadeias causais. O modelo causal newtoniano, também considerado um modelo mecânico, difere do modelo tipo Descartes por propor a

existência de forças radiais emanadas de centros materiais de forças. A inspiração para este modelo, que se tornou uma “visão de mundo”<sup>5</sup>, ocorreu devido ao sucesso obtido pela mecânica celeste newtoniana.

A transição desta causalidade do tipo mecânico a outra, em que uma visão globalizante de universo, de harmonia universal, simetria e conservação preponderavam, está associada ao nome de Leibniz e a sua concepção racionalista de mundo. A proposta de conservação da *vis-viva* estabelece uma nova forma de enxergar o mundo, um princípio ordenador e unificador, exemplo das harmonias universais garantidoras da racionalidade e do funcionamento orgânico do conjunto do universo. Tal concepção de causalidade será um elemento inspirador na constituição da concepção dinamicista desenvolvida por físicos de gerações posteriores, de Boscovich a Oersted, de Faraday a Maxwell<sup>6</sup>.

Durante todo o tempo em que predominava a visão de mundo mecanicista, acreditava-se que se estaria tendo acesso à própria realidade essencial do mundo. As teorias mecânicas não seriam uma forma de descrição, mas a própria natureza seria mecânica em si mesma. A crítica a essa visão de mundo irá se intensificar com o ceticismo de Hume e a interpretação kantiana de tal ceticismo, ao dizer que Hume o havia acordado do sono dogmático. Esta postura desencadeará novas abordagens epistemológicas para novos problemas abordados pelas ciências físicas no decorrer do século XIX.

Dentre essas novas abordagens se sobressairão: a ascensão do positivismo e do fenomenalismo, uma releitura do empirismo indutivista, a reconstrução de uma interpretação dinamicista da natureza a partir de uma física baseada em modelos, representações e

---

<sup>5</sup> MERZ, 1904, apud KOEHLER, 1995.

<sup>6</sup> KOEHLER, 1995.

analogias, assim como a rejeição anti-racionalista da “Naturphilosophie”, movimento que surgiu no final do século XVIII em oposição às idéias do Iluminismo. Para os adeptos da “Naturphilosophie”, a natureza era um todo orgânico - matéria e fenômenos naturais eram resultados de forças de atração e repulsão - podendo então, todos os fenômenos químicos, biológicos, mecânicos, elétricos ou magnéticos serem reduzidos a tais forças.

Ao se considerar, no século XIX, que o fundamento material do universo, onde se processam os fenômenos físicos, é um contínuo espacial e temporal, através do qual se propagam e interagem ondulações de energia, “cargas” ou “massas,” surge uma nova concepção de causalidade, a do tipo dinâmico. Mediante esta concepção, torna-se muito difícil, ou por vezes impossível, separar as “causas” de seus “efeitos”. “Causas” e “efeitos” são substituídos por propagações no espaço e tempo, e torna-se uma questão saber se foi o movimento ou alteração das cargas ou massas que provocaram a perturbação espaço-temporal no campo, ou se foi alguma perturbação no campo o que perturbou as cargas. As coisas passam em grande parte a depender da formulação do problema e do ponto de vista do observador. A noção de causalidade dinâmica, aliando o conceito de campo com o princípio da energia e com os princípios abstratos mais gerais dos teoremas integrais, remonta suas origens ao que chamou “causalidade tipo Leibniz”<sup>7</sup>.

Assim, a conjectura de como se dá a ação de um corpo sobre o outro está no cerne de questões fundamentais referentes a concepções e visões de mundo estabelecidas ao longo da história e da filosofia da ciência. Propomos neste trabalho, valorizar as controvérsias

---

<sup>7</sup> KOEHLER, op. cit.

científicas e as inquietações filosóficas na construção destas teorias. É fato que a ciência não se constrói com a linearidade apresentada nos manuais didáticos; em algumas situações, parece que o pensamento científico caminha em espirais, fazendo com que teorias aparentemente novas e revolucionárias contenham teorias antigas há muito abandonadas. O conceito de ação a distância instantânea, por exemplo, banido da física a partir da elaboração do conceito de campo, retorna, aparentemente, na tentativa de explicação do emaranhamento quântico.

No artigo *Uma ameaça quântica para a relatividade especial*, publicado em março de 2009 pela revista *Scientific American*, os autores David Z. Albert e Rivka Galchen colocam que o “emaranhamento viola uma de nossas mais profundas intuições sobre o mundo: a da localidade. [...] A mecânica quântica traz de volta a ação a distância como uma propriedade do emaranhamento, implicando no assustador e radicalmente contra-intuitivo fenômeno chamado não-localidade”.

Assim, a questão central deste trabalho consiste em interpretar o conceito ação a distância instantânea advindo da Teoria da Gravitação de Newton sob uma perspectiva epistemológica. Como também, discutir se este problema (ação a distância) persiste de algum modo no conceito de campo, na teoria da relatividade de Einstein e na não-localidade apresentada pela mecânica quântica.

A partir desta pesquisa, espera-se contribuir para a concepção de que a ciência não se constitui numa produção hermética de conhecimentos, mas sim numa construção humana, inserindo o homem na natureza como parte da própria natureza em transformação. Mais ainda, inserindo também a natureza no homem, como parte da própria condição humana em seu devir histórico. Isto

porque, nas controvérsias científicas, como nos conflitos sócio-históricos, os “vencidos” e seus pontos de vista não são sumariamente esquecidos e apagados em definitivo, como se jamais houvessem existido. Antes, ao que parece, deslocam-se para camadas mais profundas e silenciosas da cultura de que são parte, de onde são resgatadas, às vezes como anacronismo ou, por outra, como aparente coincidência, senão mera repetição do passado, a despeito da novidade que porventura possa conter.

A abordagem metodológica desta pesquisa será a da análise documental de fontes primárias e secundárias da produção científica. Pretendemos realizar uma pesquisa documental de períodos e contextos específicos na História da Ciência, em que ora o conceito de ação a distância é afirmado, ora tal afirmação é negada e ainda momentos em que, afirmação e negação se fundem produzindo uma nova proposição, uma unidade num nível superior de entendimento, numa concepção dialética característica na teoria do conhecimento. A partir desta abordagem metodológica e da referida estratégia, esperamos uma aproximação consistente com a questão proposta no estudo.

No primeiro capítulo deste trabalho, propomo-nos a discutir a Lei da Gravitação de Newton – teoricamente, o desencadeador da idéia de uma ação a distância instantânea, em que a existência do meio se apresenta sujeita a interpretações dúbias. Leibniz surge neste contexto como um severo crítico às especulações cosmogônicas de Newton. Uma destas críticas se refere à necessidade da intervenção permanente de Deus no universo, o qual, segundo interpretação de Leibniz da teoria de Newton, sofria um constante declínio em sua potencialidade e regularidade, necessitando, assim, de uma constante intervenção divina para o seu perfeito funcionamento. Admitir que a atração

gravitacional pudesse ocorrer por meio de algo “invisível, intangível e não-mecânico”, na avaliação de Leibniz, é o mesmo que admitir se tratar de algo “inexplicável, ininteligível, precário, sem fundamento e sem exemplo”<sup>8</sup>. Este debate nos remete a uma questão fundamental deste trabalho - discutir as diferentes visões ou possibilidades de constituição deste “meio” que, para Newton, era designado como “espaço absoluto”. E por mais estranho que isso possa parecer, Newton tanto nos incita à idéia da ação a distância – bastante clara na lei da gravitação – quanto a sua própria negação, evidenciada nas cartas escritas a Bentley. Este fato acaba desencadeando algumas outras questões do tipo: até que ponto uma ação a distância instantânea num espaço absoluto tem o mesmo significado de uma ação a distância instantânea no vazio? Partindo do princípio de que este espaço absoluto se mostra real empiricamente – a famosa experiência do balde – qual seria seu papel? O de um *plenum*? Finalizando este capítulo, pretendemos abordar a teoria de Boscovich em que as concepções de força e matéria se associam de forma singular, criando a possibilidade de um futuro regresso para a construção do conceito de campo a partir de Faraday.

Pretendemos no segundo capítulo dar continuidade ao estudo do conceito de campo de Faraday a Maxwell, ressaltando neste contexto a necessidade imposta pelos fenômenos elétricos e magnéticos de um “meio” que transmitisse uma ação contígua. Faz parte deste momento, em um contexto específico, a negação da afirmação do conceito de ação a distância; e é neste recorte que pretendemos nos focar. Apesar de, para Faraday, a idéia da ação a distância ser uma realidade nos fenômenos relativos à atração

---

<sup>8</sup> LEIBNIZ, Quinta carta, §120. in: “Os Pensadores”, 1983.

gravitacional, o mesmo não ocorria para fenômenos elétricos e magnéticos, o que o leva a propor uma ação contígua ou mediada.

No terceiro capítulo pretendemos abordar a Lei da Gravitação de Einstein a partir da seguinte questão: o problema da ação a distância na gravitação de Newton é solucionado com a Teoria da Relatividade Geral de Einstein?

Qual a grande mudança conceitual/matemática de Newton para Einstein? A estrutura geométrica do espaço-tempo em Newton decorre fundamentalmente da aceitação de velocidades arbitrariamente elevadas. Mas, e se não se aceitar que a Natureza admita que sistemas físicos se propaguem a uma velocidade infinita? Admitir uma velocidade limite para a luz implica no abandono da moldura espaço-temporal newtoniano e a utilização do chamado espaço-tempo de Minkowski, palco para o advento da Teoria da Relatividade Restrita.

Iniciamos esse capítulo abordando a teoria da relatividade restrita de Einstein, de 1905, como representante de um corte profundo entre a física do século XIX a do século XX. A nova interpretação do tempo estabelecida por Einstein fez desabar as crenças newtonianas acerca de um espaço e tempo absoluto, distintos em si mesmo:

O tempo absoluto, real e matemático, por si só e por sua natureza, flui uniformemente, sem relação com qualquer coisa externa, e recebe também o nome de duração. [...] O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, mantém-se sempre semelhante e imóvel. (NEWTON, [1687] 2002, p. 283)

A união espaço-tempo leva a uma nova concepção da interação/relação entre o observador, o espaço e o tempo, intrinsecamente distinta da de Newton.

Daqui em diante, o espaço, por si só, e o tempo, por si só, estão condenados a desvanecer-se em meras sombras, e apenas um tipo de união dos dois conservará uma realidade independente. (MINKOWISKY, Goett. Nachr, 1908)

A seguir, abordamos alguns aspectos da Teoria da Relatividade Geral. O espaço/palco newtoniano, passivo, em que se transcorriam todos os fenômenos, transforma-se, ele mesmo, num sistema físico criado pela própria distribuição de massa e energia. A partir da relatividade geral, as “forças” gravitacionais decorrem da curvatura do espaço-tempo. Nesse cenário, os corpos continuam a percorrer entre dois pontos o caminho mais curto; no entanto, numa superfície curva, o caminho mais curto entre dois pontos não é uma reta, mas sim uma curva que se associa à estrutura desse cenário. Devido à nossa percepção tridimensional, interpretamos essa trajetória como causada por “forças” gravitacionais.

O quarto e último capítulo sintetiza as discussões realizadas ao longo do texto e, a partir da controvérsia “ação a distância” e/ou “não-localidade”, apresenta conclusões e sugestões para futuros desdobramentos desta pesquisa. O emaranhamento quântico traz à baila o problema da ação a distância? John Bell (1928-1990), em 1964, quando em licença-prêmio de seu trabalho no CERN – o grande centro acelerador de partícula de Genebra – resolveu investigar a questão da realidade quântica e do paradoxo de EPR<sup>9</sup>, devido ao fascínio que tais

---

<sup>9</sup> Experiência elaborada por Einstein, Podolsky e Rosen, a fim de demonstrar que a teoria quântica era incompleta.

questões exerciam sobre ele desde seus dias de estudante. Deduziu então o teorema que leva seu nome – Teorema de Bell – que diz que nenhum modelo local de realidade pode dar suporte aos fatos quânticos; em síntese, diz que a realidade deve ser necessariamente não-local. Isto significa, em essência, que existe na natureza uma aparente “ação a distância”, sem mediações. Uma interação não-local salta de um corpo A para um corpo B sem tocar em nada entre eles, sem necessidade de uma mediação. Uma interação não-local, em resumo, é não mediata, não atenuável e instantânea.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> Herbert, 1989, pp.239-251.

## CAPÍTULO I

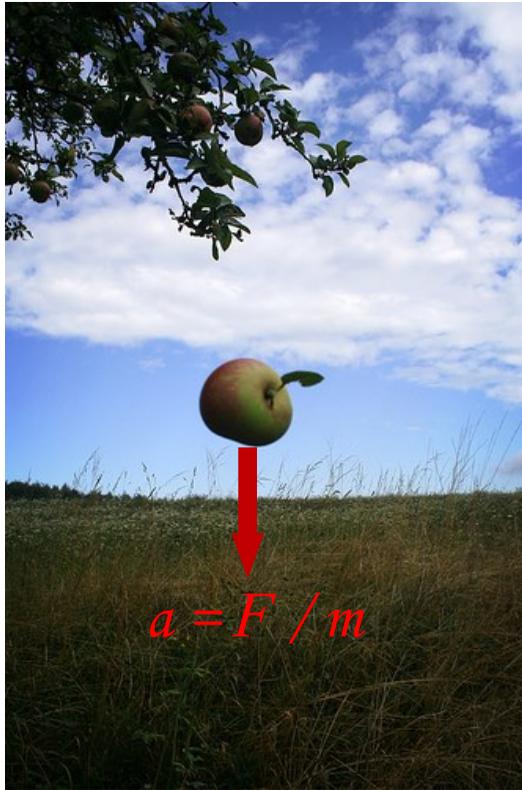
### Da Natureza da Lei da Gravitação de Newton

#### 1.1 LEI DA GRAVITAÇÃO DE NEWTON

O que diz a Lei da Gravitação? Que todo corpo exerce uma ação sobre outro corpo, atraindo-o com uma força que é proporcional à massa de cada um, e varia inversamente com o quadrado da distância entre eles. Matematicamente, essa afirmação pode ser escrita da seguinte forma:

$$\mathbf{F} = \mathbf{G} \mathbf{M} \mathbf{m} / \mathbf{r}^2$$

onde  $\mathbf{M}$  e  $\mathbf{m}$  representam as massas dos corpos,  $\mathbf{r}$  a distância entre eles, e  $\mathbf{G}$  a constante da Gravitação Universal, igual a  $6,6734 \times 10^{-11}$  Nm<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>.



*Figura 1. Proporcionalidade entre Força aplicada e aceleração.*

Todo corpo submetido a uma força resultante responde a ela acelerando sempre na mesma direção e sentido da aplicação dessa força, com uma intensidade que é inversamente proporcional à massa do objeto, conforme indicado na figura 1.

Mas como surgiu essa lei? Que significado podemos dela traduzir?

Do século II ao início do século XVI, a idéia de que a Terra ocupava imóvel o centro do universo e os demais astros giravam ao seu

redor servia de sustentação para questões morais e científicas do homem do Ocidente. Não obstante, em 1510, o astrônomo polonês Nicolau Copérnico (1473-1543) perturbou a ordem estabelecida ao apresentar sua hipótese heliocêntrica, ou seja, o Sol passou a ocupar o centro do Universo. Aceitar o sistema copernicano implicava mudanças significativas; não só religiosas, mas também para a explicação de fenômenos já fundamentados pela ciência aristotélica. O movimento dos astros deixava de estar ligado ao primeiro motor, passando a depender da distância dos planetas em relação ao Sol. Retirar a Terra do centro do Universo implicava uma revisão na física aristotélica. Era preciso admitir que a Terra, através de algum princípio, assumia sua própria gravidade. Essa questão não era simples, Copérnico não conseguiu estabelecer um conceito de gravidade que explicasse essa queda dos corpos<sup>11</sup>.

Nessa época ocorriam grandes debates sobre se era afinal o Sol ou a Terra que ocupava o centro do Universo com os planetas girando ao seu redor. Para Tycho Brahe (1546-1601), um astrônomo dinamarquês, esses debates sobre o movimento dos planetas poderiam ser melhor entendidos se se conhecesse as posições reais dos planetas no céu com precisão. Em 1572, observou uma nova estrela no céu e comparou sua observação com a de outros astrônomos, em diferentes locais, concluindo que ela estava muito além da Lua. Esta conclusão ia contra a concepção aristotélica de que o céu era imutável. Alguns anos mais tarde, em 1577, em seu observatório na ilha de Hven, perto de Copenhague, observou um grande cometa. Mais uma vez concluiu que não só se localizava além da Lua, como também que atravessaria os *orbis planetários*, de tal forma que as supostas *esferas*

---

<sup>11</sup> BRAGA, GUERRA e REIS, 2004, p.72.

*crystalinas* da ciência aristotélica não poderiam existir. Trabalhando intensivamente, construiu tabelas com as posições dos planetas durante vários anos.

Tycho Brahe não aceitava a teoria de Copérnico. Para ele, se a Terra se movimentasse como proposto no modelo heliocêntrico haveria a possibilidade de se medir a paralaxe estelar, ou seja, a aparente mudança espacial dessa estrela causada pela mudança de posição da Terra. No entanto, em suas observações, não conseguia determinar qualquer paralaxe. Modificou então o sistema Ptolomaico, aproveitando as medições de distâncias planetárias de Copérnico, e construiu um sistema próprio com a Terra no centro, a Lua orbitando mais próxima e, em seguida, o Sol, com todos os outros planetas girando ao seu redor, e não ao redor da Terra!<sup>12</sup>

Após a morte de Tycho Brahe, suas tabelas e teorias foram estudadas por seu assistente, o matemático alemão Johannes Kepler (1571-1630). Kepler, além de grande matemático, foi também um grande místico que acreditava na *harmonia da natureza*. Para ele a estrutura do Universo era de natureza matemática, o que o fazia crer que os mistérios do cosmos poderiam ser desvelados pela mesma. No início de suas pesquisas sobre o movimento dos corpos celestes, trabalhou com dois pressupostos aristotélicos: o do círculo como a forma perfeita, o que o levou a inferir que esta deveria ser a trajetória dos corpos celestes, e a idéia de que os planetas se moviam com velocidades constantes em suas trajetórias.

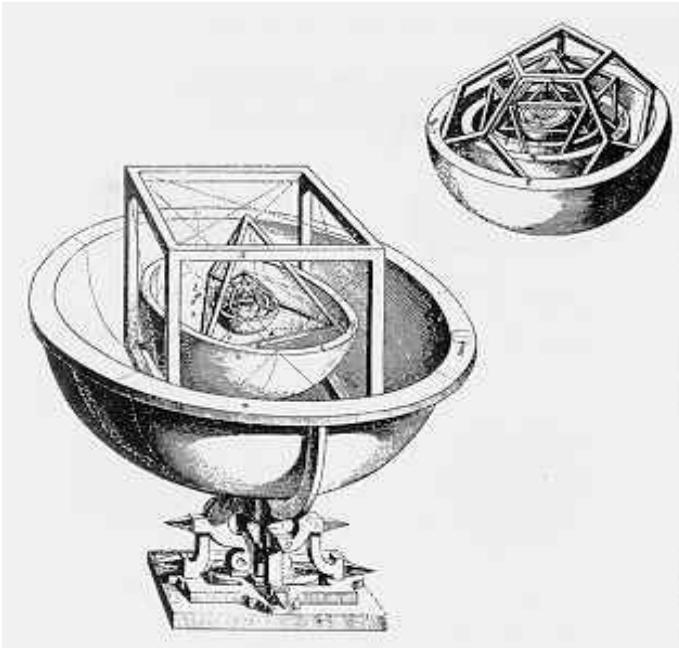
Kepler aceitava o heliocentrismo de Copérnico. Em seu livro *Mysterium Cosmographicum*, de 1596, buscou explicar o porquê das

---

<sup>12</sup> PESSOA, 2004.

distâncias planetárias terem os valores que tinham, segundo o cálculo de Copérnico. Como acreditava que a estrutura do Universo era de natureza matemática, construiu a idéia de que as órbitas dos seis planetas conhecidos na época deveriam estar associadas aos cinco poliedros regulares. Essa hipótese ia ao encontro de sua crença na *Harmonia do Mundo*. Não seria por acaso a existência de exatamente seis planetas e somente cinco poliedros regulares. A órbita mais externa, de Saturno, teria inscrito em si um cubo, que teria inscrito em si a esfera de Júpiter, seguido de um tetraedro, esfera de Marte, dodecaedro, esfera da Terra, icosaedro, esfera de Vênus, octaedro e esfera de Mercúrio conforme a figura 2. As medições astronômicas se aproximavam dessa teoria.

Após anos de estudos, Kepler concluiu que nem o modelo de Tycho nem o de Copérnico correspondiam ao resultado por ele obtido em seus estudos. Desconstruiu a hipótese das *esferas cristalinas* e, concentrando-se em estudos sobre Marte, concebeu a órbita real dos planetas supondo circular a órbita de Marte.



*Figura 2. Modelo astronômico de Kepler (1695), com seis esferas planetárias encaixadas em poliedros regulares.*

Encontrou, porém, erros de oito minutos de arco concluindo que tal movimento não seria uniforme.

Uma vez que a bondade divina nos deu Tycho Brahe, o mais cuidadoso dos observadores, de cujas observações divergem os meus cálculos em oito minutos de longitude [...], é justo que o reconheçamos com gratidão e façamos uso desta dádiva de Deus [...]. Porque se eu tivesse podido considerar desprezíveis oito minutos de longitude, já teria corrigido suficientemente a hipótese [...] descoberta no capítulo XVI. Mas como não podiam ser negligenciados, estes oito minutos abriram caminho a uma reforma completa da astronomia e constituíram o assunto

principal de grande parte deste trabalho.  
(KEPLER, [1609], 1992).

Voltou, a partir de então, sua atenção para a órbita da Terra, chegando à chamada *lei das velocidades*, segundo a qual a velocidade  $v$  da Terra seria inversamente proporcional à sua distância  $R$  do Sol:  $v \propto 1/R$ . Newton mostrará mais tarde que esta lei é errônea. No entanto, foi a partir dela que Kepler chegou a sua segunda lei: a *lei das áreas*. A partir dos dados das tabelas de Tycho Brahe, Kepler elaborou suas três leis para o movimento dos planetas. Interessante observar que para construir tais leis, ele precisou romper com suas idéias metafísicas à medida que elas não se ajustavam aos dados observacionais das tabelas de Tycho.

Em sua obra *Astronomia nova... de motibus stellae Martis* (1609), Kepler apresentou suas duas primeiras leis do movimento planetário. A terceira lei elaborou aproximadamente dez anos depois. É uma lei diferente das outras duas por se referir não apenas a um planeta individualmente, mas relacionar um planeta a outro. As três leis de Kepler são assim enunciadas:

- Cada planeta se desloca ao redor do Sol em uma elipse, com o Sol em um foco.

- O raio vetor do Sol ao planeta percorre áreas iguais em intervalos de tempo iguais.

- Os quadrados dos períodos de dois planetas quaisquer são proporcionais aos cubos dos semi-eixos maiores de suas respectivas órbitas<sup>13</sup>:  $T \sim a^{3/2}$ .

---

<sup>13</sup> Feynman, Leighton, Sands. *Lectures on Physics*, 1977, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.

Suas três leis acerca do movimento dos corpos celestes desenhavam com transparência, um modelo físico capaz de dar significado aos dados observacionais e matemáticos. Porém, mais do que buscar conhecer o movimento dos planetas e astros celestes, Kepler se perguntava sobre a natureza das *forças celestes*. Para ele, os astros se moviam devido a uma *ação* do Sol que denominou *anima motrix* ou *alma motiva*; essa interação sol/planetas teria sua linha de ação passando pelo Sol, para o qual é dirigida. Conseqüentemente, no Sol estaria a origem da força de atração.

Em 1621, ao publicar a segunda edição do seu livro *Mysterium Cosmographicum*, Kepler introduziu uma nota considerando esta *vis (força)* de natureza corpórea. Mas o que causaria a variação das distâncias? Por que em alguns momentos os astros se encontravam mais próximos ao Sol enquanto em outros, mais afastados? A partir da obra de William Gilbert, *De Magnete*, publicada em 1600, Kepler passou a considerar um mecanismo segundo o qual a atração entre o Sol e os planetas seria de natureza magnética. O Sol seria um ímã em que o pólo norte estaria em sua superfície e o pólo sul em seu centro. A Terra teria um eixo magnético apontando numa direção fixa, e seria atraída pelo Sol durante metade de sua órbita e repelida durante a outra metade<sup>14</sup>. A partir do trabalho de Kepler, a concepção das *esferas cristalinas* da ciência aristotélica, que já havia sido abalada pelo trabalho de Tycho Brahe, cedeu lugar a um modelo em que os astros percorriam trajetórias elípticas previstas pelo espaço.

---

<sup>14</sup> WESTFALL, 1977.

Enquanto Kepler prosseguia em busca da *harmonia dos mundos*, outro personagem contribuía também, fortemente, para o salto *mágico* dado por Newton. Esse personagem foi Galileu Galilei (1564-1642) que, na mesma época de Kepler, estudava o movimento dos corpos tanto na superfície da Terra como em queda livre. Em relação ao movimento dos corpos terrestres, Galileu fez importantes modificações em relação à ciência aristotélica, como por exemplo, a da idéia de que o movimento dos corpos se dá em busca de seu lugar natural. Através de argumentos lógicos e descrição de experiências, Galileu mostrou que corpos de massas diferentes, livres da resistência do ar, caíam ao mesmo tempo se abandonados da mesma altura. O movimento deixa de ser uma essência dos corpos; nenhum corpo seria móvel ou imóvel, mas estaria em movimento ou em repouso em relação a outros corpos.

Outra importante contribuição de Galileu para a compreensão das leis de Kepler foi o *conceito de inércia*. Antes de Galileu, acreditava-se que um corpo só permanecia em movimento sob a ação de uma força, o repouso seria o seu estado natural. Galileu, entretanto, foi contrário a essa idéia do movimento ser um estado necessariamente *forçado*<sup>15</sup>. Para ele, os corpos possuem uma tendência natural em manter o seu estado de repouso ou de movimento, essa tendência seria uma propriedade intrínseca à matéria por ele denominada de *inércia*. Assim, devido à *inércia*, todo corpo em repouso tende a permanecer em repouso, e todo corpo em movimento tende a permanecer em movimento. Seguindo esse caminho, Galileu se voltou para o estudo matemático do movimento

---

<sup>15</sup> FEYNMANN, op. cit.

dos corpos, mas importa ressaltar que a questão de *o que faz os corpos se moverem*, continuava em aberto.

Para Galileu, o conhecimento da natureza deveria ser construído a partir da observação dos fenômenos tais como ocorrem, e não como os explica a pura especulação. À observação, Galileu uniu a experimentação e a matemática, considerada por ele a verdadeira linguagem da natureza. Sua violenta oposição à ciência aristotélica se dá especificamente quando busca descrever os fenômenos observados em uma linguagem matemática. Em 1604, Galileu elabora a lei da queda livre dos corpos, fundamental para todo o desenvolvimento posterior da mecânica racional. Em 1612, publica *Discurso sobre as Coisas que Estão sobre a Água*, em que contesta a teoria aristotélica dos quatro elementos sublunares e do éter, adotando a concepção de Demócrito, atomista, do universo material.

Em sua obra *Diálogo sobre os Dois Maiores Sistemas*, publicada em 1632, Galileu confronta as idéias de Ptolomeu, segundo o qual a Terra seria estática e o Sol giraria em torno dela, com as de Copérnico, que afirmava exatamente o contrário. Essa publicação veio a lhe custar a convocação do Tribunal do Santo Ofício. Sobre esse acontecimento existem versões muito diferentes, às vezes contraditórias, mas o fato é que Galileu continuou a viver e, em 1638, publicou clandestinamente *Discurso a Respeito de Duas Novas Ciências*, considerado a obra mais madura por ele escrita, em que recapitula os resultados de suas primeiras experiências e acrescenta algumas reflexões sobre os princípios da mecânica.

Com uma nova maneira de abordar os fenômenos da natureza, Galileu estruturou todo o conhecimento científico da época abalando os alicerces que fundamentavam a concepção medieval de mundo. Desconstruiu a idéia de que o mundo possui uma estrutura finita,

hierarquicamente organizada, construindo a visão de um universo aberto, indefinido e de movimento eterno. Mostrou, finalmente, que “o livro da natureza está escrito em caracteres matemáticos; sem um conhecimento dos mesmos, os homens não poderão compreendê-lo”<sup>16</sup>.

Com isso, os trabalhos de Tycho Brahe, Kepler e Galileu, ao longo dos séculos XVI e XVII, permitiram visualizar o início de profundas modificações em relação à visão de mundo medieval na física nascente. Isso não significava, contudo, que as influências metafísicas tinham sido eliminadas. Por exemplo, tanto Copérnico como Kepler acreditavam, por motivos religiosos, na uniformidade do movimento dos planetas impelidos por uma causa constante e infalível de origem divina<sup>17</sup>. Apesar das significativas mudanças por eles apresentadas, foi somente a partir de Galileu, com o estudo do movimento dos corpos na Terra, que se abandonou a idéia da causa final aristotélica. Para Galileu, a questão era *como* os fenômenos acontecem, ao invés de *para que* acontecem.

Alexandre Koyré, em *O Significado da Síntese Newtoniana*, fez uma análise desse período ressaltando que foi a partir dele que as causas formais e finais, como possibilidade de explicação, desapareceram da ciência, sendo substituídas por causas eficientes e materiais, pois somente estas tinham sua existência admitida no novo Universo onde corpos abstratos se movem em um espaço abstrato. Em consequência a tantas transformações, o século XVII apresenta a marca de uma ruptura, na qual antigas e novas concepções se confrontam em busca de uma ciência unificada, capaz de explicar os fenômenos através de suas causas e de demonstrar, a priori, todos os

---

<sup>16</sup> GALILEU, in: “Os Pensadores” (1978), pp.93-98.

<sup>17</sup> BURTT, E. apud PINGUELLI, 2005, vol I, p.129.

mecanismos subjacentes a eles. Surge, então, a idéia de que o conhecimento das formas e dos movimentos das partículas poderia levar ao pleno entendimento da natureza, que a todo efeito encontrado haveria um sistema de partículas ou fluidos relacionados entre si por forças passivas de ação e reação<sup>18</sup>.

Essa idéia está, de certa forma, associada a uma *mecanização da imagem do mundo* que se estabeleceu a partir da Revolução Científica. Considerada por alguns autores com seu início no século XVII, a Revolução Científica apresenta um caráter de intervenção do homem na natureza, que deixa de ser contemplada e passa a ser objeto da atividade humana<sup>19</sup>. Em sua essência, essa Revolução se caracteriza pela unificação do estudo do movimento dos corpos na Terra com o do movimento no Céu, ou seja, a unificação da física terrestre com a celeste, rompendo com a concepção aristotélica do cosmo, em que este era dividido em duas regiões: a celeste, onde se moviam as estrelas e os planetas – incluindo o Sol –, e o mundo sublunar, ou seja, abaixo da órbita da Lua, substituindo-a pela concepção científica do universo.

Como um pólo oposto a essa visão mecanicista do universo se desenvolve, a partir do século XVIII, uma outra concepção: o dinamicismo. Na filosofia dinamicista todos os fenômenos da natureza, inclusive a matéria, seriam manifestações de força. Não forças passivas de ação e reação, mas uma força vital. No dinamicismo, o Universo era visto como um ser harmônico, orgânico, de modo que todos os seus fenômenos estavam relacionados. Esse elo integrador não residia no fato de todos os fenômenos serem explicados a partir da idéia de força e movimento entre partículas ou fluidos materiais. O

---

<sup>18</sup> HENDRY, 1986.

<sup>19</sup> PINGUELLI, 2005, vol. 1, p. 128.

princípio unificador era mais que isso. Havia na natureza uma força vital.

O conceito matemático de força, apresentado por Newton no século XVIII, possibilitou o debate mecanicismo *versus* dinamicismo: ou as forças eram tratadas como inerentes à matéria ativa (visão dinâmica), ou como alguma coisa sobreposta à matéria inerte, passiva, como um componente na maquinaria mecânica. Se esse último ponto de vista fosse adotado, havia ainda uma escolha a ser feita entre o tratamento dessa força como elementar, ou como sendo sujeita a explicação em termos de algum meio etéreo. Se esse meio fosse introduzido, a questão original se colocava – ele poderia ser dinâmico ou mecânico, caso fosse considerado uma matriz de forças ou um fluido material respectivamente<sup>20</sup>.

Como diferença fundamental entre estas duas tradições, mecanicista e dinamicista, encontram-se o significado dos modelos mecânicos e a idéia de unificação. Para os mecanicistas, uma concepção era clara quando era possível representá-la por uma imagem. O concebível era reduzido às fronteiras do que podia ser desenhado<sup>21</sup>. Para os dinamicistas, os modelos eram hipóteses valiosas que serviam como guias e ilustrações, e não necessariamente uma descrição verdadeira da natureza. Outra diferença marcante era em relação ao conceito de *unificação*: os mecanicistas consideravam o fato de que todo fenômeno pudesse ser reduzido aos mesmos elementos básicos: matéria e movimento. Já os dinamicistas consideravam a unificação uma necessidade epistemológica. Para eles, as leis científicas derivavam de propriedades comuns da mente humana, e esta unidade de origem se refletia através das formas do espaço-

---

<sup>20</sup> HENDRY, 1989.

<sup>21</sup> COLERIDGE, 1956, *apud* HENDRY, p.25.

tempo, das leis de causa-efeito, e das estruturas da dinâmica racional. A partir de tais questões, a analogia passou a desempenhar um papel de fundamental importância na física: para os mecanicistas as analogias representavam a realidade; para os dinamicistas a analogia era um guia para a teoria, não uma representação de realidade. O uso das analogias abriu caminho para o uso de modelos mecânicos na tradição dinamicista<sup>22</sup>.

Para o debate mecanicismo versus dinamicismo Isaac Newton (1642-1727) foi um personagem fundamental. Físico, matemático, astrônomo e filósofo natural, construiu suas imagens de ciência e de mundo a partir dos trabalhos de Galileu, Kepler e Descartes. Sua aproximação com a alquimia não se deu no sentido de querer *produzir ouro*, de acordo com a imagem popular sobre alquimia até o século XX. Muito além dessa concepção e, provavelmente, muito mais próxima a Newton, estava a idéia de que a alquimia estava associada a uma concepção da natureza e de seus fenômenos radicalmente diferentes, em quase todos os aspectos, da concepção mecanicista de natureza. Para os alquimistas existia na natureza algo de *orgânico*. Eles falavam em *geração, morte e putrefação*, principalmente ao descreverem fenômenos mecânicos. Para os alquimistas, havia uma única matéria comum que era tida como compondo todas as substâncias da natureza; o ouro era a forma mais perfeita que ela podia alcançar. Supunha-se a existência de um agente ativo, fonte da transformação das substâncias, que se ocultava em todas as coisas e era bloqueado pela matéria básica em que estava imerso. Os processos alquímicos deveriam purgar e purificar a matéria para que esse agente ativo ficasse livre para agir<sup>23</sup>.

---

<sup>22</sup> HENDRY, op. cit.

<sup>23</sup> NEWTON in: COHEN & WESTFALL, 2002, p.513

Havia em Newton um princípio filosófico que o aproximava da concepção que acreditava na existência de agentes imateriais na natureza e que estabelecia a primazia do espírito sobre a matéria no Universo. Essa concepção ia de encontro aos duros contornos da concepção mecanicista observada naquela época. Os primeiros registros de Newton, em torno de 1664, constam em um caderno que ele próprio intitula *Quaestiones quaedam philosophicae (Algumas questões filosóficas)*. Suas reflexões, registradas nesse caderno, vão ao encontro de uma nova leitura da filosofia natural, constituindo-se como primeiro passo na carreira científica de Newton. Nessa época, envolvido pela filosofia cartesiana do *Universo plenum*, propõe a existência de um meio etéreo que possui a mesma constituição do ar, porém mais ralo, sutil e fortemente elástico. Em suas palavras:

Mas não se deve supor que esse meio seja uma matéria uniforme, sendo antes composto, em parte, do corpo fleumático principal do éter e, em parte, de outros diversos espíritos etéreos, assim como o ar se compõe do corpo fleumático do ar, misturado com vários vapores e exalações. Os eflúvios elétricos e magnéticos e o princípio da gravitação parecem defender tal variedade. Talvez toda a estrutura da natureza não seja nada além de texturas diversas de alguns espíritos ou vapores etéreos, que são como que condensados por precipitação, da mesma maneira que os vapores se condensam em água. ...Assim, talvez todas as coisas possam ter-se originado do éter. (NEWTON in: COHEN & WESTFALL, 2002, pp. 32, 33).

É interessante observar que desde essa época, ao se referir a efeitos elétricos e magnéticos, Newton os associa a eflúvios, ou seja, a uma emanção sutil que se desprende dos corpos, enquanto que, quando se refere ao fenômeno gravitacional, associa-o a um princípio, um juízo elementar que serve de base a outros conhecimentos. Isso

nos leva a refletir sobre a distinção já feita por Newton acerca dos efeitos elétricos, magnéticos e gravitacionais. Ao se referir a fenômenos elétricos e magnéticos, relaciona-os a algo que penetra nos corpos e emana deles a partir de algum artifício. Já a gravitação seria uma “*condensação contínua de algum outro espírito etéreo*”. Algo inerente à própria natureza em si, de caráter universal e pleno.

Para os mecanicistas, o movimento dos corpos era causado por colisões. Isso explica o porquê de, no início de sua vida, Newton ser um plenista. Ao colocar um éter sutil, um meio imperceptível aos sentidos, mas capaz de transmitir efeitos por pressão e impacto, os filósofos mecanicistas criaram uma convenção que livrou a filosofia natural de reminiscências renascentistas, de incompreensíveis influências ocultas agindo à distância – por exemplo, a atração magnética e os efeitos lunares. Para Newton, somente tal éter mecânico, permeando o universo todo e fazendo-o pleno, poderia ser uma hipótese inquestionável. Através dele, ele podia explicar a gravidade e, até certo ponto, a coesão entre as partículas da matéria<sup>24</sup>.

Em seus “*Quaestiones*”, Newton conjectura que a gravidade poderia ser produzida por um tipo de corrente de éter que viria do espaço em direção a Terra com grande velocidade, impulsionando os corpos para baixo. E para que não houvesse um crescente acúmulo de éter no interior da Terra, era preciso supor que esse éter saísse de alguma forma:

A matéria que causa a gravidade deve passar por todos os poros de um corpo. [...] Pois ela deve descer muito rápida e prontamente, como se evidência pela queda dos corpos e pela grande pressão em direção à Terra. Deve subir de forma diferente da que desce, ou então teria, para elevar

---

<sup>24</sup> DOBBS, 1982, p. 512.

os corpos, uma força igual à que tem para empurrá-los para baixo e, assim, não haveria gravidade. Ela deve ascender com uma consistência mais maciça do que quando desce... (NEWTON in: COHEN & WESTFALL, 2002, pp 24, 25)

A corrente ascendente deveria ser menor, de tal forma que o efeito resultante seria um impulso dos corpos para baixo. Newton parece buscar, incessantemente, explicações mecânicas para os fenômenos naturais. No entanto, ao criar modelos, esses traziam consigo problemas que ele não conseguia resolver, e que talvez sejam de fato insolúveis. Por exemplo, qualquer que fosse a hipótese mecânica da gravitação, o éter, preenchendo o espaço entre os planetas, deveria oferecer resistência. Mas o movimento periódico dos planetas, de seus satélites e dos cometas não mostrava sinais dela.

Sua aproximação com a alquimia vai ao encontro de uma nova visão em relação à forma de interação entre os corpos, levando-o a uma síntese entre o atomismo de Boyle e a matematização de Descartes e Galileu. Para ele, o livro da natureza era escrito não somente em caracteres e palavras corpusculares, como também por uma sintaxe puramente matemática que os unia e conferia sentido ao texto: a força de atração. O mundo newtoniano não era, como o de Descartes, formado apenas de *matéria (ou extensão) e movimento*, caracterizado por um *plenum* de vórtices que estabelece uma dependência entre a matéria e o espaço, mas de uma *matéria* constituída por um número infinito de partículas, mutuamente separadas e isoladas, concretas, imutáveis e não idênticas. De um *movimento* que não afeta as partículas em si, mas apenas as transporta de um lado a outro no imenso e homogêneo vazio do *espaço absoluto*,

que existe a priori. Portanto, o mundo newtoniano é composto de *matéria, movimento e espaço*<sup>25</sup>.

Na década de 1680, Newton abandonou o projeto de construir modelos mecânicos de éter. Em sua obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (Princípios Matemáticos de Filosofia Natural)*, cuja primeira edição é de 1687, ele apresentou os fundamentos de seu trabalho. No primeiro livro, apresenta os princípios gerais da mecânica e definições básicas como a de *massa* e as suas três leis, nada dizendo sobre a gravitação. No segundo livro, discute o movimento dos corpos em meios resistentes, referindo-se às deficiências do modelo de vórtices de Descartes. No terceiro livro, aplica sua teoria para a descrição detalhada do sistema solar, mostrando que a lei da gravitação é a mesma para as luas de Júpiter, para os planetas em torno do Sol e para um corpo caindo na superfície da Terra. Apresenta, então, sua lei da força de atração gravitacional, em que corpos materiais agem a distância um sobre o outro sem, no entanto, fazer qualquer hipótese acerca da causa dessa atração.

Para os mecanicistas, Newton havia realizado um trabalho pela metade, pois apesar de ter construído uma lei matemática para o fenômeno da atração gravitacional, ele não foi capaz de explicar a causa mecânica dessa atração. Interessante é que o próprio Newton não aceitava a idéia da ação a distância como um fenômeno natural, como podemos ler em uma de suas cartas enviadas a Bentley, considerando que a ação a distância era impossível:

É inconcebível que a matéria bruta, inanimada, opere sem a mediação de alguma outra coisa, não material, sobre outra matéria e a afete sem contato mútuo, como deve ocorrer se a

---

<sup>25</sup> KOYRÉ, *apud* COHEN & WESTFALL, 2002.

gravitação, no sentido de Epicuro, for essencial e inerente a ela. E é por essa razão que desejei que você não atribuisse a gravidade inata a mim. Que a gravidade devesse ser inata, inerente e essencial à matéria, de modo que um corpo pudesse atuar sobre outro a distância, através de um vácuo, sem a mediação de qualquer outra coisa, por cujo intermédio sua ação e força pudesse ser transmitida de um corpo a outro, é para mim um absurdo tão grande que eu acredito que nenhum homem dotado de uma faculdade de pensamento competente em questões filosóficas jamais possa cair nele. A gravidade deve ser causada por um agente que atua constantemente de acordo com certas leis; mas se esse agente é material ou imaterial é uma consideração que deixo para os meus leitores. (NEWTON, Carta a Richard Bentley, 1692/93)

Utilizando-se da força de interação gravitacional entre dois corpos, mesmo sem entender de que maneira essa força se propagava de um corpo para outro, era possível explicar diversos fenômenos que não poderiam ser entendidos sem ela. Por esse motivo, tornava-se conveniente aceitar a “ação a distância” de um corpo sobre o outro na filosofia natural. Ao elaborar sua Lei da Gravitação Universal, ou seja, a Lei que diz que *matéria atrai matéria*, Newton se encontrava imerso em seus trabalhos de alquimia e, ao mesmo tempo, em um conjunto de leituras que vinha substituindo a filosofia natural aristotélica: os livros de René Descartes, Pierre Gassendi, Robert Boyle e outros. Essa diversidade desenvolveu em Newton uma característica singular, ou seja, em seus “*Quaestiones quaedam philosophicae*”, Newton associou a existência de um *plenum* – característica marcante da filosofia cartesiana – a seus estudos alquímicos, criando um *estado mágico da matéria* definido por uma essência atrativa intrínseca:

[...] os eflúvios elétricos parecem informar-nos que existe algo de natureza etérea condensado

nos corpos (p. 32). E, assim como essa matéria condensada, rarefazendo-se num vento etéreo pode provocar esses movimentos estranhos e, ao se condensar novamente, pode fazer com que a atração elétrica, com seu retorno para o vidro, ocorra em lugar do que é continuamente recondensado ali, também a atração gravitacional da Terra pode ser causada pela condensação contínua de algum outro espírito etéreo semelhante, não do corpo principal do éter fleumático, mas de algo muito fino e sutilmente difundido através dele, talvez de natureza untuosa ou viscosa, tenaz e elástica, e que tenha com o éter a mesma relação que tem com o ar o espírito aéreo vital\* que é necessário à conservação da chama e dos movimentos vitais. (NEWTON *in*: COHEN & WESTFALL, 2002, p. 33).

*“Algumas experiências realizadas nessa época identificavam um “espírito aéreo vital” no ar, capaz de manter a vida e a combustão).*

É fato que, a princípio, Newton foi adepto do plenum; a existência de um meio sutil, imperceptível aos sentidos, capaz de transmitir ações por pressão e impacto, tornou-se um pressuposto incontestável para os filósofos mecanicistas como também para o Newton estudante. No entanto, esse éter mecânico, passivo, responsável por transmissão de ação, durou pouco tempo para Newton. Em 1669 ele já havia começado a modificar sua filosofia mecanicista através de uma filosofia alquímica.

Para Newton, a ação mecânica jamais explicaria o processo de assimilação e transformação dos alimentos nos corpos dos animais, muito menos a variedade das formas existentes no mundo, as quais, de alguma forma, haviam brotado da matéria comum. A mudança apresentada por Newton em sua filosofia mecanicista se inicia com uma associação do éter passivo ao agente ativo alquímico, capaz de

agir sobre a matéria conferindo a ela uma propriedade intrínseca de atratibilidade. O éter mecânico original de suas “Quaestiones” cede lugar a um éter vital identificado como “alma material de toda a matéria”. Para Newton, os processos alquímicos seriam um resumo da ação providencial, e não mecânica, de Deus no mundo. As forças, virtudes, meios, princípios *ou* espíritos, “requerem a presença do divino na ordem natural, que a gravidade universal demonstra a onipresença de Deus Pai”.

[...] a principal tarefa da filosofia natural é argumentar a partir dos fenômenos, sem construir hipóteses, e deduzir as causas dos efeitos até chegarmos à primeiríssima causa, que decerto não é mecânica; e é não apenas desvendar o mecanismo do mundo, mas principalmente solucionar estas e outras questões semelhantes: o que existe nos lugares quase esvaziados de matéria, e como é que o Sol e os planetas gravitam uns para os outros, sem que haja matéria densa entre eles?...E, sendo tratadas com acerto essas coisas, não se evidencia pelos fenômenos que existe um Ser incorpóreo, vivo, inteligente e onipresente, que, no espaço infinito, como se fosse em seu sensorio, vê intimamente as coisas em si e as percebe com minúcia, e as compreende inteiramente pela presença imediata delas em si mesmo...? (NEWTON, Óptica, Questão 28, 1704).

Na forma final de seu Livro III dos *Principia*, Newton afirma que as atrações entre os corpos “*provêm da natureza universal da matéria*”. No entanto, insistia em distinguir a demonstração matemática que deveria existir para essa atração, da especulação sobre a natureza dessa atração. Em 1713, na publicação da segunda edição dos *Principia*, Newton escreve um posfácio intitulado *Escólio Geral*, em que faz o seguinte comentário:

Até hoje, entretanto, não pude descobrir a causa dessas propriedades da gravidade dos fenômenos, e não invento hipóteses (hypotheses non fingo); pois o que quer que não seja deduzido dos fenômenos deve ser chamado de hipótese, e as hipóteses, sejam elas metafísicas ou físicas, de qualidades ocultas ou mecânicas, não têm lugar na filosofia experimental. Nessa filosofia, as proposições particulares são inferidas dos fenômenos e, posteriormente, generalizadas por indução. [...] E, para nós, basta que a gravidade realmente exista, e aja de acordo com as leis que explicamos, e sirva abundantemente para esclarecer todos os movimentos dos corpos celestes e de nossos mares. (NEWTON in: COHEN & WESTFALL, 2002, pp. 154-5).

Seja como for, o newtonianismo, desenvolvido a partir do século XVIII, adotou como certa a existência de forças agindo a distância, acreditando que tentar explicar essas forças através de modelos mecânicos seria inútil e até mesmo, indesejável. É fato que os corpos se atraem mutuamente agindo uns sobre os outros (ou, pelo menos, comportam-se como se o fizessem). Mas, *como* isso acontece, “superando o hiato do vazio que os separa e os isola radicalmente uns dos outros, ninguém, nem mesmo Newton, era ou é capaz de explicar ou compreender esse como. Essa é a tragédia da mente moderna que resolveu o enigma do Universo, mas apenas para substituí-lo por outro enigma: o enigma de si mesmo” (KOYRÉ, “O significado da síntese newtoniana”, in: COHEN & WESTFALL, 2002).

## 1.2 CRÍTICA DE LEIBNIZ ÀS IDÉIAS COSMOLÓGICAS DE NEWTON

O trabalho de Newton sobre a teoria da gravitação foi aceito rapidamente na Inglaterra, contudo, no Continente a situação era diferente. Lá, os cartesianos consideravam a noção de atração como

uma qualidade oculta, uma rendição ao aristotelismo e um retrocesso às influências imateriais e simpatias que tinham sido banidas da física tão recentemente e com tanta dificuldade<sup>26</sup>. Em sua obra *Lettres Philosophiques*, Voltaire coloca que:

chegando a Londres, um francês descobre-se em um mundo completamente mudado. Ele o deixara cheio e o encontra vazio. Em Paris, o Universo compõe-se de vórtices de matéria sutil; em Londres não há nada semelhante. Em Paris, tudo é explicado por uma pressão que ninguém entende; em Londres, por uma atração que também ninguém compreende.<sup>27</sup>

Newton de início conjecturou um meio universal, um éter que deslocaria os corpos em direção uns aos outros apresentando os fenômenos da natureza como produtos das interações mecânicas entre os corpos. No entanto, em uma análise profunda do movimento dos vórtices cartesianos, concluiu no Livro II de seus *Principia* que o conceito cartesiano de redemoinhos ou vórtices de matéria, nos quais os planetas seriam carregados em torno do Sol, não poderiam explicar os movimentos observados no céu. Newton concluiu que os corpos atraíam uns aos outros e que essa atração podia ser definida matematicamente de forma precisa.

Mesmo assim, Newton fazia freqüentes menções a Deus em seus trabalhos. Para ele, Deus não era apenas um mero engenheiro construtor do mundo que, após colocá-lo em movimento, poderia se retirar. Ao contrário, Deus atuava o tempo todo no mundo, constituindo um “absoluto” em que os eventos iriam se

---

<sup>26</sup> HESSE, 1962, p. 157.

<sup>27</sup> COHEN e WESTFALL, 2002.

desenrolando<sup>28</sup>. Esse “espaço absoluto”, essa ubiqüidade, foi por ele chamado de *Sensorium Dei* (sentido de Deus). Essa concepção sobre o papel de Deus no mundo foi um dos pontos de divergência entre Newton e Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 – 1716). Para este, Deus estava ausente do Universo. Criara tudo no princípio dos tempos dando todas as condições para que o Universo funcionasse em harmonia. O mundo de Leibniz não possuía um mecanismo qualquer. Deus o fez da forma mais simples, mais diversificada e harmoniosa, enfim, teria feito o “*melhor dos mundos possíveis*”.

Newton diz que o espaço é o órgão de que Deus se serve para sentir as coisas. Mas se ele tem necessidade de algum meio para as sentir, elas não dependem inteiramente dele e não são sua produção. Newton e seus asseclas têm ainda uma divertidíssima opinião sobre a obra de Deus. Conforme eles, Deus de vez em quando precisa dar corda em seu relógio, porque senão ele deixaria de andar. O cientista não teve visão suficiente para imaginar um movimento perpétuo. Essa máquina de Deus é até tão imperfeita, segundo eles, que o Criador se vê obrigado de quando em quando a desengraxá-la por um concurso extraordinário, e mesmo arranjà-la, como um relojoeiro faz com sua obra, o qual será tanto pior oficial quanto mais vezes se vir obrigado a retocar e corrigir seu trabalho. Na minha opinião, a mesma força e vigor subsiste sempre, passando somente de matéria em matéria, conforme as leis da natureza e a bela ordem preestabelecida. E creio que, quando Deus faz milagres, não é para suprir as necessidades da natureza, mas sim as da graça. Julgar diferentemente seria ter uma idéia muito baixa da sabedoria e do poder de Deus. (LEIBNIZ, “Excertos de uma missiva a Sua Alteza Real Princesa de Gales, de novembro de 1715”, in: “Os Pensadores”, 1983)

---

<sup>28</sup> BRAGA, GUERRA e REIS, 2004, p.119.

Uma das críticas mais severas que Leibniz fez a Newton referia-se à sua concepção de forças agindo à distância. De acordo com a teoria newtoniana, a transmissão da interação entre os corpos associava-se ao *Sensorium Dei* ou “espaço absoluto”. Para Leibniz, esta não era uma atitude científica, e somente com a ajuda de algum poder oculto poderia se concretizar.

Eu objetara que uma atração propriamente dita, ou à moda escolástica, seria uma operação à distância, sem meio. Responde-me aqui que uma atração sem meio seria uma contradição. Muito bem: como entendê-la, então, quando se pretende que o Sol, através de um espaço vazio, atrai o globo da Terra? É Deus que serve de meio? Mas isso seria um milagre como nunca houve; superaria as forças das criaturas.

Esse meio de comunicação é, dizem, invisível, intangível, não-mecânico. Poder-se-ia acrescentar, com o mesmo direito: inexplicável, ininteligível, precário, sem fundamento, sem exemplo. (LEIBNIZ, “Quinta carta de Leibniz, ou resposta à quarta réplica de Clarke”, in: “Os Pensadores”, 1983)

Em contrapartida ao trabalho de Newton, em 1714, Leibniz criou o conceito de mônadas: unidades de força que compõem o universo. Para ele, a matéria era algo essencialmente ativo, internamente permeada por forças, tanto ativas como passivas. As forças ativas seriam as causadoras dos movimentos dos corpos e as passivas seriam responsáveis pela resistência à mudança de movimento manifestada pelos corpos. Toda ação se daria através do contato entre os corpos, de modo que quando um corpo atingisse outro, as forças internas do corpo atingido seriam despertadas, o que

o faria entrar em movimento<sup>29</sup>. Dessa forma, toda força se transferiria de um corpo para outro por contato, formando um único pleno. Para Leibniz:

[...] como tudo é pleno (o que torna toda a matéria unida) e como no pleno qualquer movimento exerce algum efeito sobre os corpos distantes proporcional à distância, de modo a ser cada corpo afetado não só pelos que o tocam e a ressentir-se de certo modo de tudo quanto lhes acontece, mas também por intermédio deles se ressende dos que tocam os primeiros pelos quais é imediatamente tocado, segue-se que esta comunicação pode atingir qualquer distância. E, por conseguinte, todo corpo se ressende de quanto se faz no universo, de modo que o onividente poderia ler em cada um o que se faz em toda parte, e até mesmo quando se faz ou fará, observando no presente o que está afastado tanto nos tempos como nos lugares. (LEIBNIZ, “Plenitude do Mundo”).

Consequentemente, a matéria possuía sua própria força e esta era a causa de seu movimento. Essa força seria análoga à alma que constitui a individualidade dos objetos. Dessa forma, a ação a distância nos moldes newtonianos não era necessária para Leibniz, já que a mudança e o movimento em seu sistema ocorriam de acordo com uma harmonia pré-estabelecida por Deus dentro dos corpos, o responsável por todas as mudanças que ocorriam espontaneamente. A ação entre mônadas seria uma alternativa à concepção newtoniana de uma ação a distância, pois cada mônada conteria em seu interior o universo todo.

Enquanto Descartes criou uma concepção geométrica e mecânica para descrever o Universo, Leibniz construiu uma

---

<sup>29</sup> McMULLIN, *apud* GARDELLI, 2004, p. 33.

concepção dinâmica, ativa. Para ele, o Universo não era uma máquina, mas uma interação de “forças vivas”: os corpos materiais, por sua resistência e impenetrabilidade, revelavam-se não como extensão, mas como forças; o que se conservava num ciclo de movimento não era – como pensava Descartes – a quantidade de movimento, mas a quantidade de “força viva”. Assim, o Universo de Leibniz era composto por unidades de força, as mônadas, noção fundamental de sua metafísica<sup>30</sup>.

### 1.3 ÉTER: UMA NECESSIDADE CONTINGENTE?

A controvérsia de como se dá a ação de um corpo sobre o outro ao longo da história da ciência, remonta à teoria do éter. Uma teoria marcada por idas e vindas, por períodos de *necessidade* e outros de *contingência*. No desenvolvimento deste trabalho, observamos que desde sua concepção em Aristóteles, ocorreram diferentes conjecturas sobre quais seriam as propriedades deste éter. Na física aristotélica, foi chamado de “primeiro corpo” ou “quinto elemento”; uma substância invisível, feito de uma matéria não conhecida e que possuía como atributos a pureza, a eternidade, a inalterabilidade e a incorruptibilidade. Esses atributos lhe conferiam um "status divino" e Aristóteles o situava apenas no plano supralunar. Em contrapartida, essa substância etérea se diferenciava dos elementos formadores do plano sublunar, corruptíveis, os quais a água, fogo, terra e ar eram as principais substâncias formadoras. Ambos os planos, supralunar e sublunar, eram plenos no sentido de serem completos, preenchidos e totalmente formados por seus constituintes. Porém, no plano

---

<sup>30</sup> CHAÚÍ, Marilena de Souza. Vida e Obra. In: *Leibniz*. São Paulo: Abril Cultural, 1983 (Coleção Os Pensadores), p. 93-102.

supralunar predominavam as formas ditas perfeitas como círculos e movimentos eternos.

Com o advento da ciência moderna e a conseqüente unificação dos mundos sub e supralunar, Descartes ampliou a concepção inicial do éter aristotélico. Para Descartes, todo o Universo era preenchido por uma matéria essencialmente inerte, passiva, que não possuía poderes nem forças; capaz somente de conservar o movimento inicial dado por Deus. Essa matéria universal, organizada em grandes turbilhões ou vórtices, concentrava em seu centro a matéria mais sutil, chamada por Descartes de “primeiro elemento”, geradora das estrelas. Em volta de cada estrela haveria um turbilhão de matéria transparente, invisível, fluida, transportando os planetas – “o segundo elemento” de Descartes, posteriormente chamado por ele de éter.

O mundo cartesiano apresentava claramente uma ruptura em relação à física aristotélica: o movimento dos corpos não dependia mais da essência constituinte da matéria. Era necessário algo que intermediasse a ação de um corpo sobre o outro. A tendência ao lugar natural cedia lugar a um movimento que se dava a partir de choques e impulsos, de formas e matéria. O movimento dependia do meio, do externo. Na distinção entre o “interno” e o “externo”, parece estar a diferença essencial entre as concepções aristotélica e moderna de universo, no que se refere ao movimento de um corpo. Em Aristóteles, a ação ou o movimento enquanto deslocamento dependia do constituinte da matéria do corpo, não havia interferência do meio sobre esse movimento. Em Descartes, contrariamente, o meio era responsável pelo deslocamento, pelo movimento.

Ao contrário de Descartes, que opõe a matéria (*res extensa*) ao pensamento (*res cogitans*) situando-os em domínios distintos,

Leibniz era um monista. Reformulou em sua obra *Discurso de Metafísica* alguns conceitos cartesianos com relação a medida do movimento da matéria. Para Leibniz, a força ativa era um atributo do próprio corpo que se movia, e não uma ação externa a ele; em cada partícula havia uma força que dava origem a sua mudança como uma atividade própria, ainda que estimulada de fora. Embora no choque entre duas partículas a força que atuava em cada uma estivesse nela própria, e não na ação da outra, Leibniz admitia que cada partícula sofria a ação de todas as demais através do *plenum* que preenchia o espaço. Todos os corpos sentiam o efeito de tudo que acontecia no universo a qualquer distância. Para Leibniz, a mudança ou movimento associado a um corpo não se limitava, exclusivamente, ao que é interno, à essência da matéria, nem tampouco ao que é externo a esse corpo, mas sim, a um agregado de infinitas ações, internas e externas a cada universo inscrito em cada mônada. A mônada era a unidade estrutural de todas as coisas podendo ser relacionada à alma humana. O universo estava *plenum* de mônadas.

Apesar das diferenças fundamentais entre o *plenum* em Aristóteles, Descartes e Leibniz, existe em comum a necessidade de algo que permeie o contato entre os corpos. O meio - como um *plenum* - se constrói a partir da necessidade específica da realidade apresentada. O “interno” em Aristóteles é o agente do movimento, em Descartes o “externo” é o agente do movimento, enquanto em Leibniz, o “externo” e o “interno” se tornam único, movente em movido e vice-versa.

Vivendo neste mundo *plenum* desde Aristóteles, Newton, no final do século XVII, buscou modelos para um éter que pudesse dar conta dos trabalhos que vinha desenvolvendo em relação ao movimento dos planetas. Elaborou diversos modelos – do mecânico

ao dinamicista – até que, encontrando inconsistências em cada um deles, como também na proposta de Descartes, abandonou tal hipótese. O éter já não era mais necessário para explicar o movimento dos corpos celestes. No entanto, ao abandonar esta ideia Newton cria o espaço absoluto, deixando margem a uma interpretação dúbia, pois este, embora passível de experimentação e perceptível aos sentidos (a partir do experimento do balde), “permanece sempre igual e imóvel por sua própria natureza, sem relação com nada externo”, lembrando, de certa forma, a substância invisível, a matéria que não conhecemos, enfim, o éter aristotélico.

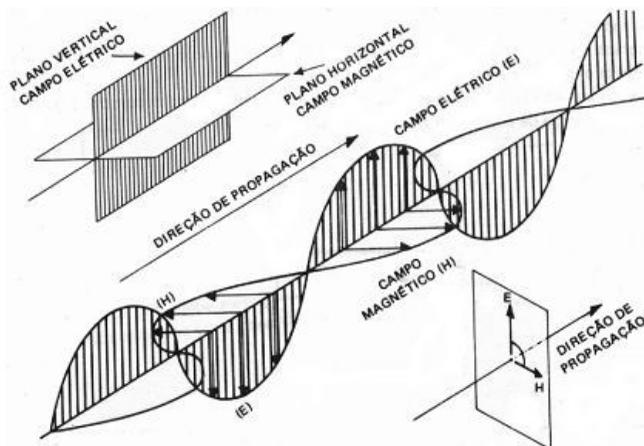
Aparentemente, da Lei da Gravitação de Newton inferimos que matéria age sobre matéria sem nenhum meio interveniente, a não ser o espaço absoluto. Não obstante, como entender o que é sensível aos nossos sentidos, que pode ser “visto” experimentalmente e, ao mesmo tempo, se constitui de vazio? Teoricamente, a mecânica newtoniana descreveu até início do século XIX, a ação instantânea e a distância de um corpo sobre o outro por meio de forças centrais, através de um espaço absoluto e vazio.

No início do século XIX ocorreu um abalo nos padrões da mecânica newtoniana com o advento do eletromagnetismo. No eletromagnetismo, a força resultante na interação da ação de um corpo sobre o outro não era mais radial, definida de centro a centro, mas possuía um caráter rotacional. Na visão de mundo estabelecida até então, uma força elementar deveria, necessariamente, ser uma força central. A partir do eletromagnetismo no século XIX, vários modelos de éter voltam a se tornar necessários na unificação dos fenômenos ópticos de um lado, e elétricos e magnéticos de outro, até então categorizados em domínios independentes. A necessidade de um éter e, conseqüentemente, sua importância nesse período foi tão grande

que J.J. Thomson disse: “O éter não é uma criação fantástica de uma filosofia especulativa; ele é essencial para nós, como o ar que respiramos”.

Nesse momento, o mesmo éter introduzido, a princípio, na ciência moderna para explicar o movimento em Descartes, deveria ter também propriedades tais que servissem como meio propagador das ondas de luz. Paralelamente, enquanto se construía diferentes modelos de éter para a luz, estudos na área da eletricidade e do magnetismo ganhavam dimensão ao final do século XVIII. A experiência realizada por Oersted, no início do século XIX, ressaltou as grandes dificuldades da aplicação das ideias mecanicistas nos outros domínios da física. A teoria eletromagnética de Maxwell incluiu a propagação ondulatória da luz, unificando, dessa forma, três campos do conhecimento aparentemente distintos: eletricidade, magnetismo e óptica, sendo o éter um meio necessário na descrição desses fenômenos. Não havia, nesse domínio, espaço para a concepção de um espaço vazio, a interação entre os corpos deveria ser mediatizada pelo éter.

No entanto, surge novamente um grande impasse para a construção de um modelo mecânico para o éter: ondas eletromagnéticas possuem linhas de força elétricas e magnéticas em planos perpendiculares à direção da propagação.



*Figura 3. Representação gráfica de uma Onda Eletromagnética.*

Isso faz com que a onda produzida seja transversal. Porém, ondas transversais só são produzidas em sólidos. Como entender um meio com características tão antagônicas? Ora ele deveria ter baixíssima viscosidade e densidade, ora deveria ser sólido! A princípio, a única saída parecia ser a de considerar o éter como uma propriedade física do espaço capaz de propagar ondas eletromagnéticas.

As equações de Maxwell descrevem, matematicamente, as leis do campo, ou seja, representam a estrutura desse campo. O cenário dessas leis, diferentemente do que ocorre nas leis da mecânica, é todo o espaço, não apenas corpos pontuais. Na nova linguagem de campo, é a própria descrição ou estrutura do campo entre dois corpos – e não os corpos em si – o essencial para compreensão da ação de um sobre o outro. Essa é a diferença marcante da mecânica newtoniana e do eletromagnetismo maxwelliano: o campo não existia para o físico do início do século XIX, por isso mesmo, era necessário descrever a ação de um corpo sobre outro considerando apenas os corpos em si.

Paradoxalmente, esse “vazio” o levava a criar um “*plenum*” que persistia de forma direta ou indireta, seja pela inerente incapacidade humana de explicar uma interação no “vazio”; seja pelo aparecimento contingente de “novos” conceitos, capazes de tomar emprestado vários atributos dos antigos significados de éter.

#### 1.4 BOSCOVICH E A CONCEPÇÃO DE FORÇA

Em meados do século XVIII, Roger Joseph Boscovich (1711–1787), filósofo natural, matemático, astrônomo e geodésico, aperfeiçoou a teoria de Leibniz sobre a estrutura do Universo. Sua teoria se situa entre a filosofia natural de Newton e Leibniz e faz uma antecipação do conceito de campo originado a partir das linhas de força de Faraday. Para ele, a matéria constitui-se de pontos materiais indivisíveis e inextensíveis como a mônada de Leibniz<sup>31</sup>, dotados de massa, e cuja interação se dava através de uma ação à distância<sup>32</sup>. Boscovich, diferentemente da maioria dos filósofos naturais, buscou uma forma de descrever a natureza na qual as unidades da matéria eram centros de força, e não algum tipo de átomo sólido, como uma bola de bilhar.

O conceito de força para Boscovich se caracterizava numa relação entre partículas; inspirando-se em parte na Lei de Continuidade de Leibniz e em parte na famosa questão 31 da *Opticks* de Newton, enunciou sua primeira Lei Universal de Forças, em que especula a existência de forças atrativas e repulsivas, agindo alternadamente nas partículas.

---

<sup>31</sup> SNOW, 1975, p.119

<sup>32</sup> MARTINS, 1997, p.11

Em seu trabalho *De Viribus Vivi* (1745), Boscovich coloca que no impacto por contato a velocidade de um corpo mudaria de valor subitamente, de forma descontínua, o que contrariava o princípio da continuidade da natureza (Lei de Continuidade de Leibniz). Concluiu então, que a colisão se processa por uma força que atua à distância fazendo a velocidade mudar progressivamente. Concluiu também que, do mesmo modo, a impenetrabilidade dos corpos é devida a uma força repulsiva entre os centros de força.

Para Boscovich, a força que pode ser repulsiva ou atrativa varia de um caso a outro conforme a distância pela qual os elementos são separados. À medida que a distância diminui tendendo a zero, a repulsão predomina e cresce ao infinito, tornando o contato entre as partículas impossível, dessa forma, preserva a impenetrabilidade como uma característica fundamental da matéria. Ou seja, essas partículas nunca poderiam se tocar, de forma que o aparente contato de dois corpos seria apenas uma ilusão<sup>33</sup>. Haveria pontos de equilíbrio onde a força se anula. Boscovich chamou tais pontos de *limite*. Alguns destes pontos são de equilíbrio estável e outros, de equilíbrio instável.

A Lei de Forças de Boscovich foi particularmente importante pelas conseqüências apresentadas acerca da constituição da matéria. A coesão, por exemplo, dependeria do limite entre atração e repulsão. Em suas palavras:

Todas as coisas dependem da composição das forças com as quais as partículas da matéria agem umas sobre as outras; e a partir dessas verdadeiras forças como um assunto de fato, todo fenômeno da natureza tem origem. (BOSCOVICH, 1763, apud CAMEL, 2004).

---

<sup>33</sup> WILLIAMS, apud GARDELLI, 2004, p. 36

Boscovich apresentou as forças de atração e repulsão em um só átomo. Na figura 4, o padrão de forças de um átomo boscoviquiano é representado graficamente. O eixo vertical representa a intensidade da força e o eixo horizontal a distância entre as partículas pontuais. Na origem *O* dos eixos coordenados encontra-se o centro das forças (um ponto matemático), as quais constituem tais partículas. Forças positivas (primeiro quadrante) representam repulsões e, forças negativas (quarto quadrante), atrações. Para além do ponto *H*, a força é sempre atrativa, decrescendo inversamente com o quadrado da distância, conforme o princípio newtoniano da atração universal. Entre *A* e *H*, a força é ora atrativa ora repulsiva e o número de alternâncias pode ser ajustado à vontade para descrever os fenômenos. De *A* até *O*, a força se torna cada vez mais repulsiva, tendendo a infinita no ponto *O* e, portanto, preservando a impenetrabilidade como uma característica fundamental da matéria<sup>34</sup>.

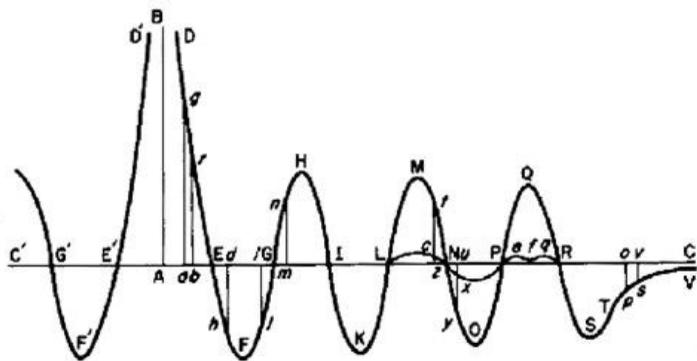


Figura 4. Representação gráfica do Padrão de Forças para um átomo de Boscovich.

<sup>34</sup> WILLIAMS, 1981c, p. 529.

Assim, de acordo com sua teoria, as teorias de impulso por contato entre partículas rígidas exigiriam uma descontinuidade do movimento, o que parecia ser inaceitável. Rejeitando o contato, Boscovich defendeu forças de interação à distância propriamente ditas, e não explicáveis por qualquer mecanismo oculto.<sup>35</sup>

Os primeiros elementos da matéria são, na minha opinião, pontos perfeitamente indivisíveis e não-extensos. Eles estão tão mergulhados em um imenso vácuo que dois destes estão separados um do outro por um intervalo definido; este intervalo pode ser indefinidamente aumentado ou diminuído, mas nunca pode desaparecer completamente sem penetração mútua dos pontos neles mesmos; eu não admito como possível qualquer contato imediato entre eles. Ao contrário, eu considero que isto é uma certeza, que, se a distância entre dois pontos de matéria pudesse se tornar absolutamente nenhuma, então o muito idêntico ponto indivisível do espaço, de acordo com a idéia corrente, deve ser ocupado por ambos juntos, e tem-se de verdade a penetração mútua em todos os sentidos. Contudo, na verdade eu não admito a idéia de vácuo disperso no meio da matéria, mas eu considero que a matéria está dispersa no vácuo e flutua nele. (BOSCOVICH, 1763, *apud* CROSLAND, 1971, p.210).

Outro representante da filosofia natural que certamente sofreu influência de Boscovich foi J. Priestley (1733-1804). Priestley defendeu um monismo materialista: a matéria se caracterizava por sua extensão e por poderes de atração e de repulsão que lhe eram inerentes. Reduz a matéria a um complexo de forças ou poderes que

---

<sup>35</sup> MARTINS, 1997, p. 111

variam de intensidade e de qualidade com a extensão, podendo tais forças ser do tipo atrativa ou repulsiva<sup>36</sup>.

Para Priestley, os átomos, ou menores partes da matéria, têm um poder de atração sem o qual a matéria não poderia existir, pois, não sendo assim, estes átomos divisíveis não permaneceriam inteiros. Analisou detalhadamente o atributo impenetrabilidade que se atribui à matéria a fim de mostrar que esta qualidade não existe e que, ao contrário, a resistência da matéria é decorrente do seu poder de repulsão, pois “este poder é exercido a uma ligeira distância do corpo”. Para Priestley, os corpos não entram em contato, e é esse poder de repulsão que dá a ilusão de impenetrabilidade. A matéria é penetrável por todo corpo cuja velocidade lhe permita vencer a força de repulsão ou a força de atração. Priestley descreveu a teoria de Boscovich em detalhes no *History of Optics*.

A teoria de Boscovich parece ter influenciado Faraday em sua elaboração acerca da *matéria* nas primeiras décadas do século XIX. A idéia de átomos como centros de força foi a base conceitual para o seu trabalho:

[...] Por exemplo, o peso ou gravitação de um corpo depende da força que nós chamamos atração e esta força não é qualquer coisa distante ou separada da matéria nem a matéria é separada da força; a força é uma propriedade essencial ou parte da matéria e para falar absurdamente, a matéria sem força não seria matéria. Ou, se nós reconhecemos a matéria pela sua dureza, o que nós fazemos senão reconhecer pelas nossas sensações a força exercida por ela? [...] Que razão real há, então, para supor que existam alguns destes centros na partícula da matéria? Que um átomo da matéria é uma imutável quantidade de poder, eu acredito; e tão indestrutível quanto

---

<sup>36</sup> ABRANTES, 1998, p.105

quaisquer daqueles átomos que Newton e outros podem ter imaginado. (FARADAY, “Matter”, 1844).

A idéia da ação a distância defendida também por Boscovich serviu de base para uma nova forma de visualizar essa ação de um corpo sobre o outro, ou seja, partindo do princípio que os átomos de Boscovich, como força, eram infinitos em extensão, porque as forças associadas com os átomos se estendiam infinitamente, vimos surgir um *campo de forças*, em que a matéria age à distância através desse *campo*. Neste sentido, *ação a distância e campo* tornam-se pólos indissociáveis se sustentando mutuamente.

## CAPÍTULO II

### Da Ação a Distância à Ação Mediada: de Faraday a Maxwell

#### 2.1 FARADAY E O PROBLEMA DA AÇÃO A DISTÂNCIA

Michael Faraday, químico, filósofo e estudioso da eletricidade, nasceu em Newington, Surrey, em 22 de setembro de 1791, e morreu em Hampton Court em 25 de agosto de 1867. Foi considerado um dos maiores cientistas de todos os tempos. Acreditava – e por isso buscou em seus trabalhos ao longo de toda sua vida – na unificação das forças da natureza. Foi o terceiro de quatro filhos de uma família pobre cujo pai era ferreiro. Sua família era muito religiosa; seus pais eram membros de uma seita cristã chamada Sandemanian, uma religião de caráter fundamentalista, dissidente do cristianismo protestante. A influência da religião foi determinante na concepção de natureza de Faraday e pode ser percebida através de dois princípios que sempre nortearam seus atos: a crença na “unicidade” do universo, proveniente da fé em um único criador e mantenedor do universo, e a certeza da falibilidade humana, que se reflete no preparo cuidadoso de suas experiências, de modo a assegurar a precisão e a confiabilidade dos resultados<sup>37</sup>.

Faraday tornou-se aprendiz do Sr. Riebau, um encadernador de livros. Esse trabalho despertou em Faraday métodos autodidatas que o levaram ao estudo experimental da natureza. Em 1812, foi convidado por um freguês de seu patrão a assistir a quatro conferências de Humphry Davy, importante químico britânico,

---

<sup>37</sup> WILLIAMS, *apud* CAMEL, 2004.

tomando notas das mesmas. Mais tarde, redigiu-as em formato mais completo e enviou-as a Davy. Como resposta, foi convidado por este, em 1813, para ser seu ajudante no laboratório da Royal Institution. Em 1825, foi nomeado diretor do laboratório e, em 1833, tornou-se titular da cátedra Fullerton de química na Royal Institution, pelo resto de sua vida, sem a obrigação de lecionar. Entre 1813 e 1815, Faraday acompanhou Davy em uma viagem pela França, Itália, Suíça, Tirol, Genebra e outras regiões, conhecendo pessoalmente cientistas como Ampère, Volta, Arago, Gay Lussac e outros<sup>38</sup>.

Faraday foi considerado um cientista essencialmente experimental, principalmente em função da descoberta do fenômeno da indução eletromagnética. A partir da descoberta de Oersted de que correntes elétricas geram efeitos magnéticos ao seu redor, o problema experimental a que se propôs investigar foi o efeito contrário, ou seja, a possibilidade de produzir eletricidade a partir do magnetismo.

Acreditando que as diferentes manifestações de forças na natureza provinham de uma unicidade, iniciou uma série de pesquisas experimentais. Apesar de aceitar a ação a distância para fenômenos gravitacionais, conforme apresentado pela Lei da Gravitação Universal de Newton, para fenômenos elétricos e magnéticos Faraday acreditava na necessidade de uma ação contígua, ou seja, de que as partículas da matéria tivessem contato de alguma forma, necessitando de algum tipo de matéria no espaço que intervém aos dois corpos ou as duas partículas de matéria.

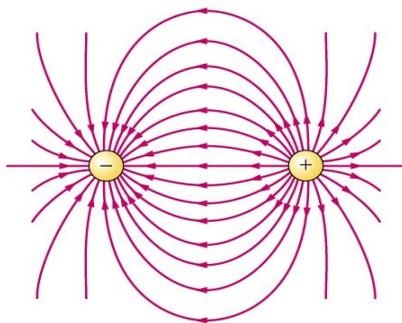
Para ele, as forças elétricas eram transmitidas pela ação de partículas contíguas consistindo numa espécie de polaridade. As partículas não agiam por contato, mas sim pelas suas forças polares

---

<sup>38</sup> MAXWELL, 1899, v.II, pp. 786-793.

associadas. A imagem curva da limalha de ferro ao redor de objetos imantados (figura 5) representava um indício de que sua natureza era diferente daquela da ação gravitacional, que se dava em linha reta. As moléculas contíguas, colocadas em estado de polarização, interagiam mutuamente ao longo da linha curva em que se dispunham, e também lateralmente a tais linhas.

Este fato levou Faraday à conclusão de que a indução eletrostática e a eletrólise eram análogas no que diz respeito ao estado polarizado das partículas, e que a indução eletrostática nunca deveria ocorrer sem a influência da matéria interveniente. Nesse momento, as linhas de força (figura 6) tinham a intenção de apenas indicar a disposição geométrica dessas partículas. Elas não possuíam, nesse momento, realidade física.



*Figura 6. Representação gráfica das linhas de força em torno de duas cargas elétricas de sinais opostos.*

Em um artigo de 1837, Faraday escreve:

As linhas são imaginárias, e a força em qualquer parte delas é evidentemente a resultante da

composição de forças, cada molécula estando relacionada às demais em todas as direções pela tensão e reação daquelas que são contíguas.<sup>39</sup>

Nesta época, Faraday pensava a matéria como sendo constituída por partículas sólidas como bolas de bilhar. Esta sua concepção inicial de matéria, levava a uma regressão a idéia da ação a distância, pois a partir dela não seria possível estabelecer um meio contínuo para uma ação mediada. Contudo, dizia Faraday, “por partículas contíguas quero referir-me àquelas que estão próximas uma das outras, não que não haja nenhum espaço entre elas”<sup>40</sup>. O próprio Faraday percebeu que enfrentava um impasse: a questão sobre quão próximo devem estar dois átomos para serem considerados contíguos acabou levando-o a admitir que o contato absoluto não existia, trazendo de volta a questão sobre a ação a distância.

Criticado por essa posição, Faraday elabora sua ideia acerca da matéria. Quatro anos mais tarde, sua solução é baseada nos moldes dos átomos de Bosovich – todas as partículas do universo estavam dinamicamente relacionadas umas com as outras por meio de forças, cuja direção era ora atrativa, ora repulsiva, e cujo valor era uma função da distância entre elas. Dessa forma, propõe um modelo que descarta a necessidade da matéria como suporte para forças, ou poderes, assumindo a primazia da força sobre a matéria; esta, em vez de constituir-se de átomos duros, impenetráveis, sobre os quais forças teriam sido inicialmente impressas, é vista como constituída de centros de força, cujos poderes são capazes de irradiar-se por todo o universo:

---

<sup>39</sup> FARADAY, *apud* ABRANTES, 1998, p. 182

<sup>40</sup> FARADAY, 1840.

Será que existe alguma coisa mais compreensível às nossas mentes, na complicada noção de matéria sem poder, de poder sem matéria, e de matéria e poder amalgamados, do que há na visão simples do poder emanando de e ao redor de um centro? (FARADAY, 1952[1844], §3).

## 2.2 DAS FORÇAS DA MATÉRIA EM FARADAY

A matéria assim concebida associa-se à tradição dinamicista da filosofia britânica. Para Faraday, “a partícula só deve existir realmente por essas forças e onde elas estão”<sup>41</sup>. Essa teoria supunha a “mútua penetrabilidade da matéria” resolvendo o problema de explicar o modo pelo qual as forças eram transmitidas entre partículas contíguas, pois a “matéria será totalmente contínua e, ao considerar uma massa desta, não temos que supor uma distinção entre seus átomos e qualquer espaço interveniente”<sup>42</sup>. Como conseqüência dessa nova visão em relação às linhas de força, Faraday abandonou a idéia de polarização das partículas da matéria, concluindo que a teoria corpuscular da matéria e o vazio deveriam ser abandonados<sup>43</sup>.

Estudos indicam que esta nova elaboração do conceito de matéria de Faraday e, conseqüentemente das linhas de força, baseia-se na teoria de Boscovich. No entanto, é importante observar que apesar de poder ter servido de inspiração para Faraday, há diferenças essenciais entre elas: Boscovich não definia a matéria em termos de poderes inerentes, mas preservava o dualismo newtoniano entre força e matéria. Para ele, a matéria constituía-se de pontos materiais

---

<sup>41</sup> FARADAY, 1844.

<sup>42</sup> FARADAY, op. cit.

<sup>43</sup> FARADAY, op. cit.

indivisíveis e pontuais, dotados de massa e cuja interação ocorria através de uma ação à distância entre forças de atração e repulsão<sup>44</sup>.

Para Harman (1995, p.77), a teoria da matéria de Faraday mostra alguma proximidade com a teoria que Priestley elaborou em que as características definidoras da matéria eram extensão e poderes inerentes de atração e repulsão. Ele rejeitou as suposições do atomismo newtoniano em que impenetrabilidade e rigidez eram propriedades essenciais da matéria e substituiu o dualismo newtoniano de átomos e força pelo uso da força como propriedade essencial da matéria. A matéria se reduz a um complexo de forças ou poderes que lhe são inerentes.

Mediante esta concepção, Faraday foi movido pelo mesmo princípio filosófico de Oersted; seus trabalhos experimentais em torno de 1830 estavam sempre relacionados com a conversão de um fenômeno em outro. Em 1845, dando continuidade a sua pesquisa sobre a convertibilidade das forças, declarou sua crença fundamental em um trabalho publicado acerca da ação do magnetismo na luz:

As várias formas sob as quais as forças da matéria se manifestam têm uma origem comum, ou, em outras palavras estão tão diretamente relacionadas e mutuamente dependentes, que elas são convertíveis, como aqui, uma na outra e possuem poderes equivalentes na sua ação. (FARADAY, 1845, *apud* HARMAN, 1995, p. 35).

Alguns outros cientistas dessa época, além de Faraday, descreveram os fenômenos como manifestação de uma única *força*, que podia aparecer sob a forma elétrica, térmica, dinâmica e muitas

---

<sup>44</sup> CAMEL, 2004.

outras, mas que nunca podia, em todas as suas transformações, ser criada ou destruída.

A posição que procuro estabelecer neste ensaio é que cada um dos vários agentes imponderáveis [...] isto é, calor, luz, eletricidade, magnetismo, afinidade química e movimento, [...] podem, enquanto força, produzir ou converter-se nas outra; assim, o calor pode mediata ou imediatamente produzir eletricidade, a eletricidade pode produzir calor; e o mesmo se passa com o resto. (GROVE, 1843).

Esta *força* seria mais tarde conhecida pelos cientistas como energia<sup>45</sup>. A origem dessa nova visão de mundo foi produto da filosofia germânica do final do século XVIII, que desencadeou o movimento chamado de *Nathurphilosophie*, de Friedrich Schelling. Sua essência foi inicialmente conjecturada por Immanuel Kant em seu *Metaphysiche Anfangsgründe der Naturwissenschaft*, de 1786, e então desenvolvida por Schelling, como uma filosofia fortemente oposta à visão de mundo mecanicista<sup>46</sup> e à tradição matemático-empírica dos séculos XVII e XVIII. Chegou à Inglaterra de várias formas, uma delas foi através da influência direta de Samuel Taylor Coleridge que, ao visitar a Alemanha em 1798, conheceu a filosofia de Schelling e tornou-se um entusiástico adepto da *Nathurphilosophie*<sup>47</sup>.

Quando retornou à Inglaterra, Coleridge encontrou Humphry Davy, que por sua vez, começava a questionar a teoria dos fluidos imponderáveis. Davy ficou visivelmente receptivo ao novo ponto de vista apresentado por Coleridge, e acabou por influenciar seu discípulo, Faraday, com a idéia de um universo físico em que

---

<sup>45</sup> KUHN, 1977, p.103.

<sup>46</sup> WILLIAMS, 1978.

<sup>47</sup> BRUSH, 1976a.

diferentes manifestações fundamentais de forças de atração e repulsão serviriam de motivação para um dos mais importantes trabalhos de física experimental do início do século XIX<sup>48</sup>.

Em síntese, os trabalhos de Faraday, a partir de sua crença em uma unidade de forças da natureza, levaram-no a experiências nas áreas da eletricidade, magnetismo e eletroquímica. Suas pesquisas foram desenvolvidas através de uma série de investigações experimentais, inspiradas talvez pela *Nathurphilosophie*, que valorizava a experimentação.

Ao tentar explicar o mecanismo da ação contígua da força elétrica, Faraday se viu obrigado a questionar a estrutura da matéria. Em sua nova concepção, não havia lugar para o atomismo do programa laplaciano nem para a hipótese do éter elástico como o meio através do qual as ações físicas eram transmitidas. Muito pelo contrário, Faraday propôs um *plenum* de forças negando a impenetrabilidade e a indivisibilidade como qualidades da matéria.

Cabe mais uma vez ressaltar que tanto Boscovich quanto Priestley, prováveis inspiradores de Faraday na sua reelaboração acerca da *matéria*, descreviam os fenômenos como uma ação a distância a partir de forças de atração e repulsão. É fato então que, o nascimento do conceito de campo, através de Faraday, teve como origem a problemática questão da ação a distância.

### **2.3 DAS LINHAS DE FORÇA DE FARADAY ÀS EQUAÇÕES DE MAXWELL**

Ainda na primeira metade do século XIX, o trabalho de Faraday distinguiu uma diferença essencial na análise entre os

---

<sup>48</sup> BRUSH, 1976.

fenômenos gravitacionais e os elétricos e magnéticos. Sua admiração e respeito por Newton o levaram a crer que estes eram fenômenos essencialmente distintos. Para ele, a atração gravitacional era uma espécie de mistério sagrado, o qual, não sendo astrônomo, não poderia contradizer ou duvidar.

Na época, a tendência geral do método científico era a aplicação da matemática a cada novo estudo em andamento. Faraday, no entanto, não possuía conhecimento técnico de matemática, o que o impossibilitou de seguir a linha de pensamento dos filósofos franceses. Ao invés de seguir o que, até então, tinha sido a linguagem dos estudiosos, acabou criando um novo simbolismo para explicar os fenômenos elétricos e magnéticos. Este novo simbolismo consistia de linhas de força (item 2.1, figura 6) que se estendiam em todas as direções a partir de corpos eletrificados e magnetizados. Sua visualização e demonstração se davam por meio de limalha de ferro, como representado na figura 5 do item 2.1.

Seria um abandono desnecessário e caprichoso da ajuda mais valiosa se um experimentalista, que escolhe representar a intensidade magnética por meio de linhas de força, negasse a si mesmo o uso de limalha de ferro. Por meio de sua utilização ele pode tornar muitas condições de intensidade, mesmo em casos complicados, imediatamente visíveis aos olhos, pode acompanhar em que direção esta intensidade está crescendo ou diminuindo, e em sistemas complexos pode determinar os pontos neutros, lugares nos quais não há nem polaridade nem intensidade, mesmo que eles estejam localizados no meio de ímãs muito poderosos. Por meio de seu emprego, resultados prováveis podem ser vistos imediatamente, e muitas sugestões valiosas para conduzir futuros experimentos podem ser obtidas. (FARADAY, Experimental Researches in Electricity (Encyclopaedia

Britannica: Great Books of the Western World,  
Chicago, 1952), v. 45, pp. 257-866).

Nos experimentos com linhas de força, cada pedacinho de limalha se transforma em um pequeno ímã cujos pólos opostos a cada pedacinho atraem-se uns aos outros organizadamente. Desta maneira, os pedacinhos de limalha ao invés de formar um sistema confuso de pontos, juntam-se pedacinho a pedacinho, formando longos filamentos de limalha de ferro que indicam a direção das linhas de força em todas as partes do espaço. A princípio, os matemáticos nada viram neste experimento a não ser um método de mostrar a direção e o sentido da resultante de duas forças em pontos diferentes, cada uma delas dirigida para um pólo diferente do ímã.

Mas para Faraday, as linhas de força não deveriam ser consideradas isoladamente, mas sim, como um sistema traçado de uma maneira definida, de tal forma que o número de linhas que atravessa uma área indica a intensidade da força através da mesma. Dessa forma, as linhas de força se tornam definidas em número. A intensidade de um pólo magnético é medida pelo número de linhas que procedem dele; a força eletromotriz de um circuito é medida pelo número de linhas de força que passam através dele.

Para Faraday, cada linha possui, individualmente, existência contínua no espaço e no tempo. Quando um pedaço de aço torna-se um ímã, ou quando uma corrente elétrica começa a fluir, as linhas de força não passam a existir cada uma delas em seu próprio lugar, mas à medida que a intensidade aumenta novas linhas são geradas dentro do ímã ou corrente e, gradualmente, crescem em direção ao exterior, de maneira que todo o sistema se expande de dentro para fora. Assim, cada linha preserva sua identidade durante o curso inteiro de sua

existência, embora sua forma e tamanho possam ser alterados à vontade<sup>49</sup>.

Através deste novo simbolismo, Faraday traçou a teoria do eletromagnetismo em uma linguagem livre de tecnicismos matemáticos. Levou adiante sua concepção geométrica de linhas de força para a concepção física. Elaborou uma teoria em que o movimento que a força elétrica ou magnética tendem a gerar nas linhas de força, é de encurtamento e, ao mesmo tempo, afastamento lateral. Dessa forma, propõe a existência de um estado de tensão no meio como a tração que existe em uma corda esticada, na direção das linhas de força, combinada com uma pressão em todas as direções formando um ângulo reto com essas linhas<sup>50</sup>.

É fato que esta nova forma de interpretar a ação de um corpo sobre o outro é bastante diferente da concepção newtoniana de ação a distância. Podemos então inferir que tal concepção nos conduz a uma visão “não-newtoniana” da física, em que a ação de um corpo sobre o outro ocorre através de uma rede de interação, numa ação contígua. Esta concepção de Faraday, de estado de tensão de um meio, seria não só uma forma de se explicar a ação a distância através da transmissão contínua de uma força nos fenômenos eletromagnéticos, mas também revela sua fé em uma correlação universal das forças físicas da matéria e de sua transformação umas nas outras, mesmo que não saibamos como este estado de tensão se produz.

[...] o que poderia suplantiar estas provas da transformação da força química em eletricidade e da eletricidade em magnetismo? Eu poderia mostrar-lhes muitos outros experimentos por meio dos quais poderíamos obter eletricidade e

---

<sup>49</sup> Maxwell, J. C., “On Action at a Distance”, 1873.

<sup>50</sup> Maxwell, J. C., op. cit.

ação química, calor e luz de um ímã. Porém, o que mais preciso mostrar-lhes para provar a correlação universal das forças físicas da matéria e de sua transformação umas nas outras? (FARADAY, *A história química de uma vela/As forças da matéria*, [1861], 2003).

O trabalho desenvolvido por Faraday impressionou Maxwell (1831-1879), que assim se referiu a ele: “A teoria eletromagnética proposta por ele [Faraday], é a mesma em substância da que eu comecei a desenvolver neste trabalho, exceto que em 1846 não havia dados para calcular a velocidade de propagação”<sup>51</sup>. O primeiro trabalho de Maxwell em eletromagnetismo foi *On Faraday's lines of force* escrito entre 1855 e 1856. Neste trabalho Maxwell buscou unir as idéias de Faraday com analogias matemáticas desenvolvidas por Thomson e, com isso, obter uma teoria matemática que pudesse descrever as linhas de força. Além de interpretar e desenvolver o trabalho de Faraday, este estudo contém o início de muitas idéias que foram modificadas ou desenvolvidas mais tarde, como a representação utilizando expressões matemáticas integrais das equações de campo, o tratamento da ação elétrica como análogo ao movimento de um fluido incompressível, e a classificação (que não é mais utilizada) das funções vetoriais em vetores do tipo força e vetores do tipo fluxo.

Dando continuidade a este estudo, Maxwell publicou entre 1861 e 1862 *On Physical Lines of Force*. Seguindo os conceitos de Thomson, Maxwell desenvolveu neste trabalho a idéia de que os fenômenos eletromagnéticos são provocados por deslocamentos de partículas de éter, de modo que o movimento de rotação seria proporcional à força magnética, e o deslocamento relativo das

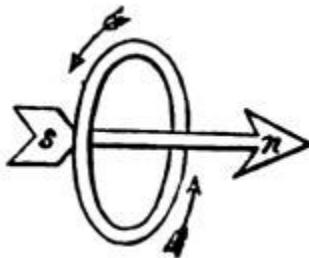
---

<sup>51</sup> Maxwell, J. C. [1873], 1954.

partículas vizinhas corresponderia em magnitude e direção à quantidade de corrente elétrica passando pelo ponto correspondente do campo eletromagnético. Contudo, Maxwell foi cauteloso em relação ao conceito de corrente elétrica. Na tradição da eletrodinâmica continental, a corrente elétrica era definida como um movimento de cargas elétricas. Para Maxwell, contudo, a corrente elétrica era um fenômeno complexo, envolvendo não só o condutor, mas também o dielétrico que o circunda.

[...] Embora tivemos grande vantagem em reconhecer várias analogias entre a corrente elétrica e a corrente de um fluido material, devemos evitar cuidadosamente fazer suposições não confirmadas pela evidência experimental, e não há, por enquanto, nenhuma evidência experimental que mostre se a corrente elétrica é realmente uma corrente de uma substância material ou uma dupla corrente. (MAXWELL, *Tratado*, [1954], p. 218).

No modelo da figura 7, representando um vórtice ao redor de uma linha de campo, cada vórtice no éter corresponde ao campo magnético em um ponto do espaço.



*Figura 7. Vórtice ao redor de uma linha de campo que aponta na direção Sul-Norte.*

Baseando-se na idéia dos vórtices formados ao redor das linhas de campo, Maxwell elaborou neste mesmo trabalho um modelo mecânico (figura 8) para tentar explicar o fenômeno da indução eletromagnética (indução de corrente em um circuito devido à variação em outro). Considerou o éter formado por vórtices rígidos em rotação, entre os quais haveria pequenas esferas que transmitiriam o movimento de um vórtice para outro.

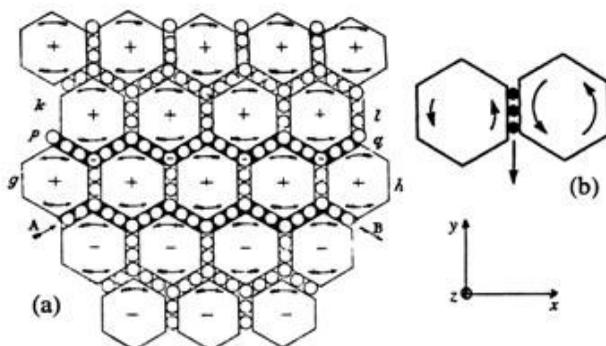


Figura 8. O Meio Etéreo de Maxwell. In: “On physical lines of force (1861/2)”

Para Maxwell, os sistemas de vórtices agiriam como um mecanismo interligado, capaz de transferir movimento elétrico de um condutor para outro como um mecanismo semelhante a um conjunto de catracas, capazes de transferir a rotação para os vórtices vizinhos. Para que a transferência de movimento de um vórtice a outro fosse possível, Maxwell supôs que o éter seria rígido, com vórtices em rotação e teria uma camada de pequenas partículas esféricas (“idle wheels”) capazes de rolar entre os vórtices e com isso transmitir o movimento entre os vórtices vizinhos, como mostrado na figura acima.

Valendo-se de analogias, Maxwell passou a relacionar as grandezas mecânicas existentes no movimento destes vórtices com as

grandezas eletromagnéticas. Interpretou a força tangencial das partículas como análoga ao campo elétrico; o momento angular do vórtice como análogo à intensidade do campo magnético; e o movimento das partículas como análogo à corrente elétrica. A formulação completa de sua teoria eletromagnética foi publicada em 1864 em *A dynamical theory of the eletromagnetic Field*.

O coroamento do trabalho de Maxwell em eletromagnetismo ocorreu com a publicação de sua obra *A Treatise on Electricity and Magnetism*, em 1873. Foi neste trabalho que Maxwell expôs com mais clareza e profundidade sua teoria eletromagnética baseada na existência de um éter. Mediante esta visão, uma carga elétrica não interage com outra a distância, mas sim, através do éter eletromagnético. A velocidade de propagação da interação é finita e igual à velocidade da luz. Esta hipótese o levou a inferir que a própria luz era uma onda eletromagnética se propagando neste meio. Isto significou a possibilidade de associar o éter da óptica ou luminífero (responsável pela transmissão da luz) com o éter eletromagnético (responsável, na sua concepção, pela transmissão das interações entre cargas e correntes elétricas).

No entanto, em *Theories of Action at a Distance*, último capítulo deste mesmo livro, Maxwell discutiu os mecanismos de interação entre os corpos de um ponto de vista mais técnico e matemático. Neste capítulo, propôs-se a discutir outra visão do eletromagnetismo desenvolvida principalmente na Alemanha, baseada em modelos de ação a distância. Analisou as idéias de Gauss, Riemann, Neumann e principalmente as de Wilhelm Weber (1804-1891). No prefácio à primeira edição deste livro, escreveu:

Grande progresso tem sido feito na ciência elétrica, principalmente na Alemanha, pelos

cultivadores da teoria de ação a distância. As valiosas medições elétricas de W. Weber são interpretadas por ele de acordo com sua teoria, e a especulação eletromagnética que foi originada por Gauss, e continuada por Weber, Riemann, J.[F.] e C. Neumann, [L.] Lorenz, etc., está baseada na teoria de ação a distância, mas dependendo ou diretamente da velocidade relativa das partículas, ou da propagação gradual de alguma coisa, seja potencial ou força, de uma partícula à outra. O grande sucesso obtido por estes homens eminentes na aplicação da matemática aos fenômenos elétricos fornece, como é natural, peso adicional às suas especulações teóricas, de tal forma que aqueles que, como estudantes da eletricidade, se voltam em direção a eles como as maiores autoridades na eletricidade matemática, provavelmente assimilariam, junto com seus métodos matemáticos, suas hipóteses físicas.

Estas hipóteses físicas, contudo, são completamente diferentes da maneira de olhar os fenômenos que adoto, e um dos objetivos que tenho em vista é que alguns daqueles que desejam estudar eletricidade podem, ao ler este tratado, ver que há outra maneira de tratar o assunto, que não é menos apta a explicar os fenômenos, e que, apesar de que em algumas partes ela possa parecer menos definida, corresponde, como penso, mais fielmente ao nosso conhecimento atual, tanto naquilo que afirma quanto naquilo que deixa indeciso.

De um ponto de vista filosófico, além disto, é extremamente importante que os dois métodos sejam comparados, ambos os quais tiveram sucesso na explicação dos principais fenômenos eletromagnéticos, e ambos os quais tentaram explicar a propagação da luz como um fenômeno eletromagnético e de fato calcularam sua velocidade, enquanto que ao mesmo tempo as concepções fundamentais sobre o que acontece, assim como a maioria das concepções secundárias das quantidades envolvidas, são radicalmente diferentes. (MAXWELL, op. cit.)

O desafio de Maxwell ao escrever o Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo, consistia em apresentar sua teoria e demonstrar novos padrões para o tratamento dos problemas eletromagnéticos. A parte principal do Tratado trata a matéria e o éter como um único meio com propriedades macroscópicas variáveis e evita especulações sobre a natureza do éter e da matéria.

Ao contrário da gravitação, as equações de Maxwell não relacionam eventos simultâneos em pontos distantes do espaço, como a atração da matéria pela matéria à distância. A propagação dos campos se dá de um ponto aos seus vizinhos mais próximos, relacionando a situação em um momento à situação no momento imediatamente anterior, em um contínuo espacial e temporal.

Contudo, os operadores envolvidos nestas equações possuem uma interpretação geométrica.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$\mathbf{E}$  representa o Campo Elétrico,  $\mathbf{B}$  o Campo Magnético,  $\rho$  a densidade de carga elétrica,  $\mathbf{J}$  a densidade de corrente elétrica,  $\mu_0$  a

permeabilidade magnética do vácuo igual a  $1,257 \times 10^{-6}$  H/m, e  $\epsilon_0$  a permissividade elétrica do vácuo igual a  $8,854 \times 10^{-12}$  F/m.

O fato do divergente  $\mathbf{E}$  ser nulo em todo o espaço, exceto onde há carga ( $\rho$  não nulo) significa que, para uma carga puntual, seu campo diverge deste ponto em todas as direções. O fato de o rotacional de  $\mathbf{B}$  ser diferente de zero onde há corrente ( $\mathbf{J}$  não nulo) está associado à forma circular das linhas de força ou do campo magnético em torno da direção da corrente elétrica.

As equações de Maxwell levaram à unificação da eletricidade e do magnetismo em uma só teoria e, mais impressionante ainda, foi a predição feita por essas equações de que o campo elétrico e o magnético podiam viajar através do vácuo, sob a forma de ondas eletromagnéticas, como a luz, transportando consigo energia sem transporte de matéria. Com isso, Maxwell unificou em uma só teoria a óptica, a eletricidade e o magnetismo. Em suas equações, a velocidade  $c$  das ondas eletromagnéticas, como a luz, associa-se às constantes características do meio. Logo, ela é uma constante universal imutável, independente da velocidade do referencial em que se faz a medida, contrariando a mecânica newtoniana em que a velocidade da partícula muda quando o observador muda de um referencial para outro que se move em relação ao primeiro.

A partir das equações de Maxwell, entendemos que os campos elétricos e magnéticos se propagam com a velocidade da luz a partir de uma fonte, atuando sobre cargas elétricas encontradas no espaço. Não há ação instantânea a distância, a ação é mediatizada, o que poderia parecer que a influência newtoniana de então finalmente cedera. Contudo, como explicar ondas eletromagnéticas “viajando” pelo vácuo

transportando energia sem matéria? O velho éter (ou algo semelhante) volta a preencher todo o espaço vazio. De certo modo, Maxwell repetiu com sua teoria de propagação do campo eletromagnético no vácuo, a ousadia teórica de Newton ao formular a lei da gravidade como uma ação a distância. O eletromagnetismo sintetizado por Maxwell sobre os ombros de Faraday e de seus antecessores, desencadeou questões cruciais para a Física do século XX.

## CAPÍTULO III

### Da Gravitação de Einstein: a Relatividade Geral de Einstein retoma o problema da ação a distância?

#### 3.1 A RELAÇÃO ESPAÇO-TEMPO

A relação entre espaço e tempo encontra-se no cerne de questões fundamentais referentes à Teoria da Gravitação Universal de Newton e da Relatividade Geral de Einstein ou, Teoria da Gravitação de Einstein. As diferentes concepções desses dois grandes cientistas em relação à percepção desses conceitos desencadearam visões de mundo distintas. Levando-se em consideração essa relação e de acordo com o sistema de referência adotado, temos diferentes descrições para um mesmo evento.

O choque entre dois corpos ou o “acender” de uma lâmpada são exemplos de eventos. Contudo, para identificá-los no espaço e no tempo, escolhemos um referencial e o descrevemos a partir de quatro medidas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $t$ , em que  $x$ ,  $y$  e  $z$  indicam a posição e  $t$  indica o tempo. A colisão entre dois corpos quaisquer pode ocorrer, por exemplo, em  $x = 2\text{m}$ ,  $y = 4\text{m}$ ,  $z = 20\text{m}$ , e no tempo  $t = 10\text{s}$  tendo como sistema de referência escolhido um laboratório na Terra. O mesmo evento, observado de outro referencial, seria também representado por quatro números, embora os números possam ser diferentes dos encontrados no laboratório.

Um sistema de referência inercial ou não acelerado é aquele no qual vale a lei da inércia: “todo corpo continua em seu estado de repouso

ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele”<sup>52</sup>. Para Newton, um sistema de referência fixo em relação às estrelas é um sistema inercial. No Corolário V de sua obra *Principia*, enunciou:

O movimento de corpos encerrados em um dado espaço são os mesmos entre si, esteja esse espaço em repouso, ou se movendo uniformemente em uma linha reta sem qualquer movimento circular.<sup>53</sup>

Assim, desprezando-se os pequenos efeitos de aceleração devido ao seu movimento de rotação, a Terra e qualquer conjunto de eixos fixos ao seu solo podem ser considerados um sistema de coordenadas inercial. Os sistemas acelerados em relação a tal sistema não são inerciais. A teoria da relatividade restrita – assim como a mecânica newtoniana – trata somente da descrição dos eventos por observadores que estejam nestes referenciais inerciais.

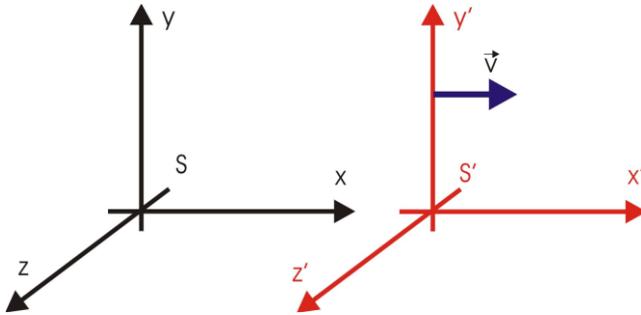
Para descrever eventos que ocorrem em um referencial inercial qualquer, usamos as transformações galileanas (ou relatividade galileana). Consideremos, por exemplo, os dois referenciais inerciais S e S', formados respectivamente pelos eixos x, y e z, em repouso em relação à Terra, e x', y' e z', paralelos a x, y e z, e com velocidade V, constante, na direção do eixo x em relação ao sistema S, conforme a figura 9<sup>54</sup>.

---

<sup>52</sup> NEWTON, Lei da Inércia, 1ª Lei de Newton, *Principia*, Livro I, p. 53.

<sup>53</sup> NEWTON, *Principia*: corolário V, p. 61.

<sup>54</sup> WOLFF e MORS, [www.if.ufrgs.br/tapf/v16n5](http://www.if.ufrgs.br/tapf/v16n5) **Wolff Mors.pdf**

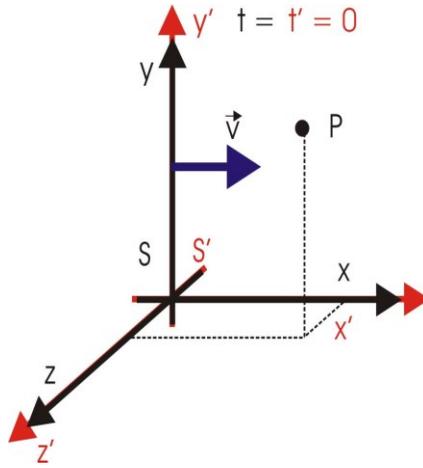


*Figura 9. Transformações Galileanas: um referencial se movendo com velocidade constante em relação ao outro<sup>54</sup>.*

Podemos identificar um evento no ponto P pelo conjunto de quatro coordenadas em cada referencial: em S ( $x, y, z$  e  $t$ ) e S' ( $x', y', z'$  e  $t'$ ), sendo que as três primeiras coordenadas de cada referencial localizam o ponto no espaço, enquanto a quarta coordenada indica o momento da ocorrência do evento. Se considerarmos que inicialmente os referenciais S e S' coincidem em  $t = t' = 0$ , temos que  $x_0 = x'_0$ ,  $y_0 = y'_0$  e  $z_0 = z'_0$ , conforme a figura 10<sup>55</sup>.

---

<sup>55</sup> WOLFF & MORS, op. cit.



*Figura 10. Transformações Galileanas: localização de um ponto P no tempo  $t = t' = 0$ , em relação aos dois referenciais.*

Considerando um instante seguinte  $t = t' > 0$ . O referencial S' terá se deslocado de uma distância  $V.t$ , em relação ao referencial S, de acordo com a figura 11<sup>56</sup>.

---

<sup>56</sup> WOLFF & MORS, op. cit.

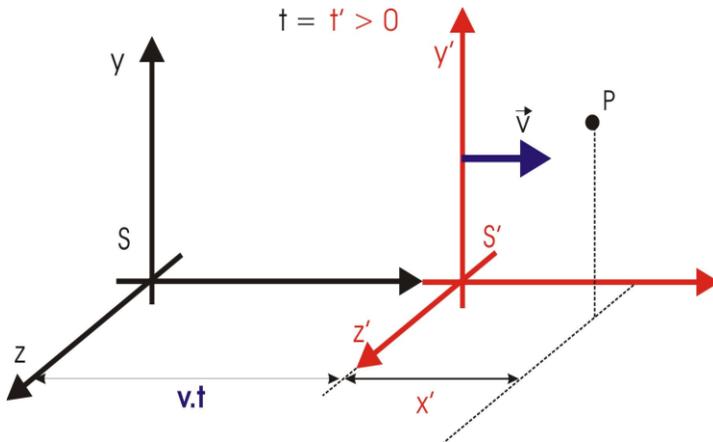


Figura 11. Transformações Galileanas: localização de um ponto P no tempo  $t = t' > 0$ , em relação aos dois referenciais.

Então, podemos relacionar as coordenadas dos dois referenciais da seguinte forma:

$$x = x' + V \cdot t; \quad (1)$$

$$y = y'; \quad (2)$$

$$z = z'; \quad (3)$$

$$t = t'. \quad (4)$$

Nesse caso, consideramos os relógios sincronizados, o que significa  $t = t'$ . Para Galileu o tempo era absoluto, independente do

referencial, a isto chamamos de invariância do tempo. Uma consequência direta da invariância do tempo, segundo as transformações galileanas, é também a invariância do comprimento. Ou seja, pelas transformações de Galileu, concluímos que o comprimento, assim como o tempo, é absoluto e independentemente do referencial em que for medido.

A concepção de um espaço e tempo absoluto permaneceu até o início do século XX. Em Newton, “o tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e por sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa”<sup>57</sup>, e também, “o espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel”<sup>58</sup>. Com base em tais preceitos, a mecânica newtoniana unificou a física celeste e a terrestre por meio de leis do movimento. Até início do século XIX, as leis da mecânica pareciam explicar satisfatoriamente os fenômenos da natureza.

Contudo, como vimos no segundo capítulo, estudos em eletricidade, magnetismo e óptica começavam a dar sinais de alguma inconsistência entre a visão clássica e a que começava a despontar nessas áreas do conhecimento. Em meados do século XIX, Maxwell unificou três áreas do conhecimento científico – eletricidade, magnetismo e óptica – em uma só teoria. As equações de Maxwell descreviam uma onda eletromagnética e concluíam que era esta a natureza da luz, e que sua propagação se dava no vácuo. Este foi um dos

---

<sup>57</sup> NEWTON, *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, Escólio, Livro I, p.45.

<sup>58</sup> NEWTON, *op. cit.*

grandes problemas do eletromagnetismo em relação à mecânica newtoniana. O conhecimento que se tinha nesse período acerca da propagação de ondas mecânicas era que elas necessitavam de um meio para sua propagação. As ondas mecânicas não se propagam no vácuo. Então, imaginou-se que deveria existir um meio com algumas propriedades especiais onde as ondas eletromagnéticas se propagassem. Recuperou-se, portanto, a idéia do éter representando um meio em que a densidade deveria ser zero e a transparência perfeita. Somente assim as ondas eletromagnéticas poderiam se propagar no espaço vazio de matéria, pois nele existiria o éter. Inúmeros experimentos foram feitos na tentativa de “provar” a existência deste meio. Nenhum deles conseguiu êxito. Não se conseguia afirmar ou negar a existência do éter.

Outro grande problema percebido em meados do século XIX estava na interpretação dos fenômenos por meio das transformações galileanas. De acordo com a relatividade galileana (ou transformações galileanas), as leis da Física deveriam ser iguais em qualquer referencial inercial. No entanto, ao passarmos de um referencial para outro, utilizando as transformações galileanas, as equações de Maxwell forneciam interpretações diferentes para um mesmo fenômeno. No artigo “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento” (1905), Einstein discute a assimetria observada na eletrodinâmica de Maxwell aplicada a corpos em movimento:

Como é bem conhecido, a eletrodinâmica de Maxwell – tal como usualmente entendida no momento –, quando aplicada a corpos em movimento, produz assimetrias que não parecem

ser inerentes ao fenômeno. Considere-se, por exemplo, a interação eletrodinâmica entre um ímã e um condutor. O fenômeno observável, aqui, depende apenas do movimento relativo entre o condutor e o ímã, ao passo que o ponto de vista usual faz uma distinção clara entre os dois casos, nos quais um ou outro dos dois corpos está em movimento. Pois se o ímã está em movimento e o condutor está em repouso, surge, nas vizinhanças do ímã, um campo elétrico com um valor definido de energia que produz uma corrente onde quer que estejam localizadas partes do condutor. Se o ímã, contudo, estiver em repouso, enquanto o condutor se move, não surge qualquer campo elétrico na vizinhança do ímã, mas sim, uma força eletromotriz no condutor, que não corresponde a nenhuma energia *per se*, mas que, supondo-se uma igualdade do movimento relativo, nos dois casos, dá origem a correntes elétricas de mesma magnitude e sentido que as produzidas, no primeiro caso, pelas forças elétricas. (EINSTEIN. “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, 1905).

Assim, se:

- A bobina está em movimento e o ímã em repouso: a carga no interior do condutor experimenta uma força, pois está se movimentando no éter em relação ao campo magnético estático ( $F = qv \times B$ ).

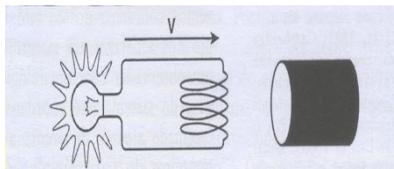
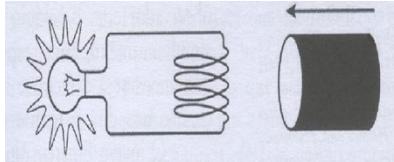


Figura 12. Bobina em movimento e ímã em repouso.

- O ímã está em movimento: o campo magnético, ao se alterar no tempo, produz campo elétrico que guia corrente em torno à bobina.



*Figura 13. Bobina em repouso e ímã em movimento.*

Essa análise possibilitava uma nova questão: as equações de Maxwell eram bem fundamentadas para serem modificadas, a mecânica clássica também. Contudo, a teoria eletromagnética de Maxwell não poderia ser enquadrada no Princípio da Relatividade de Galileu. Este continuaria apenas válido para os fenômenos mecânicos. Einstein não aceitava tal idéia e, como alternativa, fez a opção de modificar as transformações de Galileu propondo que a velocidade da luz era a mesma para qualquer referencial inercial. Enuncia então, dois princípios que alteraram profundamente toda nossa concepção de espaço e tempo:

I - As leis que descrevem a mudança dos estados dos sistemas físicos são independentes de qualquer um dos dois sistemas de coordenadas que estão em movimento de translação uniforme, um em relação ao outro, e que são utilizados para descrever essas mudanças;

II - Todo raio de luz se move no sistema de coordenadas de “repouso” com uma velocidade fixa  $V$ , independentemente do fato de

este raio de luz ter sido emitido por um corpo em repouso ou em movimento.<sup>59</sup>

Assim, Einstein apresenta mediante uma generalização das leis da mecânica, termodinâmica, óptica e eletromagnetismo, uma modificação em nossos conceitos de espaço e de tempo. A partir da teoria de relatividade restrita, não existem espaço e tempo absolutos, não existe o éter. Ainda no artigo “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento” (1905), Einstein coloca:

Exemplos desse tipo (interação eletrodinâmica entre um ímã e um condutor) – em conjunto com tentativas malsucedidas de detectar um movimento da Terra relativo ao “meio luminífero” – levam à conjectura de que não apenas os fenômenos da mecânica, mas também os da eletrodinâmica não têm propriedades que correspondam ao conceito de repouso absoluto. Ao contrário, as mesmas leis da eletrodinâmica e da óptica serão válidas para todos os sistemas de coordenadas nos quais valem as equações da mecânica, como foi recentemente demonstrado. [...] Elevaremos essa conjectura (cujo conteúdo, daqui por diante, será chamado de “princípio da relatividade”) à condição de um postulado. Iremos introduzir também um outro postulado, apenas aparentemente incompatível com esse, a saber: que a luz sempre se propaga no espaço vazio com uma velocidade definida, que é independente do estado de movimento do corpo emissor. [...] A introdução de um “éter luminífero” irá se provar supérflua, uma vez que o ponto de vista a ser desenvolvido aqui não exigirá um “espaço em repouso absoluto”, dotado de propriedades

---

<sup>59</sup> EINSTEIN, “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, in: *O ano miraculoso de Einstein*, Ed. UFRJ. 2001.

especiais, nem atribuirá um vetor velocidade a um ponto do espaço vazio, onde os processos eletromagnéticos estão ocorrendo. (EINSTEIN, “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, 1905).

O tempo e o espaço, até então absolutos, independentes do referencial utilizado, passam a ser relativos. Eventos simultâneos, em um determinado referencial inercial, podem não ser necessariamente simultâneos em outro referencial inercial. A relação entre espaço e tempo a partir da teoria da relatividade restrita faz com que a simultaneidade se torne relativa.

### **3.1 A RELATIVIDADE GERAL E A ESTRUTURA DO ESPAÇO**

A partir da teoria da relatividade restrita no início do século XX, as medidas de tempo e espaço tomadas separadamente até então passam a constituir-se em uma única entidade espaço-temporal. “[...] Daqui em diante, o espaço, por si só, e o tempo, por si só, estão condenados a desvanecer-se em meras sombras, e apenas um tipo de união dos dois conservará uma realidade independente”<sup>60</sup>. O interessante é que podemos perceber a origem desta “fusão” aproximadamente 40 anos antes da elaboração da teoria da relatividade restrita, quando Maxwell unifica a eletricidade, o magnetismo e a óptica numa só teoria eletromagnética, propondo que a luz era uma radiação deste tipo. Para a luz não existem independentemente as entidades espaço e tempo, mas apenas espaço-tempo; não existem intervalos

---

<sup>60</sup> MINKOWISKY, op. cit.

espaciais ou temporais: a luz, ela própria, não percebe nem o espaço nem o tempo<sup>61</sup>.

No artigo “A(s) Relatividade(s) de Einstein” (2005), Videira coloca que,

[...] tal como uma moeda tem, necessariamente, que ser composta pelos dois elementos indissociáveis de ‘cara’ e ‘coroa’, não admitindo qualquer delas uma existência autônoma, qualquer representação formal do mundo fenomenológico que se idealize, qualquer ‘peça’, qualquer teoria física que se confabule tem, imprescindivelmente, que consistir da fusão da entidade espaço-tempo – a geometria ou ‘palco’ espaço-temporal – onde ocorrem os acontecimentos transcritos na ‘peça’.

Assim, a teoria da relatividade restrita exigiu de nós uma mudança em relação às leis clássicas do movimento, uma nova interpretação e descrição para os fenômenos da natureza. A partir dela, em 1911, Einstein propôs o seu Princípio de Equivalência, que se tornou o ponto de partida para uma nova teoria da gravitação apresentada em 1915, em sua teoria da Relatividade Geral. Nesta, os efeitos gravitacionais se propagam com a velocidade da luz, e as leis da Física são reformuladas de maneira a que sejam invariantes com relação aos observadores em referenciais não inerciais ou acelerados.

---

<sup>61</sup> VIDEIRA, L. L. Antonio, “A(s) Relatividade(s) de Einstein”, *Ciência & Ambiente, Einstein*, UFSM, 2005.

Portanto, pelo Princípio da Equivalência de Einstein, sistemas acelerados e sistemas submetidos a campos gravitacionais são fisicamente equivalentes.

Nós iremos, portanto, assumir a completa equivalência física entre um campo gravitacional e a correspondente aceleração de um sistema de referência. Esta hipótese estende o Princípio da Relatividade Especial para sistemas de referência uniformemente acelerados. (EINSTEIN, 1915).

Contrariamente a esta ideia, a Teoria da Gravitação de Newton, apesar de descrever satisfatoriamente as observações experimentais associadas à existência de uma força de atração entre os corpos, admitia que a interação entre eles ocorria instantaneamente, ou seja, com uma velocidade infinita, o que contradiz a exigência relativística de que a velocidade limite de um sinal é  $c$  - a velocidade da luz. Outro problema da Teoria da Gravitação de Newton refere-se à interpretação da massa inercial e da massa gravitacional como uma coincidência. A partir da teoria da relatividade restrita, esta identidade se mostra como uma consequência direta do Princípio de Equivalência. A mesma qualidade do corpo se manifesta ora como “inércia”, ora como “gravidade”<sup>62</sup>.

Espaço e tempo não são mais independentes como eram na Física Clássica. A coordenada temporal de um sistema inercial depende tanto da coordenada do tempo como da do espaço de outro sistema inercial. Assim, a teoria da gravitação desenvolvida por Einstein na teoria da relatividade geral, dispensa qualquer força externa ao espaço-

---

<sup>62</sup> EINSTEIN, [1920], 1999, p. 58.

tempo, pois ele passa a ter propriedades especiais quando há massa ou energia: ele se encurva.

Um espaço-tempo curvo produz efeitos importantes fazendo com que um objeto colocado nesse espaço sinta os efeitos desta curvatura desviando seu movimento, sofrendo acelerações. O que existe é o palco espaço-temporal estruturalmente mais complexo que o de Newton, em que o efeito desta geometria representa a gravitação.

Em uma conferência realizada em maio de 1920 na Universidade de Leyden, intitulada *Ether and the Theory of Relativity*, Einstein responde a uma carta recebida do físico Paul Ehrenfest questionando-o sobre um possível retorno do éter na teoria da relatividade geral. Ehrenfest diz na carta que na teoria da relatividade restrita Einstein abre mão do éter e, contudo, na teoria da relatividade geral, dá a impressão de trazer um “novo” éter.

Einstein responde ao questionamento de Ehrenfest (anexo 1), dizendo:

Recapitulando, podemos dizer que, segundo a Teoria da Relatividade Geral o espaço é dotado de qualidades físicas e, neste sentido, portanto, existe um éter. De acordo com a Teoria da Relatividade Geral o espaço sem éter é impensável, pois nesse espaço não só não haveria propagação da luz, mas também nenhuma possibilidade de padrões de espaço e de tempo (medido por réguas e relógios), nem, portanto, qualquer intervalo de espaço-tempo no sentido físico. Mas esse éter não pode ser pensado como dotado da característica de qualidade de um meio ponderável, como um conjunto de peças que podem ser rastreados através do tempo. A idéia do movimento não pode ser aplicada a ele.

Nessa conferência, que contava com a presença de Lorentz na platéia, Einstein ainda diz:

Estou acreditando em algum tipo de éter na relatividade geral. O que é fundamentalmente novo neste éter (da teoria da relatividade geral), diferente do éter de Lorentz, é que o éter da relatividade geral é determinado em cada lugar por conexões com a matéria e pelo estado do éter em lugares próximos, estando sujeito a leis na forma de equações diferenciais, enquanto o estado do éter de Lorentz, na ausência de campos eletromagnéticos, não está condicionado por nada fora dele, e é o mesmo em todos os pontos.

Assim, mediante a conferência de Einstein, o espaço-tempo na teoria da relatividade geral é uma entidade física, cheia de propriedades, associando-se a uma espécie de éter.

Martins (2008), em uma entrevista à Revista FAPESP comenta o referido artigo de Einstein e diz que “[...] a luz está diretamente ligada às propriedades do espaço tempo. Se você não quer chamar isso de éter, não chame, mas é; é aquilo em que a luz se propaga e que determina as propriedades da propagação da luz, é aquilo que determina segundo Einstein, a possibilidade de você atribuir um sentido físico ao espaço-tempo, como uma coisa que é modificada pela matéria e pela energia e que por sua vez age sobre a matéria e a energia, porque espaço matemático não pode ser influenciado pela matéria e pela energia, tem que ser alguma coisa física. Não devemos confundir o espaço matemático – que na verdade só existe na nossa cabeça – com alguma coisa que interage com a matéria. Uma coisa que interage com a matéria é físico, e para Einstein é o éter”.

A teoria da relatividade geral de Einstein é uma teoria física em que o palco espaço-tempo se entrelaça aos atores – matéria e radiação – desenhando uma nova imagem de Natureza, porém, quiçá, um espaço-tempo também *plenum* de éter.

### **3.2 O ESPAÇO TEMPO NEWTONIANO À LUZ DA TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL**

Como visto anteriormente, Newton apresentou suas três leis fundamentais na obra *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*. Na mecânica de Newton, conhecendo-se as forças que atuam sobre um corpo, é possível obter a trajetória do mesmo. O caráter de universalidade e previsibilidade desta teoria causou expectativa quanto à possibilidade do homem compreender e descrever o mundo à sua volta. A síntese do determinismo em Newton é ilustrada pela colocação de Laplace de que se houvesse uma inteligência capaz de conhecer as posições e velocidades de todas as partículas materiais, bem como as forças que atuam sobre cada uma delas, todo o futuro e todo o passado do Universo seriam conhecidos.

Temos em Newton a conclusão de um processo iniciado na Revolução Científica com Galileu e Kepler de descrição do Universo por meio de leis matemáticas, estabelecendo o paradigma da previsibilidade determinística. Ao unificar a física terrestre com a celeste, através da formulação da lei da gravitação universal, Newton redefiniu os fenômenos mecânicos a um conjunto de poucos e primeiros princípios. Coerente e estruturalmente dependente da idéia de um espaço absoluto, Newton distingue dois tipos de observadores: os dos

referenciais inerciais, aqueles para os quais são válidas suas três leis, e dos referenciais não-inerciais, aqueles para os quais os fenômenos mecânicos não obedecem a estas leis.

Ao identificarmos um observador para o qual as Leis de Newton constituem uma verdade física, todos aqueles que se movem com velocidade constante em relação a ele também serão inerciais, ao passo que aqueles que se movem com aceleração não nula em relação ao primeiro serão não inerciais. Não obstante, poderíamos inverter a afirmação anterior e afirmar que é o primeiro observador que está acelerado em relação a esses últimos. Porém, para Newton, a Natureza possui um critério absoluto de distinção entre estas duas afirmações, e mais: esse critério não se estabelece numa relação entre os corpos, mas em relação a um suposto espaço absoluto.

Defendemos neste trabalho que a concretude deste espaço absoluto foi fundamental à consistência lógica da teoria Newton. Contudo, sua existência foi motivo de severas críticas de Leibniz e Berkeley. Berkeley apontou uma contradição epistemológica nos alicerces da mecânica de Newton: um dos princípios metodológicos da teoria de Newton foi a proposição das leis da Natureza a partir da experiência. Como então explicar a existência de um espaço absoluto independente da matéria e anterior à experiência? Apesar das críticas filosóficas, a concepção de Newton de um espaço absoluto foi gradativamente se consolidando. Euler condicionou a existência de um espaço absoluto à determinação do movimento.

Enquanto a teoria de Newton distinguia observadores inerciais de não inerciais, a teoria eletromagnética de Maxwell

estabelecia distinção até mesmo entre dois observadores inerciais, implicando no reconhecimento de uma aparente velocidade absoluta. Segundo a teoria eletromagnética, as equações dos fenômenos eletromagnéticos seriam diferentes conforme os observadores estivessem parados ou com velocidade constante. Entretanto as experiências realizadas com o objetivo de detectar a possível influência desse movimento uniforme sobre os fenômenos eletromagnéticos apresentaram resultados negativos, indicando um elemento contraditório entre a teoria e a experiência.

Assim sendo, em 1905, a Física sofreu uma profunda transformação com a formulação da teoria da relatividade restrita. De acordo com esta teoria, todos os fenômenos físicos observados demonstravam que a Natureza não possuía um critério de distinção entre dois observadores inerciais, mas sim, que existia equivalência entre todos estes observadores, isto é, as equações que governam todos os fenômenos físicos têm, forçosamente, a mesma forma matemática para qualquer observador inercial. Outro postulado também colocado pela teoria da relatividade restrita estabelece que a velocidade com que a luz se propaga no vácuo,  $c$ , é a mesma independentemente da velocidade da fonte que a emite ou daquele que observa. Estes postulados levaram Einstein a inferir que a simultaneidade de dois eventos é uma noção relativa, dependente do observador.

Com base nestes princípios, Einstein concluiu que o intervalo de tempo entre dois eventos varia de um observador para outro. Disso decorre a impossibilidade de um tempo absoluto, único, medido por todos os observadores. O que há é o tempo próprio, medido pelo

observador para o qual os dois eventos ocorrem no mesmo local – menor do que o intervalo medido por qualquer outro observador. Ainda com base nestes dois postulados, Einstein inferiu que assim como o tempo, as medidas de comprimento também podiam sofrer alterações de acordo com o movimento. Medidas realizadas na direção em que um observador inercial se move em relação a outro são diferentes para ambos.

Contudo, a permanência de uma classe especial de observadores inerciais contrariava uma das questões essenciais da teoria da Relatividade: a negação da realidade física do movimento absoluto. Foi seguindo na elaboração de tais idéias que Einstein chegou à equivalência física não apenas dos observadores inerciais, mas de todos os observadores. Relatou uma experiência de pensamento sobre suas conjecturas dizendo:

Sentado em minha cadeira, no Escritório de Registro de Patentes, em Berna, tive, repentinamente, uma idéia: quando um homem está em queda livre, não sente o próprio peso. Fiquei espantado. Essa simples experiência de pensamento impressionou-me e me levou à teoria da gravitação.<sup>63</sup>

De acordo com Einstein, era impossível distinguir o ponto de vista de um observador não-inercial do de um observador inercial que estivesse submetido a um campo gravitacional.

Com base nesta idéia, Einstein concluiu que para observadores não-inerciais o espaço deveria se apresentar encurvado,

---

<sup>63</sup> Scientific American, “Einstein”, p. 48.

não obedecendo mais a uma geometria euclidiana, mas a uma nova geometria elaborada no século XIX pelo matemático alemão Bernhard Riemann<sup>64</sup>. Não obstante, Einstein concluiu também que o tempo flui de maneira diferente para dois observadores submetidos a campos gravitacionais de intensidades distintas. Assim, não só o espaço obedece à outra geometria, mas o tempo também se apresenta “encurvado” pela presença do campo gravitacional: “O aspecto espacial das coisas reais é então completamente representado por um campo, que depende de quatro parâmetros-coordenados; é uma qualidade desse campo. Se pensarmos no campo sendo removido, não há espaço que permaneça, uma vez que o espaço não possui uma existência independente”<sup>65</sup>.

Assim, a partir da teoria da relatividade geral, as alterações nas direções das trajetórias dos corpos, associadas à ação de uma força gravitacional na mecânica newtoniana, na verdade revelam a estrutura curvilínea de um espaço encurvado pela ação das fontes gravitacionais: matéria e energia.

---

<sup>64</sup> REICHENBACH, 1957.

<sup>65</sup> EINSTEIN, 1953. in: JAMMER, 1988, p. 174.

## CAPÍTULO IV

### Ação a Distância e/ou Não-Localidade na Mecânica Quântica

#### 4.1 O TEOREMA DE BELL E A NÃO-LOCALIDADE

Numa síntese até o momento, vimos dois mecanismos teóricos propostos para a ação de um corpo sobre o outro:

I - ação a distância newtoniana, em que a ação gravitacional seria de forma instantânea e,

II - ação por contato ou “local” (a partir da idéia de campo em Faraday), em que as ações se transmitem de maneira contígua, “local”, de um ponto a outro encostado nele, a uma velocidade finita e nunca superior à velocidade da luz no vácuo, o que implica na não-instantaneidade.

Portanto, o caminho traçado desde a Teoria da Gravitação de Newton até a Teoria da Relatividade Geral de Einstein – no que se refere à interação entre os corpos – representava um sólido arcabouço da Física no início do século XX, a não ser pela “estranheza” de algumas interpretações do mundo microscópico que começavam a despontar. No artigo “Can Quantum - Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?”, Einstein em 1935, em parceria com Podolsky e Rosen, discutiu um aspecto enigmático da mecânica quântica: em um par de partículas “emaranhadas”, a medida de uma grandeza física para uma das partículas levava a determinação do valor

de uma grandeza física correspondente para a outra partícula, mesmo que elas estivessem muito distantes, lembrando a idéia já há muito banida da física de uma “fantasmagórica ação a distância”. Em 1964, o físico John Bell, trabalhando no grande centro acelerador de partícula de Genebra, CERN, fascinado pelas questões da realidade quântica, resolveu investigar o polêmico artigo de Einstein, que ficou conhecido como Paradoxo de EPR, em referência às iniciais dos nomes de seus três autores.

Baseado nesse estudo, Bell deduziu o teorema que leva seu nome – Teorema de Bell – que diz que nenhum modelo local de realidade pode dar suporte aos fatos quânticos; em síntese, diz que a realidade deve ser necessariamente não-local. Isto significa, em essência, que existe na natureza uma aparente “ação a distância”, sem mediações. Uma interação não-local entre um corpo A e B não necessita de mediação. Uma interação não-local, em resumo, é não-mediata, não-atenuável e instantânea.

Apresentamos neste texto um breve relato conceitual das questões que fizeram com que Einstein, apesar de ser considerado um dos pais da mecânica quântica, se tornasse um de seus maiores críticos, abrindo espaço para que, inclusive, alguns físicos considerassem que a opção entre a teoria quântica e a teoria das variáveis ocultas – elaborada levando-se em conta as considerações de Einstein – fosse, até 1964, uma opção de preferência filosófica<sup>66</sup>.

No artigo *Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz*, publicado em 1905, Einstein

---

<sup>66</sup> DAVIDOVICH, 1990.

apresentou o que considerou sua mais revolucionária hipótese: a de que a luz comporta-se “como se fosse” constituída de unidades elementares de energia proporcional à sua freqüência. Essa hipótese ia de encontro ao caráter ondulatório da luz estabelecido na teoria do campo eletromagnético de Maxwell<sup>67</sup>. Mediante esta idéia, Einstein propõe uma explicação para o efeito fotoelétrico: a incidência de luz sobre a superfície de certos metais leva à emissão de elétrons, cuja energia independe da intensidade da luz e parece aumentar com a freqüência. Einstein propôs que a emissão de um elétron é causada pela absorção de um fóton de energia  $h\nu$ , sendo  $h$  a constante de Planck e  $\nu$  a freqüência da luz. A energia do elétron emitido é dada por  $E = h\nu - W$ , sendo  $W$  a energia necessária para vencer uma barreira de energia que depende do metal.

Mais tarde, em 1909, Einstein voltou à teoria quântica da luz apresentando dois artigos: “Sobre a evolução da nossa visão sobre a natureza e constituição das radiações (On the evolution of our vision on the nature and constitution of radiation)” e “Sobre o estado atual dos problemas de radiação (On the current state of radiation problems)” nos quais investigou as flutuações de energia da luz emitida por um corpo negro, representada pela distribuição de Planck. Mostrou nesse trabalho dois tipos de contribuição para essas flutuações: o caráter ondulatório e o caráter corpuscular. Assim, conjecturou sobre a dualidade onda-partícula da luz<sup>68</sup>. Em 1916 e 1917, retornou a esse problema e escreveu três artigos que tratam dos processos de emissão e

---

<sup>67</sup> PAIS, 1996.

<sup>68</sup> EINSTEIN, Phys. Zeitschr. **10**, 185, 817 (1909).

absorção de radiação. No artigo de 1917, “Teoria quântica da radiação (Quantum theory of radiation)”<sup>69</sup>, considerou ser “[...] um ponto fraco da teoria (de emissão espontânea), que ela deixe ao acaso o instante e a direção dos processos elementares”. Em janeiro de 1920, escreveu uma carta a Max Born, na qual revelou sua preocupação com os aspectos probabilísticos da teoria da radiação:

Poderão a absorção e emissão quânticas da luz jamais ser entendidas no sentido do requisito de causalidade completa, ou um resíduo estatístico permanecerá? Devo admitir que me falte nesse ponto a coragem de uma convicção. Todavia, eu ficaria muito infeliz de renunciar à causalidade completa.<sup>70</sup>

Assim, percebemos os primeiros traços da principal crítica de Einstein à teoria quântica: seu caráter probabilístico intrínseco.

Em 1922, diante de estudos realizados sobre radiação incidente sobre um átomo, Arthur Compton propõe que “os quanta de radiação carregam consigo momentum, além de energia”<sup>71</sup>. Admirado com o resultado do experimento de Compton, e baseado neste, de Broglie apresentou em 1923 uma proposta semelhante à de Einstein, porém reversa. Ou seja, para de Broglie, uma partícula material como o elétron revela propriedades tipicamente ondulatórias, tais como padrões de difração e interferência:

Tendo uma concepção mais ‘realística’ da natureza do mundo físico e pouca inclinação para

---

<sup>69</sup> EINSTEIN. *Physikalische Zeitschrift* 18:121-128, 1917.

<sup>70</sup> EINSTEIN, [1920], 1971, p. 23.

<sup>71</sup> COMPTON, *Phys. Rev.*, 21, 483, 1923.

considerações puramente abstratas, queria representar para mim mesmo a união de ondas e partículas de uma maneira concreta, a partícula sendo um objeto bem localizado incorporado na estrutura de uma onda se propagando.

Assim, para de Broglie, uma partícula material teria associada a si uma entidade ondulatória, que ele denomina de *onda de fase* ("*ondes de phase*"), a qual dirigiria o movimento do elétron e sua interação com a radiação e com a matéria – daí a denominação "onda piloto" atribuída a ela. Na carta em que Jean Perrin nomeia de Broglie para o prêmio Nobel de 1929 lê-se que [de Broglie] "[...] foi o primeiro a propor que luz e matéria tenham uma estrutura essencialmente análoga (partículas guiadas por trens ou 'estruturas de onda')"

Em janeiro de 1924, Niels Bohr juntamente com Hendrik Anton Kramers e John Clarke Slater propõe uma teoria alternativa à de Compton, chamada de teoria BKS em referência às iniciais de seus nomes. Nessa teoria, em nome da manutenção da teoria ondulatória abre-se mão da conservação da energia e do momentum em processos individuais de emissão de radiação. É interessante observar que, nesse período, Einstein é ainda um dos poucos defensores da tese de que a luz era constituída de corpúsculo.

Diante das novas evidências experimentais sobre a natureza da luz, Bohr em 1925 publicou: "Devemos estar preparados para o fato de que a generalização necessária da teoria eletrodinâmica clássica requer uma revolução profunda nos conceitos sobre os quais se baseou até agora a descrição da natureza"<sup>72</sup>.

---

<sup>72</sup> BOHR, *Phys.*, 34, 142, 1925.

Schrödinger conheceu o trabalho de de Broglie em 1925, e no ano seguinte publicou na revista *Annalen der Physik*<sup>73</sup> um conjunto de quatro artigos sobre a mecânica ondulatória, apresentando-a como uma generalização das considerações de de Broglie e Einstein.

Em seu trabalho, Schrödinger passou a considerar a possibilidade de cada uma das partículas mais elementares que constituem a matéria ser formada, em última análise, por *ondas*. "O ponto considerado aqui [...] é que partículas materiais consistem de, ou são nada menos do que sistemas de ondas"<sup>74</sup>. Com isso, Schrödinger radicalizou a proposta de de Broglie, associando uma onda de fase imaterial (a "onda piloto") a uma partícula como o elétron, propondo que a partícula seja fisicamente constituída por um campo clássico e contínuo, de natureza ainda desconhecida, que se propaga no espaço como um grupo de ondas, um "sistema de ondas" em suas próprias palavras (o que hoje é denominado "pacote" de ondas), altamente localizado no espaço e deslocando-se em relação a um observador qualquer com uma certa velocidade. Em vez de falar em "ondas de fase" como de Broglie, Schrödinger se refere a "ondas de matéria" ("matter waves"), constituindo as partículas elementares da matéria.

Com essa espécie de concepção monística da natureza, Schrödinger tentava restabelecer a harmonia entre a Física Clássica e os resultados dos experimentos quânticos, conjecturando que as

---

<sup>73</sup> *Annalen der Physik*, volumes 79 (4), 80 (4) e 81 (4), (1926); Os quatro artigos traduzidos para o inglês aparecem na coletânea "Collected Papers on Wave Mechanics", Chelsea Publishing Company, New York, 1982, junto com outros artigos importantes de Schrödinger sobre a mecânica ondulatória

<sup>74</sup> SCHRÖDINGER, *Phys. Rev.* 28, 1049 (1926).

descontinuidades quânticas detectadas nos experimentos microscópicos pudessem ser entendidas em termos de um campo *contínuo* que se propaga como uma onda de matéria. Se tal harmonia fosse alcançada de uma maneira matematicamente consistente, a teoria quântica passaria a ser considerada somente um novo ramo da Física Clássica, e não uma teoria que rompe radicalmente com os conceitos clássicos<sup>75</sup>.

Ainda em continuidade a esses estudos, Max Born considerou que o módulo ao quadrado da função de onda de Schrödinger deveria ser interpretado como uma densidade de probabilidade<sup>76</sup>. Isso significava admitir o abandono da idéia de uma causalidade clássica, o que levou Einstein a escrever para Born dizendo que

A mecânica quântica é muito impressionante. Mas uma voz interna me diz que ela não é ainda a última palavra. A teoria produz muitos resultados, mas não nos traz mais perto do segredo do Velho. Estou de qualquer forma convencido de que Ele não joga dado.<sup>77</sup>

---

<sup>75</sup> RICCI, T. F., *A gênese da Mecânica Ondulatória*.

<sup>76</sup> BORN, 1926.

<sup>77</sup> BORN, *op. cit.*

Na mecânica quântica, a *função de onda* é quem permite determinar o estado quântico de uma partícula através de “probabilidades” de se obter valores da posição e do momentum. Conhecida a função de onda em um instante, a equação de onda permite determiná-la em qualquer instante posterior. Esta interpretação probabilística foi o que permitiu conciliar a teoria ondulatória de Maxwell com a idéia de que a luz é constituída de partículas. Através da

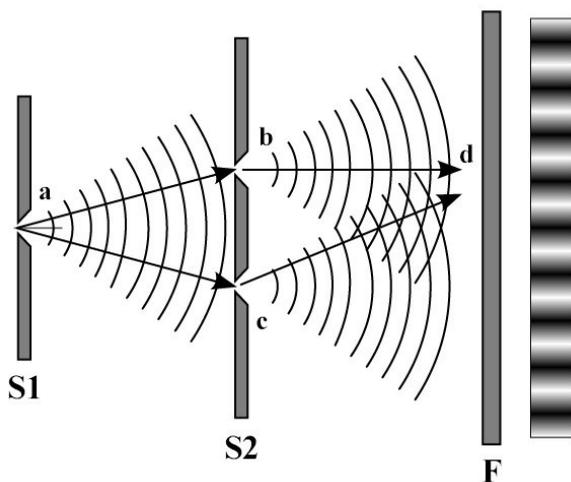


Figura 14. Representação esquemática da experiência de Young.

experiência da dupla fenda (ou experiência de Young), a onda associada aos corpúsculos representa a probabilidade de eles chegarem às diversas regiões do anteparo **F** onde se produzem as franjas claras e escuras, como na figura 12. Nas regiões de sombra, é nula a probabilidade de se encontrar um fóton. Por outro lado, ao se tentar

realizar medidas que identifiquem a “trajetória” deste fóton, a figura de interferência desaparece!

Para Niels Bohr, esse fato surpreendente revelou um aspecto complementar da mecânica quântica: as manifestações do aspecto corpuscular e ondulatório ocorrem em experimentos distintos. O que podemos dizer é que a partícula é descrita por uma função de onda que a localiza em torno das duas fendas ao mesmo tempo. Desde então, debates entre Einstein e Bohr se constituíram como questões fundamentais da Física do século XX. Para Einstein, a mecânica quântica é uma teoria incompleta por não possibilitar uma descrição determinista dos fenômenos independentemente das condições experimentais, ou seja, a mecânica quântica não descreve o que Einstein chama de uma *realidade objetiva*.

No artigo publicado em 1935, Einstein, Podolsky e Rosen<sup>78</sup> discutem, então, o que veio a ser considerado o aspecto mais intrigante da mecânica quântica: o dos “estados emaranhados”, apresentando neste trabalho o conceito de “elemento de realidade física”:

[...] se, sem perturbar um sistema, podemos prever com certeza (isto é, com probabilidade igual a um) o valor de uma quantidade física, então, existe um elemento de realidade física correspondendo a essa quantidade física.

---

<sup>78</sup> EINSTEIN, PODOLSKY & ROSEN, 1935.

Porém, em um estado emaranhado a posição e o momentum de cada partícula permanecem indefinidos, assim como no caso da polarização dos fótons no experimento descrito na figura 15. Somente quantidades relativas ao conjunto de duas partículas estão bem definidas. Ou seja, o estado do sistema global é conhecido, mas os estados das partes que o compõem são incertos<sup>79</sup>. Assim, a posição e o momentum de uma partícula não podem ser simultaneamente elementos de realidade, porque não podem ser bem determinados ao mesmo tempo.

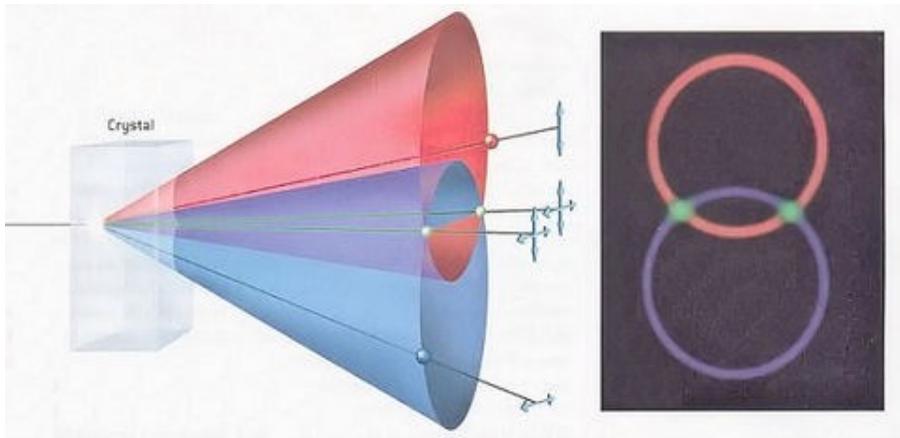
Ainda em 1935, Schrödinger publicou uma análise dos estranhos resultados da nova teoria quântica. Em um dos trabalhos, Schrödinger afirma que:

Eu não diria que o emaranhamento é *um* mas o traço característico da mecânica quântica, aquele que leva ao abandono completo do pensamento clássico. [...] Dispomos assim provisoriamente (até que o emaranhamento seja destruído pela observação) apenas de uma descrição comum dos dois (subsistemas) em um espaço de mais dimensões. Esta é a razão pela qual a informação sobre os sistemas individuais pode ser extremamente reduzida, ou mesmo nula, enquanto a informação sobre o sistema combinado permanece máxima. A melhor informação possível do todo não inclui a melhor informação possível sobre suas partes – e isso é que vem constantemente nos assombrar.<sup>80</sup>

---

<sup>79</sup> DAVIDOVICH, op. cit.

<sup>80</sup> SCHRODINGER, [1935], 1980.



*Figura 15. Emaranhamento quântico: Pares de fótons emaranhados são criados quando um feixe laser passa através de um cristal que converte um único fóton ultravioleta em dois de baixa energia, um polarizado verticalmente (vermelho), o outro horizontalmente (azul). Se os fótons estão localizados na interseção dos cones (verde), nenhum deles tem polarização definida, mas suas polarizações relativas são complementares, eles estão emaranhados.*

Nesse artigo, Schrödinger propôs um experimento mental conhecido como “gato de Schrödinger” com o objetivo de mostrar como determinadas interpretações dos resultados da mecânica quântica, poderiam levar a uma estranha realidade, como no caso em questão, em que o gato se encontra morto e vivo ao mesmo tempo até que se abra a caixa:

Podemos configurar casos bastante ridículos. Um gato é colocado em câmara de aço, juntamente com o dispositivo a seguir (que deve ser protegido das interferências diretas do gato): em um contador Geiger existe uma quantidade minúscula de substância radioativa, tão pequena, que talvez no decurso de uma hora um dos átomos decaia,

mas, com igual probabilidade, talvez não; se isso acontecer, o tubo do contador emite uma descarga e através de um retransmissor libera um martelo que quebra um pequeno frasco de ácido hidrocianeto. Se deixarmos este sistema isolado por uma hora, poderemos dizer que o gato continua vivo se o átomo não tiver decaído. A função psi de todo o sistema iria expressar isto tendo em si um gato vivo e morto (com perdão da expressão) misturados ou sobrepostos em partes iguais”. (Schrödinger, 1935)

Esse experimento, representado na figura 16, é equivalente à experiência da dupla fenda: a função de onda da partícula que passa pelo anteparo com duas fendas é localizada em torno destas. Contudo, ao tentarmos observar por qual delas a partícula passa, desaparece a figura de interferência. Assim também acontece com a experiência do

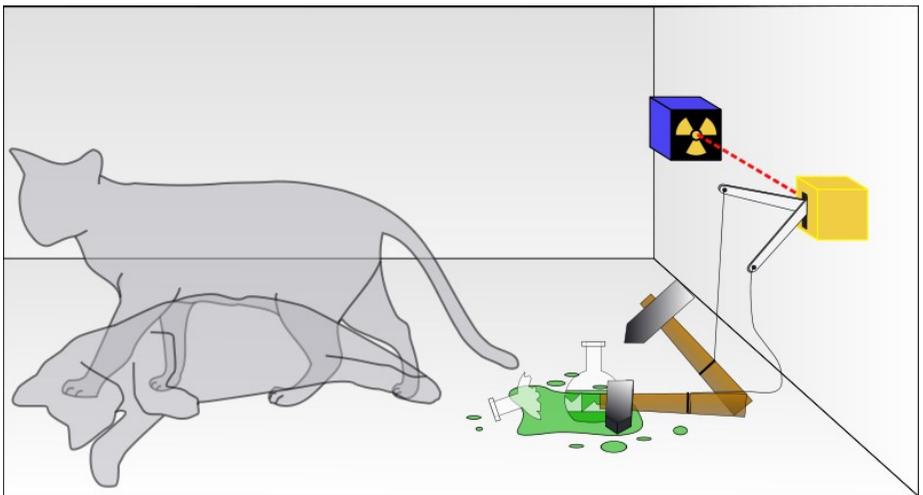


Figura 16. Experimento mental conhecido como “gato de Schrödinger”.

gato de Schrödinger: somente quando abrimos a caixa e observamos o estado do gato, podemos verificar se seu estado é de vivo ou morto.

Enfim, a teoria quântica nos conduz a uma leitura diferenciada do mundo microscópico e, conseqüentemente, dos fenômenos da natureza. Os objetos são descritos por funções de onda e o princípio de superposição é válido. Conciliamos aspectos contínuo/ondulatório com discreto/corpuscular. Alguns físicos vêm desenvolvendo teorias alternativas segundo as quais os “elementos de realidade” designados por Einstein seriam governados por “variáveis ocultas”.

De acordo com a teoria das variáveis ocultas, a natureza estatística da mecânica quântica implica em ela ser uma teoria incompleta, ou seja, a mecânica quântica por definição seria uma descrição incompleta da realidade. A primeira teoria de variáveis ocultas foi a *teoria da onda piloto* proposta por Louis de Broglie no final de 1920. Atualmente, a teoria mais conhecida de variáveis ocultas é a do físico e filósofo David Bohm, criada em 1952, e definida como uma interpretação causal da teoria quântica ou uma teoria de variáveis ocultas não-local. O que Bohm fez, baseado na idéia original de de Broglie, foi posicionar a partícula quântica, por exemplo, um elétron, a uma “onda guia” oculta que governa seu movimento. Nesta teoria os elétrons são claramente definidos como partículas. Quando se realiza um experimento de dupla fenda, ele passa através de uma fenda ou da outra exclusivamente. Contudo, sua escolha de fenda não é aleatória, mas governada pela onda guia, resultando no padrão de onda observável.

Enquanto para Bohr o objeto quântico não pode ser isolado do aparelho de medição, na leitura realista de Bohm, um objeto quântico não pode ser isolado do resto do universo:

Na teoria quântica, vimos que nenhuma das propriedades destas “partes” (do universo) pode ser definida, exceto em interação com outras partes [...] Parece necessário, portanto, abandonar a idéia de que o mundo pode ser corretamente analisado em partes distintas (que trabalham juntas de acordo com leis causais exatas para formar um todo), e substituir esta idéia pela suposição de que o universo todo é basicamente uma unidade única e indivisível.<sup>81</sup>

Crítico da interpretação da complementaridade elaborada por Bohr, Einstein também se manteve contrário à idéia das variáveis ocultas. Sua posição pode ser compreendida se consideramos seu próprio programa de desenvolvimento da Física teórica: unificar as teorias de campos tendo como base o contínuo espaço-tempo. Uma teoria completa do campo contínuo e da fonte do campo esclareceria os problemas conceituais e teóricos da física quântica. Apesar da simpatia pelo não-conformismo e talento teórico de Bohm, Einstein criticou a tentativa do programa causal por ele proposta em que o objeto quântico se divide em duas partes: uma sendo só partícula – com trajetória bem definida (mas desconhecida) –, e a outra só onda.

Ao estudar o trabalho de Bohm, Bell observou que as fórmulas que fornecem as velocidades das partículas apresentam o “traço curioso

---

<sup>81</sup> BOHM, 1951, pp. 139-140.

de ter em geral um caráter incontestavelmente não-local”<sup>82</sup>. Bohm, ao contrário do apresentado por Einstein, Podolsky e Rosen no artigo de 1935, aceitou a não-localidade. O Teorema de Bell ficou também conhecido como teorema da impossibilidade de teoria de variáveis ocultas locais, e mostrou que, de fato, as previsões da teoria quântica são corretas em oposição às previsões da teoria das variáveis ocultas. Em uma carta a Nick Herbert, Bell expõe sua descoberta:

Já faz muito tempo que sou fascinado pela experiência EPR. Ela contém, ou não, um paradoxo? Impressionaram-me profundamente as restrições de Einstein a respeito da teoria quântica e sua opinião de que ela seria uma teoria incompleta. Por razões diversas, aquele era para mim o momento oportuno para atacar de frente o problema. O resultado foi o inverso do que eu pensara. Mas fiquei maravilhado – numa área onde tudo era indefinido e obscuro, eu encontrara algo sólido e claro.<sup>83</sup>

O ponto de partida para seu trabalho foi pressupor a existência de uma realidade local. Utilizando-se de uma experiência de pensamento e um pouco de aritmética, Bell demonstrou que tal pressuposição de localidade conduzia diretamente a uma inequação que deveria ser satisfeita através de resultados experimentais. No entanto, quando efetuadas, essas experiências contrariavam a inequação. Esse fato o levou a concluir que qualquer realidade que dê suporte à experiência EPR deveria ser necessariamente não-local. Contudo, desde Newton até Einstein, a convicção em forças estritamente locais

---

<sup>82</sup> BELL, 1966.

<sup>83</sup> HERBERT, 1989.

explicavam nosso universo. O conceito de campo, por exemplo, nos permitiu considerar a gravidade como uma interação estritamente local, embora ela atue através da imensidão do espaço. A essência de uma interação local é o contato direto.

Contrariamente, a não-localidade é uma influência sem qualquer mediação, sem contigüidade. É uma aparente ação a distância no sentido que algo “estranho” acontece quando duas partículas estão quanticamente correlacionadas.

## Considerações Finais

No decorrer desse trabalho conhecemos visões de mundo de diferentes cientistas. Visões estas que acabam por desenhar ou refletir diferentes contextos sociais, científicos e filosóficos nos quais estes se inserem. Julgamos importante apresentar algumas considerações a respeito do que percebemos da relação entre a imagem de ciência estabelecida em um determinado período, sua associação direta com o instrumental científico já desenvolvido, assim como do princípio filosófico que norteia essa construção. Sabemos que “a ciência é feita das escolhas de seus protagonistas e como tal, repleta de subjetividade. Uma teoria científica é uma suposição explicativa, e negar a influência da imaginação como agente ativo na construção do conhecimento seria no mínimo ingenuidade. Embora a ciência possua regras bem definidas, seu método se limita a obtenção e tratamento de dados. O surgimento da idéia ou da hipótese inicial é fruto do salto intuitivo da livre imaginação humana”<sup>84</sup>.

E é considerando esse “salto intuitivo da livre imaginação humana” que percebemos a necessidade de fugirmos de um tendencioso reducionismo que muitas vezes nos aprisiona, levando-nos a crer que podemos descrever muito com muito pouco. Guardando suas especificidades, algumas teorias ou idéias representam muito mais do que o permitido naquele contexto. Defendemos aqui um conhecimento científico que perpassa as definições, postulados e axiomas, porque não se reduz ao específico, ao individual.

---

<sup>84</sup> PEREIRA, 2009.

Propusemos neste trabalho discutir o problema da ação a distância instantânea entre dois corpos como uma interpretação da Lei da Gravitação de Newton. A partir dessa questão, nos propusemos a investigar se este problema (ação a distância) persistia de algum modo no conceito de campo, na relatividade e na não-localidade apresentada pela mecânica quântica. Esta pesquisa nos levou a propor que o espaço em Newton possui uma existência concreta, pois ainda que “vazio”, pode ser percebido experimentalmente, concretamente. Esta concepção, de certa forma, nos levou a uma interpretação diferenciada da controversa ação a distância no vazio, influenciando efetivamente na trajetória deste trabalho.

Newton, ao propor uma ação a distância em sua Lei da Gravitação, inferindo que matéria atrai matéria, jamais tornou este espaço vazio no sentido *strictu* da palavra. Ao contrário, apresenta em diversos textos sua crença na impossibilidade de que a “matéria bruta inanimada (sem a mediação de outra coisa que não seja material) aja sobre outra matéria e a afete, sem haver contato mútuo” (NEWTON, 1692/3). Nos textos de Newton, é clara, também, sua resistência em explicar a “causa” de matéria agir sobre matéria à distância. Diz, no entanto, que o “efeito” dessa ação é a força gravitacional. A colocação de que a “matéria em si” em um espaço vazio é a responsável pela força de atração entre os corpos, apesar de quase hegemônica, é apenas uma das possíveis interpretações de sua teoria. Nesse sentido, apesar de toda a discussão resultante desta colocação, num paradigma em que a relação causal era o descritor da ciência, ressaltamos uma situação de correlação ou interdependência em que o observador (no caso Newton),

enxerga o “resultado final” e não o que “causa” o efeito, a “causa” de tal relação existir.

Sabemos que a mecânica newtoniana admite velocidades tão altas quanto se queira supor. Conseqüentemente, a instantaneidade não consistia em um problema naquele contexto. Havia uma ação a distância entre os corpos em um espaço absoluto indescritível, porém sensível, a uma velocidade que, epistemologicamente, podia ser pensada com valor infinito. Enfim, havia um meio intermediando a ação entre os corpos – o espaço absoluto – e essa ação se propagava a uma velocidade infinita.

Houve sim uma ruptura evidente da física aristotélica para a galileana, em que o mundo dos sentidos, preenchido pelos quatro elementos – terra, fogo, ar e água – cedia lugar a um mundo de condições ideais – sem atrito e sem resistência do ar. O mundo ideal em Aristóteles se limitava ao espaço supralunar, plenum de éter. A Física terrestre – própria do mundo dos sentidos – se diferenciava radicalmente da Física celeste – do mundo perfeito. Paradoxalmente, a partir do nascimento da ciência moderna, aprendemos a descrever o mundo em que vivemos – corruptível na concepção de Aristóteles – com base na conjectura de um mundo ideal: plenum, porém, sem atrito ou resistência do ar.

Vimos também no primeiro capítulo uma interpretação diferenciada, paralela à concepção newtoniana, apresentada por Leibniz, que propôs existir estruturas fundamentais no universo denominadas mônadas. Para Leibniz, a mônada podia ser relacionada à alma humana. O universo era plenum de mônadas. Em sua obra

*Monadologia*, propõe que “este vínculo ou esta acomodação de todas as coisas criadas a cada uma, e de cada uma a todas as outras, faz com que cada substância simples tenha relações que exprimem todas as outras e seja, por conseguinte, um perpétuo espelho vivo do universo”. Em sua obra *Novo Sistema da Natureza e da Comunicação das Substâncias* (1695), também se refere a esta questão dizendo:

No início, quando me libertei do jugo de Aristóteles, eu era favorável aos átomos e ao vácuo, porque este ponto de vista melhor satisfazia a imaginação. Mas refletindo melhor sobre o assunto, após muito meditar, vi que é impossível encontrar os princípios da verdadeira unidade tão somente na matéria ou em algo que seja apenas passivo, visto que nada mais é que uma coleção ou agregado de partes ad infinitum. ...Percebi, então, que a natureza das formas substanciais consiste na força e que daí resulta algo análogo ao sentimento e ao apetite; e que devem, por isso, ser entendidas em conformidade com nossa noção de almas. Mas, exatamente como a alma não necessita ser usada para explicar em detalhes as operações de um corpo animal, decidi que, semelhantemente, essas formas não deveriam ser usadas para explicar problemas particulares da natureza, embora sejam necessárias para fundamentar princípios gerais verdadeiros. Aristóteles denomina-as primeiras enteléquias. Eu as denomino, talvez mais inteligivelmente, forças primárias, que contêm não apenas o ato, ou simples satisfação de uma possibilidade, mas também uma atividade originária. (LEIBNIZ, 1695)

Para Leibniz, a força ativa era um atributo do próprio corpo que se movia, e não uma ação externa a ele; em cada partícula havia uma força que dava origem a sua mudança como uma atividade própria, ainda que estimulada de fora. Paradoxalmente, embora no choque entre

duas partículas a força que atuava em cada uma estivesse nela própria, e não na ação da outra, Leibniz admitia que cada partícula sofria a ação de todas as demais através do plenum que preenchia o espaço. Todos os corpos sentiam o efeito de tudo que acontecia no universo, a qualquer distância:

Parece-me que todo espírito é onisciente, por um modo confuso; que todo espírito percebe simultaneamente tudo que ocorre no mundo inteiro e que essas percepções confusas de infinitas variedades simultâneas produzem as sensações que possuímos das cores, sabores e sensações táteis. Pois tais percepções consistem, não em um ato do intelecto, mas, em um agregado de infinitos atos”. (LEIBNIZ, 1676, op. cit.)

Para Leibniz, a mudança ou movimento associado a um corpo não se limita, exclusivamente, ao que é interno, à essência da matéria, nem tampouco ao que é externo a esse corpo, mas sim, a um agregado de infinitas ações, internas e externas a cada universo inscrito em cada mônada. Assim, justifica a ação entre os corpos colocados um distante do outro:

Pois como tudo é pleno, o que torna toda a matéria ligada, e como no pleno todo movimento produz algum efeito sobre os corpos distantes, proporcional à distância, de tal sorte que cada corpo é afetado não somente pelos que o tocam e se ressentem, de certo modo, de tudo o que lhes acontece, mas também por meio deles se ressentem dos que tocam os primeiros, pelos quais é imediatamente tocado; segue-se que esta comunicação transmite-se a qualquer distância. E, por conseguinte, todo corpo se ressentem de tudo que se faz no universo, de tal modo que aquele que

tudo vê poderia ler em cada um o que se faz em toda parte e até o que foi ou será feito, observando no presente o que está afastado tanto nos tempos como nos lugares; *sympnoia panta* (tudo conspira), dizia Hipócrates. (LEIBNIZ, *Monadologia*, s/d)

E ainda,

Um maravilhoso plenum do tipo que exponho é racional, ainda que não consista de nada além de esferas. Pois não há lugar tão pequeno que nele não possa ser presumido que lá exista uma esfera ainda menor. Assumindo que as coisas são assim, não haverá lugar específico que esteja vazio. (LEIBNIZ, 1676, op. cit.)

As colocações feitas por Leibniz nas citações acima ressaltam, mais uma vez, a dificuldade inerente à natureza humana de se trabalhar com o “nada” ou o “vazio” e, ao mesmo tempo, tentar explicar as interações que ocorrem na natureza. Apesar das diferenças fundamentais entre o *plenum* em Aristóteles, Descartes, Leibniz e Newton, percebemos que existe em comum a necessidade de algo que permeie o contato entre os corpos. O meio se constrói como uma necessidade específica da realidade apresentada.

No segundo capítulo deste trabalho, vimos que a partir da idéia das linhas de força de Faraday, a teoria eletromagnética de Maxwell<sup>85</sup> evidenciou a necessidade de nomear e descrever um meio responsável pelas interações entre cargas elétricas, trazendo de volta a idéia do éter. Uma carga elétrica não produzia efeito em outra carga elétrica à

---

<sup>85</sup> MAXWELL, 1864, op. cit.

distância instantaneamente (como estabelecido para os fenômenos gravitacionais através da mecânica newtoniana), mas sim, gerava um campo que se propagava à velocidade da luz, responsável pela interação entre as mesmas. Com o advento do eletromagnetismo, o campo ganhou realidade física, tornando-se um constituinte do universo além da matéria. As ondas eletromagnéticas são campos viajando no vácuo, ou seja, carregam pura energia sem matéria. No livro *Tecnociências e Humanidades, vol. 2*, Pinguelli coloca que “nada mais inspirador para as especulações metafísicas do que essa energia das ondas eletromagnéticas que caminha por si sem matéria. Na concepção intuitiva, herdada da mecânica, tão estranha era essa onda imaterial que se lançou mão do éter como um meio preenchendo o vácuo para dar suporte material à propagação dessas ondas. Mas o éter, tomado emprestado de Aristóteles e Descartes, era ainda mais embaraçoso e terminou abolido por Einstein na teoria da relatividade restrita. As equações de Maxwell no vácuo não expressam uma relação entre os campos, como leis que governam sua propagação na ausência da matéria. Elas aparecem independentemente das leis de Newton e, ao contrário da gravitação, não relacionam eventos simultâneos em pontos distantes do espaço, como a atração da matéria pela matéria à distância, entre o Sol e a Terra ou entre esta e a Lua. A propagação dos campos se dá de um ponto aos seus vizinhos mais próximos, relacionando a situação em um momento à situação no momento imediatamente anterior, em um contínuo espacial e temporal<sup>86</sup>.

---

<sup>86</sup> ROSA, 2006.

Ainda que, como constituinte do universo além da matéria ou, numa outra concepção, uma manifestação desta,<sup>87</sup> o campo preenche o vazio através de um contínuo espaço-temporal, respondendo ao desejo humano de um conhecimento verdadeiro e justificado, capaz de descrever e explicar, mesmo que matematicamente, a natureza dos fenômenos naturais. Nesse sentido, há um alívio em relação à incômoda concepção de uma ação a distância instantânea num espaço vazio; o espaço está cheio de campo que “viaja” com velocidade igual à da luz. A ação se dá ponto a ponto, contiguamente, num espaço pleno de campo. Contudo, é interessante observarmos que a teoria eletromagnética de Maxwell repetiu – com a propagação dessa onda eletromagnética em um vácuo pleno de éter (que deveria ter propriedades diferentes da matéria que conhecemos) – a ousadia teórica de Newton, ao formular a Lei da Gravitação inferindo que matéria atrai matéria em um espaço absoluto concreto, porém indescritível. De fato, é difícil optar pelo que seria mais ousado: uma “ação a distância instantânea em um espaço absoluto”, ou “ondas eletromagnéticas que caminham por si sem matéria”.

Vimos no terceiro capítulo que com a relatividade restrita em 1905, Einstein negou o éter da teoria eletromagnética de Maxwell, assim como o espaço e o tempo absolutos, considerando-os grandezas físicas relativas. Contudo, logo a seguir, com a relatividade geral, ele introduziu o espaço-tempo como uma entidade física, com concretude e propriedades, cujo “efeito” era sensível aos “nossos sentidos”. Um

---

<sup>87</sup> A partir da teoria quântica dos campos do século XX, podemos ver a matéria como uma manifestação dos campos.

corpo material, como a Terra ou o Sol, por exemplo, de acordo com a teoria da relatividade geral, não atrai outro corpo material, mas produz uma deformação no espaço-tempo que obriga os planetas em sua proximidade a descreverem trajetórias especiais. Os planetas sentem a deformação do espaço-tempo influenciado pela matéria, pela energia, e não a atração do Sol ou de outro corpo. Ora, para que isso ocorra, é preciso que, de fato, tenhamos também um espaço-tempo concreto, pleno, com propriedades físicas reais.

A relação espaço-tempo se modifica, deixa de ser “absoluta em suas especificidades”, como em Newton, e passa a ter propriedades especiais: o espaço-tempo se encurva. Isso produz efeitos importantes: quando um objeto se encontra em uma região no espaço onde há a deformação do espaço-tempo, ele sente os efeitos e é desviado em seu movimento. Essa propriedade levou Einstein a se manifestar de forma contrária à que tinha assumido até então, dizendo que “de acordo com a teoria da relatividade geral, um espaço sem éter é impensável (...)”.

Assim, o trabalho desenvolvido até o momento, nos levou a uma trajetória cheia de imprevistos, descobertas e surpresas. A pesquisa sobre a possibilidade e abrangência de uma “ação a distância instantânea” entre os corpos desde a Lei da Gravitação de Newton até a Não-Localidade na mecânica quântica, exigiu de nós uma profunda reflexão sobre os conceitos de espaço, tempo e éter. Consideramos importante ressaltar as diferentes interpretações e colocações destes conceitos ao longo do tempo. Como já dissemos anteriormente, a ciência é feita por homens e, como tal, trás em si as marcas de uma

construção, de um processo em que é permitido ir e vir. Na Conferência *Éter e a Teoria da Relatividade Geral*, Einstein coloca:

Não, não é nem um pouco necessário só usar na ciência aquilo que se pode medir e observar; a física não é feita assim e nem se deve tentar fazer isso. Você pode introduzir na física coisas que não possam ser observadas e a única coisa importante é que sua teoria tenha conseqüências observáveis, mas não que cada coisa da sua teoria tenha que ser observada e medida.

Essa visão filosófica de Einstein, apresentada na Conferência sobre o Éter e a Teoria da Relatividade, é diferente da que ele tinha inicialmente.

Enfim, propusemos neste trabalho um olhar diferenciado em relação à idéia de uma ação a distância instantânea em Newton. Isto porque, em nossa pesquisa, optamos por considerar que o vazio em Newton estaria pleno de um “espaço absoluto” concreto. Esta simples mudança de direção no olhar acabou nos chamando a atenção para o fato de que, independente do contexto e da demarcação epistemológica a ele associado, a presença de um contínuo e de uma plenitude que sustente a descrição ou explicação da natureza, pode ser observada não só em Newton, mas em Maxwell e até mesmo em Einstein: seja na forma de um “espaço absoluto”, um “campo”, ou de um “espaço-tempo”.

Contudo, a mecânica quântica trouxe, de fato, o real problema da “ação a distância” como uma propriedade do emaranhamento, no sentido que, em sua origem, o conceito “ação a distância” aplicava-se à idéia de uma influência mútua e instantânea entre dois corpos em um espaço vazio. A associação desse conceito ao emaranhamento quântico

se deve ao fato de que partículas emaranhadas sofrem influências não-locais; isto significa que tais influências não são sentidas contiguamente através de campos. Quando uma partícula encontra-se emaranhada à outra, ou seja, ligada não-localmente, o meio intermediário não importa, nenhuma quantidade de matéria interposta poderá anular ou enfraquecer a interação entre elas. As influências não-locais são instantâneas, sua rapidez não se limita à velocidade da luz.

Por mais estranho que possa parecer, o problema da ação a distância newtoniana só existe se você retira o espaço absoluto como um meio de interação entre os corpos. O próprio Newton não ousou fazê-lo. Quando, novamente, a mecânica quântica retira esse meio de interação, o problema “ação a distância” retorna traduzido em uma realidade não-local. Estamos de volta ao começo?

Contudo, o que é mais importante, mais bonito na ciência, é esse movimento, esse poder de ir e vir. Não devemos acreditar nunca que chegamos à verdade última: ela é sempre refratária.

De fato, é essa busca que nos move.

## BIBLIOGRAFIA

ABRANTES, Paulo. **Imagens de natureza, imagens de ciência**. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Papirus, 1998.

ACZEL, Amir D. **O Caderno Secreto de Descartes**. 1<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2007.

ANDRADE, E. M. P.; FABER, J.; SIQUEIRA-BATISTA, R.; ROSA, L. P. Éter: uma necessidade contingente? *In: Scientiarum Historia II - Livro de Anais*. Rio de Janeiro: Ed. Oficina de Livros, 2009.

ALBERT, David Z.; GALCHEN, RIVKA. Was Einstein Wrong?: A Quantum Threat to Special Relativity. *In: Scientific American*, março de 2009.

ARISTÓTELES. **Órganon**. São Paulo: Edipro, 2005.

BACHELARD, Gaston. **A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento**. 2<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

BARRA, E. Em que sentido Newton pode dizer “hypotheses non fingo”? **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**. Série 3, vol. 5. Campinas: Unicamp, 1995.

\_\_\_\_\_. **De Newton a Kant: A Metafísica e o Método da Ciência da Natureza**. Orientador: Caetano Ernesto Plastino. 2000. Tese (Doutorado em Filosofia). – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, USP, São Paulo, 2000.

BELL, J. S. On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics. *In: Reviews of Modern Physics* **38**. [S.l.; s.n], p. 447-75, 1966.

- BOHM, D. **Quantum Theory**. [Englewood Cliffs]: Prentice-Hall, p. 139-140, 1951.
- BOHR, N. Z. **Phys.**, **34**. [S.l.; s.n], 142, 1925.
- BORN, M. Z. **Phy.**, **37**. [S.l.; s.n], 863, 1926.
- BRAGA, Marco Antônio Barbosa. **A Nova Paidéia: ciência e educação na construção da modernidade**. Rio de Janeiro: E-Papers/ COPPE-UFRJ, 1999.
- BROAD, C. D. **Leibniz: An Introduction**. London: Cambridge University Press, 1975.
- BRUSH, Stephen G. **The Kind of Motion We Call Heat**. Book 1. Amsterdam, New York, Oxford: North-Holland Publishing Company, 1976.
- BRUSH, Stephen G. **The Kind of Motion We Call Heat**. Book 2. Amsterdam, New York, Oxford: North-Holland Publishing Company, 1976.
- BUCHDAHL, G. **Metaphysics and Philosophy of Science: the classical origins Descartes to Kant** [1969]. Laham: University Press of America, 1988.
- BUNGE, Mario. **Física e filosofia**. 1ª ed. São Paulo: Perspectiva, 2000.
- CAMEL, T. O. Uma Visão Dinamicista da Estrutura da Matéria no Século XVIII. In: **Seminário Nacional de História da Ciência e Tecnologia**, 2001, Rio de Janeiro. Caderno de Resumos do Seminário Nacional do SBHC, v. 8, 2001.
- CANEVA, Kenneth. Physics and Naturphilosophie: A Reconnaissance. **History of Science**, vol. 35. [S.l.; s.n], p. 35-78, 1997.

CANTOR & HODGE (eds.). **Conceptions of ether studies in the history of ether theories 1740-1900**. Cambridge: Cambridge University Press, 1981.

CHALMERS, Alan F. **O que é ciência, afinal?** 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Brasiliense, 1993.

CHAUÍ, Marilena de Souza. Vida e Obra. *In: Leibniz*. São Paulo: Abril Cultural, 1983 (Coleção Os Pensadores), p. 93-102.

COHEN, I. Bernard; WESTFALL, Richard S. (org.). **Newton: Textos. Antecedentes. Comentários**. 1ª ed. Rio de Janeiro: UERJ/Contraponto, 2002.

COHEN, I.B. **The Newtonian Revolution**: with illustration of the transformation of scientific ideas. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.

**VÁRIOS. Os pré-socráticos**. 1ª edição, vol. I – agosto. São Paulo: Abril Cultural, 1973. (Coleção Os Pensadores).

COLLINS, Graham P. Nós Quânticos na Computação. *In: Scientific American Brasil 48*. [S.l.]: Ed. Duetto, p. 48-55, 2006.

CONSELICE, Christopher J. A mão invisível do universo. *In: Scientific American Brasil 58*. p. 34-41, 2007.

DARRIGOL, Olivier. **Electrodynamics from Ampère to Einstein**. New York: Oxford University Press, 2000.

DAVIDOVICH, L. Einstein e a Mecânica Quântica. **Ciência e Ambiente**, v.1, n. 1. Santa Maria: Ed. UFSM, 1990.

DESCARTES, R. **Le Monde**. Paris: Librairie Philosophique J. Vrin, 1986.

\_\_\_\_\_. **Les Principes de la Philosophie**. Paris: Librairie Philosophique J. Vrin, 1971.

\_\_\_\_\_. **Meditações Metafísicas**. São Paulo: Martins Fontes, 2000.

\_\_\_\_\_. **Discurso do Método**. Lisboa: Livraria Sá da Costa, 1957.

EINSTEIN, Albert. **Escritos da Maturidade**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1994.

\_\_\_\_\_. Generalization of Gravitation Theory. Re-impressão do apêndice II da 4ª ed. de *The Meaning of Relativity* (Princeton University Press, Princeton, 1953), p. 163. In: JAMMER, **Concepts of space**. New York: Dover, p. 174, 1988.

\_\_\_\_\_. **Phys. Zeitschr**, **10**. [S.l.; s.n], 185, 817, 1909.

\_\_\_\_\_. *Annalen der Physik* 18, 639 (1905). In: STACHEL, J. **O Ano Miraculoso de Einstein**: Cinco artigos que mudaram a face da Física. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 2005.

\_\_\_\_\_. **A Teoria da Relatividade Especial e Geral**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1999.

\_\_\_\_\_. Carta a M. Born, 27 de janeiro de 1920. In: BORN, M. (Org.). **The Born-Einstein Letters**. New York: Walker, 1971.

EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B.; ROSEN, N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?. In: **Phys. Rev.** **47**. [S.l.; s.n], 777, 1935.

FARADAY, Michael. Matéria. **Scientle Studia**. v.4, n.4, p. 621-6. São Paulo: [s.n], 2006.

FARADAY, Michael. **A história química de uma vela**: As forças da matéria. Rio de Janeiro: Editora Contraponto, 2003.

FEYRABEND, Paul. **Contra o método**. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Ed. UNESP, 2003.

FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS. **Lectures on Physics**. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1977.

FLEMING, Henrique. O Tempo na Física. *In: Revista da USP*. [São Paulo]: Ed. USP, 1989.

FOX, Robert. The Rise and Fall of Laplacian Physics. *In: Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 4. Princeton: Princeton University Press, p. 89-136, 1974.

GALILEI, Galileu. **Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano**. São Paulo: Discurso Editorial e Impressão Oficial, 2004.

GARDELLI, Daniel. **Concepções de Interação Física**: Subsídios para uma Abordagem Histórica do Assunto no Ensino Médio. Orientador: Roberto de Andrade Martins. 2004. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física, Faculdade de Educação, USP, São Paulo, 2004.

HARMAN, P. M. **Energy, Force and Matter**. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1990 (1982).

HARMAN, P. M. **Wranglers and physicists**: studies on Cambridge physics in the 19th Century. Manchester: Manchester University Press, 1985.

HEISENBERG, Werner. **Física e Filosofia**. 4<sup>a</sup> ed. Brasília: Edições Humanidades, 1999.

HENDRY, John. **James Clerck Maxwell and the theory of the eletromagnetic field**. 1st ed. Bristol and Boston: Adam Hilger Ltd., 1986.

HERBERT, Nick. **A Realidade Quântica**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Ed. Francisco Alves, 1989.

HERBERT, Nick. **A Realidade Quântica**. Tradução Mário C. Moura. Rio de Janeiro: Ed. Francisco Alves, 1989.

HESSE, Mary. **The Structure of Scientific Inference**. London: The Macmillan Press Ltd., 1974.

HUME, David. **Tratado da Natureza Humana**. 1ª ed. São Paulo: Ed. Unesp, 2000.

ILDEFONSE, Frédérique. **Os Estóicos**. 1ª ed. São Paulo: Estação Liberdade, 2006.

INWOOD, Brad (org.). **Os Estóicos**. 1ª ed. São Paulo: Ed. Odysseus, 2006.

KOEHLER, Carlos B. G. **Origens Históricas e Conceituais do Indeterminismo na Dinâmica Clássica**. Orientador: Luís Pinguelli Rosa. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – COPPE/UFRJ, UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.

KOYRÈ, A. O Significado da síntese newtoniana. *In*: COHEN, B. I., WESTFALL, S. R (org.). **Newton: Textos, Antecedentes e Comentários**. Rio de Janeiro: EdUERJ e Contraponto, p. 84-100, 2002.

\_\_\_\_\_. O Pensamento Moderno. *In*: **Estudos de História do Pensamento Científico**. Rio de Janeiro: Forense Universitária, p. 15-21, 1991.

\_\_\_\_\_. As Origens da Ciência Moderna - Uma Nova Interpretação. *In: Estudos de História do Pensamento Científico*. Rio de Janeiro: Forense Universitária, p. 56-79, 1991.

\_\_\_\_\_. Galileu e a Revolução Científica do Século XVII. *In: Estudos de História do Pensamento Científico*. Rio de Janeiro: Forense Universitária, p. 181-195, 1991.

\_\_\_\_\_. **Correspondência com Clarke** [1717]. Trad. de Carlos Lopes de Mattos. São Paulo: Abril Cultural, 1979. (Coleção Os Pensadores).

LOPES, José Leite. A imagem física do mundo: de Parmênides a Einstein. *In: Estudos Avançados* 12(5). [São Paulo]: IEA/USP, 1991.

MARTINS, André Ferrer P. O tempo (presente) na física. *In: BRUNI, José Carlos, MENNA-BARRETO e Luiz, MARQUES, Nelson (org.), Decifrando o tempo presente*. 1ª ed. São Paulo: Editora Unesp, p. 169-198, 2007.

\_\_\_\_\_. Contribuição do conhecimento histórico ao ensino do eletromagnetismo”, **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, vol. 5, nº especial (jun). [S.l.; s.n], p. 49-57, 1988.

MARTINS, Roberto de Andrade. Ørsted e a descoberta do eletromagnetismo. *In: Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, nº 10, [S.l.; s.n], p. 89-114, 1986.

MAXWELL, James Clerk. **Scientific Papers**. Cambridge: Niven, W. D. Ed., 1890.

\_\_\_\_\_. **Scientific Papers**. Edited by William Davidson Niven. New York: Dover, 1965.

\_\_\_\_\_. **Treatise on electricity and magnetism**. New York: Dover, 1954.

\_\_\_\_\_. **A dynamical theory of the eletromagnetic field**. [S.l; s.n], 1864.

McCRONE, John. **Going Inside: a tour round a single moment of consciousness**. [S.l; s.n], 1999.

McMULLIN, E. **Matter and Activity in Newton**. Indiana: University of Notre Dame Press, 1978.

MORAES, Andreia Guerra. **Contextualizando o fazer: subsídios para uma educação científica com enfoque histórico-filosófico**. Orientador: Roberto Cintra Martins. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – COPPE/UFRJ, UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

MORAES, Andreia; REIS, José Cláudio; BRAGA, Marco. **Faraday, Maxwell e a nova realidade do eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: Editora Atual, 2004.

NEWTON, I.; LEIBNIZ, G. W. **NEWTON – LEIBNIZ**. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Ed. Abril, 1983. (Os Pensadores).

NEWTON, I. **The Principia (Mathematical Principles of Natural Philosophy - A New Translation)**. In: COHEN, I. Bernard; WHITMAN, Anne (ed.). Los Angeles: University of California Press, 1999.

\_\_\_\_\_. De Gravitatione et Aequipondio Fluidorum. In: Hall, R. A., Hall, B. M. (ed.). **Unpublished Scientific Papers of Isaac Newton**. Cambridge: Cambridge University Press, p. 121-148, 1978.

\_\_\_\_\_. **Optique**. Paris: Christian Bourgois Editeur, 1989.

\_\_\_\_\_. Do Escólio Geral. *In*: Cohen, B. I., Westfall, S. R (org.). **Newton**: Textos. Antecedentes. Comentários. Rio de Janeiro: EdUERJ e Contraponto, p. 154-155, 2002.

\_\_\_\_\_. Quatro cartas a Richard Bentley. *In*: Cohen, B. I., Westfall, S. R (org.). **Newton**: Textos. Antecedentes. Comentários. Rio de Janeiro: EdUERJ e Contraponto, p. 400-411, 2002.

\_\_\_\_\_. Correspondências com Cotes e Oldenburg. *In*: Cohen, B. I., Westfall, S. R (org.). **Newton**: Textos. Antecedentes. Comentários. Rio de Janeiro: EdUERJ e Contraponto, p. 155-158, 2002.

\_\_\_\_\_. Algumas questões filosóficas. *In*: Cohen, B. I., Westfall, S. R (org.). **Newton**: Textos. Antecedentes. Comentários. Rio de Janeiro: EdUERJ e Contraponto, p. 22-30, 2002.

\_\_\_\_\_. Questões 1-7 e 31. *In*: Cohen, B. I., Westfall, S. R (org.). **Newton**: Textos. Antecedentes. Comentários. Rio de Janeiro: EdUERJ e Contraponto, p. 61-81, 2002.

NIELSEN, Michael A., 2005, Regras para um Mundo Quântico Complexo. *In*: **Scientific American Brasil**: Edição Especial 05 – Fronteiras da Física, 2005, p. 24-33.

NIETZSCHE, Friedrich. **Ecce-homo**. 4<sup>a</sup> ed. [Lisboa]: Guimarães & Cia, Editores, 1979.

\_\_\_\_\_. **Além do Bem e do Mal**: prelúdio a uma Filosofia do Futuro. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2000.

\_\_\_\_\_. **Genealogia da moral**: Uma polêmica. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2002.

OLIVEIRA, Luiz Alberto. **A Natureza Inacabada**: Caos, Acaso, Tempo. *In*: 1995

<http://souzaesilva.com/Website/portfolio/webdesign/siteciberidea/luizalberto/index.html>

ØRSTED, Hans Christian. Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética. *In: Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, nº 10, [S.l.; s.n], p. 115-122, 1986.

PAIS, Abraham. **Sutil é o Senhor..., a Ciência e a Vida de Albert Einstein**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

PATY, Michel. A gênese da causalidade Física. **Scientiae Studia**, São Paulo, v. 2, nº 1, p. 9-32, 2004.

\_\_\_\_\_. A noção de determinismo na física e seus limites. **Scientiae Studia**. v. 2, n. 4. São Paulo: [s.n], p. 465-92, 2004.

PENROSE, Roger. **A mente nova do rei: computadores, mentes e as leis da física**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1989.

\_\_\_\_\_. **Shadows of the mind: a search for the missing science of consciousness**. 1st ed. [Oxford]: Oxford University Press, 1994.

\_\_\_\_\_. **O grande, o pequeno e a mente humana**. 1ª ed. São Paulo: Editora Unesp, 1997ª.

PEREIRA, Marcia R. S. **O Lugar da Imaginação na Construção do Conhecimento Científico**. Orientador: Luiz Pinguelli Rosa. 2009. Tese (Doutorado em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia) – HCTE/UFRJ, UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

PESSOA Jr., Osvaldo. **Revolução Científica e a Filosofia de Descartes**. 2004.

ROSA, Luiz Pinguelli. **Tecnociências e Humanidades: Novos paradigmas, velhas questões – O determinismo newtoniano na visão de mundo moderna**. 1ª ed. São Paulo: Paz e Terra, 2005.

\_\_\_\_\_. **Tecnociências e Humanidades:** Novos paradigmas, velhas questões – A ruptura do determinismo, incerteza e pós-modernismo. 1ª ed. São Paulo: Paz e Terra, 2006.

\_\_\_\_\_. "A Ruptura de Paradigmas no Fim do Milênio – da Incerteza ao Caos e à Complexidade" (Notas de Aula – Teoria do Conhecimento III).

PONCZEK, R. L. A causalidade nos pré-socráticos e na Física aristotélica. **Cad. Brás. Ens. Fís.**, v. 20, n.1. [S.l.; s.n], p. 63-85, abr., 2003.

POPPER, Karl. **Conjecturas e Refutações.** 2ª ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1982.

POPPER, R. Karl; ECCLES, C. John. **O Eu e Seu Cérebro.** [Campinas]: Ed. Papyrus, 1991.

PORTO, C. M. e PORTO, M. B. D. S. M. Uma visão do espaço na mecânica newtoniana e na teoria da relatividade de Einstein. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.30, n. 1, [S.l.; s.n], 2008.

REICHENBACH, Hans. **The Philosophy of Space and Time.** Dover: Nova Iorque, 1957.

RESNICK, Robert. **Introdução à Relatividade Especial.** [São Paulo]: Editora Polígono, 1971.

RONAM, A. Colin. **História ilustrada da ciência da Universidade de Cambridge.** vol. 1-4. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 2001.

SCHRÖDINGER, Erwin. **O que é Vida?** 1ª ed. São Paulo: Editora Unesp, 1977.

SCHRÖDINGER, Erwin. Nature, 23, 1935. Tradução para o inglês por J. D. Trimmer. **Proc. Am. Phys. Soc.** p. 124, 1980.

SIQUEIRA-BATISTA, R., ANDRADE, E. M. P., ALVES-FERREIRA, R., HELAYEL-NETO, J. A. A Mecânica de David Bohm e a descrição determinística da realidade quântica. In: **Scientiarum Historia II** - Livro de Anais. Rio de Janeiro: Ed. Oficina de Livros, 2009.

SNOW, Adolph Judah. **Matter & gravity in Newton's physical philosophy**. New York: Arno Press, 1975.

SNOW, C. P. **As duas culturas e uma segunda leitura**. 1ª ed. São Paulo: Edusp, 1995.

THUILLIER, Pierre. **De Arquimedes a Einstein**: a face oculta da invenção científica. 1ª ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1994.

WESTFALL, S. Richard. **The construction of modern science**. [Cambridge]: Cambridge University Press, 1977.

WHITEHEAD, Alfred North. **Process and reality** (corrected edition). 1st ed. New York: The Free Press, 1978.

\_\_\_\_\_. **O conceito de natureza**. 1ª ed. São Paulo: Martins Fontes, 1994.

WHITTAKER, Edmund. **A history the theories of aether & electricity**. 1st ed. New York: Dove Publications, 1989.

WILLIAMS, L. Pearce. STEFFENS, Henry John. **The history of science in western civilization**: modern science, 1700-1900, vol. III. 1st ed. Lanham, New York, London: University Press of America, 1978.

WILLIAMS, L. Pearce. André-Marie Ampère. In: **Scientific American**, January, p. 72-78, [S.l; s.n], 1989.

WILLIAMS, L. Pearce. Faraday, Michael. *In*: GILLISPIE, Charles Coulston (Ed.). **Dictionary of Scientific Biography**. 16 vols. New York: Charles Scribner's Sons, v.4, p. 527-40, 1981 c.

ZANETIC, João. **Física também é cultura**. Orientador: Luís Carlos de Menezes. 1989. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação, USP, São Paulo, 1989.

[www.if.ufrgs.br/tapf/v16n5\\_Wolff\\_Mors.pdf](http://www.if.ufrgs.br/tapf/v16n5_Wolff_Mors.pdf) (acessado em: 10/nov/09).

[http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Extras/Einstein\\_ether.html](http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Extras/Einstein_ether.html) (acessado em: 21/mar/09).

GALLAS, F. B. **Leibniz Brasil**, 10 de maio de 2005. Disponível em: <http://www.leibnizbrasil.pro.br>. Acesso em: 27 de junho de 2005.

## ANEXO I

### Einstein: Ether and Relativity

#### ETHER AND THE THEORY OF RELATIVITY

*by Albert Einstein*

How does it come about that alongside of the idea of ponderable matter, which is derived by abstraction from everyday life, the physicists set the idea of the existence of another kind of matter, the ether? The explanation is probably to be sought in those phenomena which have given rise to the theory of action at a distance, and in the properties of light which have led to the undulatory theory. Let us devote a little while to the consideration of these two subjects.

Outside of physics we know nothing of action at a distance. When we try to connect cause and effect in the experiences which natural objects afford us, it seems at first as if there were no other mutual actions than those of immediate contact, e.g. the communication of motion by impact, push and pull, heating or inducing combustion by means of a flame, etc. It is true that even in everyday experience weight, which is in a sense action at a distance, plays a very important part. But since in daily experience the weight of bodies meets us as something constant, something not linked to any cause which is variable in time or place, we do not in everyday life speculate as to the cause of gravity, and therefore do not become conscious of its character as action at a distance. It was Newton's theory of gravitation that first assigned a cause for gravity by interpreting it as action at a distance,

proceeding from masses. Newton's theory is probably the greatest stride ever made in the effort towards the causal nexus of natural phenomena. And yet this theory evoked a lively sense of discomfort among Newton's Contemporaries, because it seemed to be in conflict with the principle springing from the rest of experience, that there can be reciprocal action only through contact, and not through immediate action at a distance.

It is only with reluctance that man's desire for knowledge endures a dualism of this kind. How was unity to be preserved in his comprehension of the forces of nature? Either by trying to look upon contact forces as being themselves distant forces which admittedly are observable only at a very small distance and this was the road which Newton's followers, who were entirely under the spell of his doctrine, mostly preferred to take; or by assuming that the Newtonian action at a distance is only apparently immediate action at a distance, but in truth is conveyed by a medium permeating space, whether by movements or by elastic deformation of this medium. Thus the endeavour toward a unified view of the nature of forces leads to the hypothesis of an ether. This hypothesis, to be sure, did not at first bring with it any advance in the theory of gravitation or in physics generally, so that it became customary to treat Newton's law of force as an axiom not further reducible. But the ether hypothesis was bound always to play some part in physical science, even if at first only a latent part.

When in the first half of the nineteenth century the far-reaching similarity was revealed which subsists between the properties of light and those of elastic waves in ponderable bodies, the ether hypothesis found fresh support. It appeared beyond question that light must be

interpreted as a vibratory process in an elastic, inert medium filling up universal space. It also seemed to be a necessary consequence of the fact that light is capable of polarisation that this medium, the ether, must be of the nature of a solid body, because transverse waves are not possible in a fluid, but only in a solid. Thus the physicists were bound to arrive at the theory of the "quasi-rigid" luminiferous ether, the parts of which can carry out no movements relatively to one another except the small movements of deformation which correspond to light-waves.

This theory - also called the theory of the stationary luminiferous ether - moreover found a strong support in an experiment which is also of fundamental importance in the special theory of relativity, the experiment of Fizeau, from which one was obliged to infer that the luminiferous ether does not take part in the movements of bodies. The phenomenon of aberration also favoured the theory of the quasi-rigid ether.

The development of the theory of electricity along the path opened up by Maxwell and Lorentz gave the development of our ideas concerning the ether quite a peculiar and unexpected turn. For Maxwell himself the ether indeed still had properties which were purely mechanical, although of a much more complicated kind than the mechanical properties of tangible solid bodies. But neither Maxwell nor his followers succeeded in elaborating a mechanical model for the ether which might furnish a satisfactory mechanical interpretation of Maxwell's laws of the electro-magnetic field. The laws were clear and simple, the mechanical interpretations clumsy and contradictory. Almost imperceptibly the theoretical physicists adapted themselves to

a situation which, from the standpoint of their mechanical programme, was very depressing. They were particularly influenced by the electro-dynamical investigations of Heinrich Hertz. For whereas they previously had required of a conclusive theory that it should content itself with the fundamental concepts which belong exclusively to mechanics (e.g. densities, velocities, deformations, stresses) they gradually accustomed themselves to admitting electric and magnetic force as fundamental concepts side by side with those of mechanics, without requiring a mechanical interpretation for them. Thus the purely mechanical view of nature was gradually abandoned. But this change led to a fundamental dualism which in the long-run was insupportable. A way of escape was now sought in the reverse direction, by reducing the principles of mechanics to those of electricity, and this especially as confidence in the strict validity of the equations of Newton's mechanics was shaken by the experiments with b-rays and rapid cathode rays.

This dualism still confronts us in unextenuated form in the theory of Hertz, where matter appears not only as the bearer of velocities, kinetic energy, and mechanical pressures, but also as the bearer of electromagnetic fields. Since such fields also occur in vacuo - i.e. in free ether-the ether also appears as bearer of electromagnetic fields. The ether appears indistinguishable in its functions from ordinary matter. Within matter it takes part in the motion of matter and in empty space it has everywhere a velocity; so that the ether has a definitely assigned velocity throughout the whole of space. There is no fundamental difference between Hertz's ether and ponderable matter (which in part subsists in the ether).

The Hertz theory suffered not only from the defect of ascribing to matter and ether, on the one hand mechanical states, and on the other hand electrical states, which do not stand in any conceivable relation to each other; it was also at variance with the result of Fizeau's important experiment on the velocity of the propagation of light in moving fluids, and with other established experimental results.

Such was the state of things when H A Lorentz entered upon the scene. He brought theory into harmony with experience by means of a wonderful simplification of theoretical principles. He achieved this, the most important advance in the theory of electricity since Maxwell, by taking from ether its mechanical, and from matter its electromagnetic qualities. As in empty space, so too in the interior of material bodies, the ether, and not matter viewed atomistically, was exclusively the seat of electromagnetic fields.

According to Lorentz the elementary particles of matter alone are capable of carrying out movements; their electromagnetic activity is entirely confined to the carrying of electric charges. Thus Lorentz succeeded in reducing all electromagnetic happenings to Maxwell's equations for free space.

As to the mechanical nature of the Lorentzian ether, it may be said of it, in a somewhat playful spirit, that immobility is the only mechanical property of which it has not been deprived by H A Lorentz. It may be added that the whole change in the conception of the ether which the special theory of relativity brought about, consisted in taking away from the ether its last mechanical quality, namely, its immobility. How this is to be understood will forthwith be expounded.

The space-time theory and the kinematics of the special theory of relativity were modelled on the Maxwell-Lorentz theory of the electromagnetic field. This theory therefore satisfies the conditions of the special theory of relativity, but when viewed from the latter it acquires a novel aspect. For if  $K$  be a system of coordinates relatively to which the Lorentzian ether is at rest, the Maxwell-Lorentz equations are valid primarily with reference to  $K$ . But by the special theory of relativity the same equations without any change of meaning also hold in relation to any new system of co-ordinates  $K'$  which is moving in uniform translation relatively to  $K$ . Now comes the anxious question:- Why must I in the theory distinguish the  $K$  system above all  $K'$  systems, which are physically equivalent to it in all respects, by assuming that the ether is at rest relatively to the  $K$  system? For the theoretician such an asymmetry in the theoretical structure, with no corresponding asymmetry in the system of experience, is intolerable. If we assume the ether to be at rest relatively to  $K$ , but in motion relatively to  $K'$ , the physical equivalence of  $K$  and  $K'$  seems to me from the logical standpoint, not indeed downright incorrect, but nevertheless unacceptable.

The next position which it was possible to take up in face of this state of things appeared to be the following. The ether does not exist at all. The electromagnetic fields are not states of a medium, and are not bound down to any bearer, but they are independent realities which are not reducible to anything else, exactly like the atoms of ponderable matter. This conception suggests itself the more readily as, according to Lorentz's theory, electromagnetic radiation, like ponderable matter,

brings impulse and energy with it, and as, according to the special theory of relativity, both matter and radiation are but special forms of distributed energy, ponderable mass losing its isolation and appearing as a special form of energy.

More careful reflection teaches us however, that the special theory of relativity does not compel us to deny ether. We may assume the existence of an ether; only we must give up ascribing a definite state of motion to it, i.e. we must by abstraction take from it the last mechanical characteristic which Lorentz had still left it. We shall see later that this point of view, the conceivability of which I shall at once endeavour to make more intelligible by a somewhat halting comparison, is justified by the results of the general theory of relativity.

Think of waves on the surface of water. Here we can describe two entirely different things. Either we may observe how the undulatory surface forming the boundary between water and air alters in the course of time; or else-with the help of small floats, for instance - we can observe how the position of the separate particles of water alters in the course of time. If the existence of such floats for tracking the motion of the particles of a fluid were a fundamental impossibility in physics - if, in fact nothing else whatever were observable than the shape of the space occupied by the water as it varies in time, we should have no ground for the assumption that water consists of movable particles. But all the same we could characterise it as a medium.

We have something like this in the electromagnetic field. For we may picture the field to ourselves as consisting of lines of force. If we wish to interpret these lines of force to ourselves as something material

in the ordinary sense, we are tempted to interpret the dynamic processes as motions of these lines of force, such that each separate line of force is tracked through the course of time. It is well known, however, that this way of regarding the electromagnetic field leads to contradictions.

Generalising we must say this: - There may be supposed to be extended physical objects to which the idea of motion cannot be applied. They may not be thought of as consisting of particles which allow themselves to be separately tracked through time. In Minkowski's idiom this is expressed as follows: - Not every extended conformation in the four-dimensional world can be regarded as composed of worldthreads.

The special theory of relativity forbids us to assume the ether to consist of particles observable through time, but the hypothesis of ether in itself is not in conflict with the special theory of relativity.

Only we must be on our guard against ascribing a state of motion to the ether.

Certainly, from the standpoint of the special theory of relativity, the ether hypothesis appears at first to be an empty hypothesis. In the equations of the electromagnetic field there occur, in addition to the densities of the electric charge, only the intensities of the field. The career of electromagnetic processes in vacuo appears to be completely determined by these equations, uninfluenced by other physical quantities. The electromagnetic fields appear as ultimate, irreducible realities, and at first it seems superfluous to postulate a homogeneous,

isotropic ether-medium, and to envisage electromagnetic fields as states of this medium.

But on the other hand there is a weighty argument to be adduced in favour of the ether hypothesis. To deny the ether is ultimately to assume that empty space has no physical qualities whatever. The fundamental facts of mechanics do not harmonize with this view. For the mechanical behaviour of a corporeal system hovering freely in empty space depends not only on relative positions (distances) and relative velocities, but also on its state of rotation, which physically may be taken as a characteristic not appertaining to the system in itself. In order to be able to look upon the rotation of the system, at least formally, as something real, Newton objectivises space. Since he classes his absolute space together with real things, for him rotation relative to an absolute space is also something real. Newton might no less well have called his absolute space "Ether"; what is essential is merely that besides observable objects, another thing, which is not perceptible, must be looked upon as real, to enable acceleration or rotation to be looked upon as something real.

It is true that Mach tried to avoid having to accept as real something which is not observable by endeavouring to substitute in mechanics a mean acceleration with reference to the totality of the masses in the universe in place of an acceleration with reference to absolute space. But inertial resistance opposed to relative acceleration of distant masses presupposes action at a distance; and as the modern physicist does not believe that he may accept this action at a distance, he comes back once more, if he follows Mach, to the ether, which has to

serve as medium for the effects of inertia. But this conception of the ether to which we are led by Mach's way of thinking differs essentially from the ether as conceived by Newton, by Fresnel, and by Lorentz. Mach's ether not only conditions the behaviour of inert masses, but is also conditioned in its state by them.

Mach's idea finds its full development in the ether of the general theory of relativity. According to this theory the metrical qualities of the continuum of space-time differ in the environment of different points of space-time, and are partly conditioned by the matter existing outside of the territory under consideration. This space-time variability of the reciprocal relations of the standards of space and time, or, perhaps, the recognition of the fact that "empty space" in its physical relation is neither homogeneous nor isotropic, compelling us to describe its state by ten functions (the gravitation potentials  $g_{mn}$ ), has, I think, finally disposed of the view that space is physically empty. But therewith the conception of the ether has again acquired an intelligible content although this content differs widely from that of the ether of the mechanical undulatory theory of light. The ether of the general theory of relativity is a medium which is itself devoid of all mechanical and kinematical qualities but helps to determine mechanical (and electromagnetic) events.

What is fundamentally new in the ether of the general theory of relativity as opposed to the ether of Lorentz consists in this, that the state of the former is at every place determined by connections with the matter and the state of the ether in neighbouring places, which are amenable to law in the form of differential equations; whereas the state

of the Lorentzian ether in the absence of electromagnetic fields is conditioned by nothing outside itself, and is everywhere the same. The ether of the general theory of relativity is transmuted conceptually into the ether of Lorentz if we substitute constants for the functions of space which describe the former, disregarding the causes which condition its state. Thus we may also say, I think, that the ether of the general theory of relativity is the outcome of the Lorentzian ether, through relativation.

As to the part which the new ether is to play in the physics of the future we are not yet clear. We know that it determines the metrical relations in the space-time continuum, e.g. the configurative possibilities of solid bodies as well as the gravitational fields; but we do not know whether it has an essential share in the structure of the electrical elementary particles constituting matter. Nor do we know whether it is only in the proximity of ponderable masses that its structure differs essentially from that of the Lorentzian ether; whether the geometry of spaces of cosmic extent is approximately Euclidean. But we can assert by reason of the relativistic equations of gravitation that there must be a departure from Euclidean relations, with spaces of cosmic order of magnitude, if there exists a positive mean density, no matter how small, of the matter in the universe.

In this case the universe must of necessity be spatially unbounded and of finite magnitude, its magnitude being determined by the value of that mean density.

If we consider the gravitational field and the electromagnetic field from the standpoint of the ether hypothesis, we find a remarkable difference between the two. There can be no space nor any part of space

without gravitational potentials; for these confer upon space its metrical qualities, without which it cannot be imagined at all. The existence of the gravitational field is inseparably bound up with the existence of space. On the other hand a part of space may very well be imagined without an electromagnetic field; thus in contrast with the gravitational field, the electromagnetic field seems to be only secondarily linked to the ether, the formal nature of the electromagnetic field being as yet in no way determined by that of gravitational ether. From the present state of theory it looks as if the electromagnetic field, as opposed to the gravitational field, rests upon an entirely new formal motif, as though nature might just as well have endowed the gravitational ether with fields of quite another type, for example, with fields of a scalar potential, instead of fields of the electromagnetic type.

Since according to our present conceptions the elementary particles of matter are also, in their essence, nothing else than condensations of the electromagnetic field, our present view of the universe presents two realities which are completely separated from each other conceptually, although connected causally, namely, gravitational ether and electromagnetic field, or - as they might also be called - space and matter.

Of course it would be a great advance if we could succeed in comprehending the gravitational field and the electromagnetic field together as one unified conformation. Then for the first time the epoch of theoretical physics founded by Faraday and Maxwell would reach a satisfactory conclusion. The contrast between ether and matter would fade away, and, through the general theory of relativity, the whole of

physics would become a complete system of thought, like geometry, kinematics, and the theory of gravitation. An exceedingly ingenious attempt in this direction has been made by the mathematician H. Weyl; but I do not believe that his theory will hold its ground in relation to reality. Further, in contemplating the immediate future of theoretical physics we ought not unconditionally to reject the possibility that the facts comprised in the quantum theory may set bounds to the field theory beyond which it cannot pass.

Recapitulating, we may say that according to the general theory of relativity space is endowed with physical qualities; in this sense, therefore, there exists an ether. According to the general theory of relativity space without ether is unthinkable; for in such space there not only would be no propagation of light, but also no possibility of existence for standards of space and time (measuring-rods and clocks), nor therefore any space-time intervals in the physical sense. But this ether may not be thought of as endowed with the quality characteristic of ponderable media, as consisting of parts which may be tracked through time. The idea of motion may not be applied to it.

## ANEXO II

### Sumário de Figuras

*Figura 1. Proporcionalidade entre Força aplicada e aceleração.*

*Figura 2. Modelo astronômico de Kepler (1695): seis esferas planetárias encaixadas em poliedros regulares.*

*Figura 3. Representação gráfica de uma Onda Eletromagnética.*

*Figura 4. Representação gráfica do Padrão de Forças para um átomo de Boscovich.*

*Figura 5. Distribuição de limalhas de ferro em torno de um objeto imantado.*

*Figura 6. Representação gráfica das linhas de força em torno de duas cargas elétricas de sinais opostos.*

*Figura 7. Vórtice ao redor de uma linha de campo que aponta na direção Sul-Norte.*

*Figura 8. O Meio Etéreo de Maxwell. In: “On physical lines of force (1861/2)”.*

*Figura 9. Transformações Galileanas: um referencial se movendo com velocidade constante em relação ao outro.*

*Figura 10. Transformações Galileanas: localização de um ponto  $P$  no tempo  $t = t' = 0$ , em relação aos dois referenciais.*

*Figura 11. Transformações Galileanas: localização de um ponto  $P$  no tempo  $t = t' > 0$ , em relação aos dois referenciais.*

*Figura 12. Bobina em movimento e imã em repouso.*

*Figura 13. Bobina em repouso e imã em movimento.*

*Figura 14. Representação esquemática da experiência de Young.*

*Figura 15. Emaranhamento quântico.*

*Figura 16. Experimento mental conhecido como “gato de Schrödinger”.*

