



Antony M. M. Polito

# A Construção da Estrutura Conceitual da Física Clássica

MNPEF

LF  
EDITORIAL





Uma das mais belas frases de Cora Carolina, que mantenho postada na porta de minha sala, para alentear meu espírito em cada novo dia de trabalho na universidade, é

*“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina”*

Não posso pensar em frase mais apropriada para descrever o que deve estar passando pelo espírito dos professores de escolas do Ensino Médio que, com muito sacrifício e dedicação, estão se aperfeiçoando no programa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física! Na tarefa de ajuda-los a aprender e alegrar seus espíritos, estão envolvidos, com grande dedicação e profissionalismo, professores universitários de sessenta e três polos, espalhados por todo o país, e os membros da Comissão de Pós-Graduação da SBF, incluindo a Pró - Reitoria. Todos têm plena consciência de que, para que o programa tenha o êxito almejado, é absolutamente necessário disponibilizar instrumentos didáticos adequados para profissionais que, embora estejam ensinando a matéria no Ensino Médio, nem sempre tiveram acesso a uma formação satisfatória em Física. Para isso a Série MNPEF foi planejada – prover material didático adequado para os alunos do programa evitando as dificuldades de textos preparados para a formação sequencial tradicional dos cursos de licenciatura e bacharelado. Agradeço profundamente aos colegas que estão se empenhando nessa tarefa. A recompensa por sua dedicação provavelmente não virá de promoções ou recompensas acadêmicas, mas sim do lampejo de satisfação no olhar de cada aluno ao aprender um novo tópico através de seus livros!

*Ricardo Galvão*

Antony M. M. Polito

# A CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA CONCEITUAL DA FÍSICA CLÁSSICA

**MNPEF**



**Comissão editorial da Série MNPEF**

Anderson Gomes  
Ildeu de Castro Moreira  
Iramaia Jorge Cabral de Paulo (Coordenadora)  
Jorge Megid Neto  
Rita Maria Cunha de Almeida

Copyright © 2016 Editora Livraria da Física  
1ª Edição

**Direção editorial**  
José Roberto Marinho

**Revisão**  
Paula Santos

**Projeto gráfico**  
Fabrício Ribeiro

**Diagramação e capa**  
Fabrício Ribeiro

Edição revisada segundo o Novo Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

---

Polito, Antony M. M.

A construção da estrutura conceitual da física clássica / Antony M. M. Polito. – São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016. – (Série mestrado nacional profissional em ensino de física; v. 2)

Bibliografia  
ISBN 978-85-7861-410-2

1. Ciência - História 2. Física - Filosofia 3. Física - História 4. Professores - Formação profissional I. Título.

16-03735

CDD-530.09

---

Índices para catálogo sistemático:  
I. Física: História 530.09

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora.  
Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107 da Lei Nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998



EDITORIAL

Editora Livraria da Física  
[www.livrariadafisica.com.br](http://www.livrariadafisica.com.br)

## Apresentação da série

O Mestrado Profissional Nacional em Ensino de Física – MNPEF (PROFIS) é, como sugere o título, um programa nacional de caráter profissionalizante voltado a professores de Física da Educação Básica com vistas a melhorar, recuperar, atualizar o ensino de Física no país. É uma iniciativa da Sociedade Brasileira de Física, com apoio da CAPES e de várias Instituições de Ensino Superior que atuam como Polos do MNPEF.

O ensino de Física na Educação Básica precisa passar por mudanças significativas, pois está desatualizado em termos de conteúdos e metodologias. Embora possam constar nos programas das disciplinas, conteúdos de Física Moderna e Contemporânea não são abordados. Os conteúdos trabalhados são, majoritariamente, do século XIX e as metodologias de ensino são, predominantemente, aulas expositivas e resolução de exercícios, sem incorporar as tecnologias de informação e comunicação.

A proposta do MNPEF procura contribuir para essa mudança: o currículo enfatiza conteúdos de Física mais atualizados e o uso de tecnologias de informação e comunicação, mas também dá atenção a marco históricos e epistemológicos no desenvolvimento da Física, assim como para teorias de aprendizagem. Além disso, o trabalho de conclusão

do mestrado deve incluir um produto educacional que tenha sido usado em condições reais de sala de aula e possa ser utilizado por outros professores de forma independente do mestrado.

Para alcançar os objetivos dessa proposta é preciso que o mestrando passe por um ensino diferente do tradicional e que disponham de materiais instrucionais adequados a esse ensino.

Materiais instrucionais incluem livros como os da Série MNPEF. São textos sobre conteúdos de Física, por exemplo, de Mecânica Quântica, com um enfoque mais conceitual e fenomenológico, porém sem descuidar de um formalismo básico. São também textos sobre o uso de estratégias como modelagem e simulação computacionais ou sobre marcos no desenvolvimento de Física. Outra possibilidade é a inclusão de textos que abordem tópicos como Física e música, Física e arte, Física e medicina, Física e engenharia, porém sempre com o objetivo de ensinar Física.

É nesse sentido que é feita a apresentação desta Série do MNPEF. O ensino de Física carece de livros que não sejam centralizados em questões de exames ou de problemas a serem resolvidos mecanicamente com aplicações de fórmulas.

*Marco Antonio Moreira*

*Dedicado à minha companheira e musa,  
Nádia, mãe dos infinitos filhos que jamais tere-  
mos, cujos rostos sorridentes e olhares ternos  
formam o imóvel e eterno registro caleidoscópico  
de todas as sínteses possíveis de nossos fugazes  
espíritos temporais.*





# Sumário

<b>Prefácio</b> .....	11
<b>Capítulo 1 – História, Ciência e Filosofia</b> .....	13
1.1. A Revolução Científica e as Origens Filosóficas da Ciência Moderna .....	13
1.2. Problemas Epistemológicos Fundamentais .....	19
1.3. O Problema da Demarcação: Afinal, o que é a Ciência?....	27
1.4. O Panorama Prévio à Revolução Científica: a Visão de Mundo Aristotélica .....	32
<b>Capítulo 2 – A Etapa Inicial da Revolução Científica</b> .....	41
2.1. Copérnico e a Revolução Cosmológica .....	43
2.2. A Revolução Astronômica: as Novas Atitudes de Galileu e de Kepler.....	44
2.3. Galileu, Descartes e os Pilares Epistemológicos da Ciência Moderna .....	48
<b>Capítulo 3 – A Etapa Final da Revolução Científica: a Síntese Newtoniana</b> .....	61
3.1. O Período de Transição: a Física Matemática de Christiaan Huygens.....	61

3.2. Os <i>Principia Mathematica</i> : o Estabelecimento da Visão de Mundo Mecanicista.....	63
3.3. <i>Hypotheses non Fingo</i> : o Positivismo Newtoniano .....	74
3.4. A <i>Optica</i> e a Outra Face de Newton .....	77

<b>Interlúdio – A Estrutura Conceitual da Física do Século XIX</b> .....	83
--	----

**Capítulo 4 – Luz, Eletricidade, Magnetismo e o Advento da Relatividade Especial** .....

4.1. A Teoria Ondulatória da Luz de Christiaan Huygens ....	91
4.2. A Rejeição dos Fluidos Imponderáveis: o Éter Luminífero como Sólido Elástico.....	92
4.3. O Éter Elétrico e a Descoberta do Eletromagnetismo....	95
4.4. A Origem do Conceito de Campo .....	98
4.5. Do Éter Mecânico ao Campo Eletromagnético: a Síntese Maxwelliana.....	102
4.6. A Relatividade Especial e a Superação da Visão de Mundo Mecanicista.....	110

**Capítulo 5 – Termodinâmica, Energia, Entropia e o Advento da Física Quântica** .....

5.1. O Calórico e a <i>Potência Motriz do Fogo</i> .....	119
5.2. A Conciliação entre Mecânica e Termodinâmica.....	123
5.3. O Princípio de Conservação da Energia .....	129
5.4. Irreversibilidade e Entropia.....	133
5.5. A Conexão entre os Mundos Macroscópico e Microscópico .....	136
5.6. A Radiação de Corpo Negro e os Primórdios da Física Quântica.....	141

<b>Epílogo</b> .....	147
----------------------	-----

<b>Referências</b> .....	151
--------------------------	-----

## Prefácio

**E**ste texto surgiu das notas de aula que, ao longo dos últimos cinco anos, venho escrevendo para as disciplinas de *Evolução Histórica dos Conceitos da Física*, do curso de Licenciatura em Física, e de *Marcos no Desenvolvimento da Física*, do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, ambos da Universidade de Brasília. O conjunto de notas é substancialmente maior, mas o desafio que aceitei foi o de condensá-las em pouco mais de uma centena de páginas. Evidentemente, há vantagens e desvantagens, nesse processo. O resultado foi um texto denso e objetivo. Procurei selecionar apenas os temas mais representativos do processo de construção da estrutura conceitual da física clássica. Essa característica faz dele um guia rápido que permite localizar os assuntos de maior interesse do leitor de modo que ele encontre algum respaldo para, eventualmente, aventurar-se na leitura de obras mais aprofundadas. Porém, justamente por tratar-se de uma obra sintética, sua leitura não deve representar uma tarefa fácil. A recomendação é que, de modo algum, ela seja lida rapidamente. Cada tema pode e deve ser cuidadosamente refletido, sob pena dos assuntos subsequentes se tornarem rapidamente incompreensíveis. A maior parte dos temas tratados exigirá que o leitor faça pesquisas e leituras complementares. De qualquer modo, com a ajuda de um professor, é um texto que pretende servir de

orientação para o desenvolvimento de disciplinas de história da física, seja na graduação, seja na pós-graduação. Como pré-requisito, é fundamental que o leitor tenha passado pelo ciclo básico de uma graduação em física e adquirido conhecimentos de mecânica, termodinâmica, ótica, eletricidade e magnetismo.

Há, nesse texto, duas preocupações básicas. A primeira, a de que seja perpassado por e interpretado à luz de alguns conceitos básicos da filosofia da ciência. A meu ver, esse é o único modo significativo de narrar a história de uma ciência. Em segundo lugar, meu objetivo foi desenvolver uma narrativa que tivesse um fio condutor ininterrupto, procurando dar um sentido e uma unidade ao conjunto dos episódios narrados. Embora isso pareça implicar o risco de anacronismo, é importante salientar que não há história que não seja uma reconstrução racional. É bem verdade que as motivações científicas e filosóficas e as respostas produzidas pelos cientistas e filósofos de todas as épocas são sempre voltadas para o seu próprio tempo. E que qualquer subordinação contribuiria para fazer parecer que a história da ciência não passa de acumulação contínua, que já teria como meta o estágio da ciência moderna. Isso, sem dúvida, é falso. Por outro lado, também é verdade que nenhum período histórico ignora o seu próprio passado e que os avanços são sempre feitos em diálogo com ele. A história da ciência possui uma racionalidade e, desse ponto de vista, não é, jamais, um eterno reconstruir-se a partir do nada.

Agradeço aos amigos – professores Caio Marcello Mota Polito, Luciano Barosi de Lemos, Amilcar Rabelo de Queiroz, Annibal Dias de Figueiredo, Marco Antônio Amato e Bernardo de Assunção Mello – pela leitura e pelas relevantes críticas de várias partes do texto.

Antony M. M. Polito

Brasília, 18 de abril de 2016.

# História, Ciência e Filosofia

*"History of science without philosophy of science is blind; philosophy of science without history of science is empty".*

I. Lakatos

## 1.1 A Revolução Científica e as Origens Filosóficas da Ciência Moderna

### O Significado da Revolução Científica

A história da ciência é um assunto fascinante, mas complexo, principalmente por ser objeto de várias controvérsias entre os especialistas. Uma delas diz respeito ao período que passou a ser conhecido como *Revolução Científica*, iniciado por volta da metade do século XVI e terminado pelo fim do século XVII. Muitos conceitos de caráter fundamental para o desenvolvimento da ciência moderna tiveram que ser gestados nos períodos anteriores: a Antiguidade e a Idade Média. Porém, a primeira metade da Idade Moderna teve um caráter especial, sobretudo pela extrema velocidade com que ocorreram mudanças na mentalidade científica europeia. É claro que elas não ocorreram isoladamente do contexto das demais transformações que

já vinham acontecendo na Europa, durante a Baixa Idade Média – do século XI ao século XV. De modo que a Revolução Científica, mesmo com todas as características que a tornaram peculiar, pode e deve ser entendida como resultado final de um processo de transformação.

Pelo lado econômico, a retomada do crescimento populacional e da urbanização acompanhou o restabelecimento das comunicações comerciais entre a Europa e o resto do mundo. Ao trânsito de pessoas e mercadorias sucedeu o trânsito de ideias, o que renovou os ares no ambiente intelectual, acadêmico e científico. O renascimento econômico da Europa tem como marco inicial as expedições Cruzadas, cujo fiasco militar implicou colateralmente o restabelecimento dos antigos contatos com o Oriente, principalmente com o mundo árabe, de onde praticamente todo o conhecimento original da Antiguidade grega foi readquirido. Dos árabes, os europeus também puderam obter uma vasta quantidade de novos conhecimentos, principalmente nas áreas da ótica, matemática, astronomia, filosofia, medicina, metalurgia e química. O período seguinte consistiu na estabilização das relações comerciais entre os reinos europeus, as grandes cidades comerciantes europeias, como Gênova e Veneza, e o Oriente. Em 1453, a cidade bizantina de Constantinopla caiu sob jugo do Império Otomano – pondo fim à Idade Média –, o que ameaçou a manutenção das relações comerciais entre a Europa e o Oriente. As chamadas Grandes Navegações, que levaram ao estabelecimento de novas rotas de comércio, pela via do Oceano Atlântico, e ao contato com as Américas, representam um dos marcos do início da Idade Moderna. Elas alargaram a visão que o homem europeu tinha do mundo, permitindo a descoberta de novos lugares, povos, culturas e civilizações. Esse processo teve profundas consequências socioeconômicas. Dentre elas, a criação de uma classe burguesa, a paulatina destruição do modo feudal de produção e o início do processo de acumulação de capital. Do ponto de



vista da transformação do mundo intelectual, esses fatores constituíram-se em poderosos propulsores, em virtude de seu acoplamento com as necessidades de legitimação social da nova classe emergente. A substituição da ordem socioeconômica antiga pela nova não se fez sem o acompanhamento de transformações nas visões de universo, em particular, as de caráter cosmológico.

A consideração do contexto religioso é fundamental para entender esse período. Durante aproximadamente dez séculos, a Igreja Católica foi detentora do saber e do ensino, na Europa. Inicialmente, o saber era, mais do que produzido, reproduzido por meio das *escolas monacais*. Ao final do século X, as escolas monacais deram origem às *catedrais-escola*, que passaram a constituir os centros de saber até o advento das *universidades*, por volta do século XIII. As universidades eram formações corporativas, constituídas por mestres e estudantes, que se estruturavam de modo mais ou menos formal, gozando de certas liberdades e privilégios. Essas organizações logo se viram alvo de interesse mais profundo da Igreja, que as absorveu e passou a ditar suas normas de organização. As universidades passaram, então, a funcionar como o local privilegiado da articulação da razão e da ciência gregas com a doutrina e a fé cristãs. A Revolução Científica foi, acima de tudo, uma revolução contra o saber *escolástico* e contra a dominação do conhecimento por parte da Igreja Católica.

A visão de mundo herdada da Idade Média era uma combinação da teologia do cristianismo com a filosofia aristotélica. Era uma visão de mundo geocêntrica, cuja melhor expressão cosmológica fora elaborada ainda bastante cedo (c. 150 d.C.), através da obra de Cláudio Ptolomeu. A astronomia ptolemaica era, principalmente, uma combinação engenhosa de duas ideias centrais: uma de caráter metafísico – a perfeição do movimento circular – e outra de caráter epistemológico – a ideia de que uma teoria científica era apenas um instrumento para fornecer resultados empiricamente

adequados. O marco inaugural da Revolução Científica foi, justamente, a publicação, em 1543, da obra de Nicolau Copérnico, *Sobre a Revolução das Esferas Celestes*, que repropôs um sistema heliocêntrico para o universo. O sistema copernicano não era muito mais acurado que o ptolemaico, mas permitia explicar de forma mais natural vários fenômenos astronômicos. Ainda assim, poderosos argumentos originados do senso comum pareciam desacreditá-lo, o que levou muitos a sustentarem que, embora o sistema heliocêntrico fosse um *instrumento de cálculo* conveniente, ele era inadmissível como descrição da realidade.

Não foi essa, entretanto, a postura assumida por alguns filósofos e cientistas, notadamente Giordano Bruno, Johannes Kepler e, principalmente, Galileu Galilei. Além de lutar vigorosamente pela verdade absoluta do sistema copernicano, o que mais distinguiu Galileu como símbolo máximo da Revolução Científica foi o fato de nele convergirem os dois elementos que fizeram das ciências físicas o que elas são hoje: uma *metodologia* de abordagem *experimental* e *quantitativa* dos fenômenos naturais. Esse passo marcou o início do processo de desvinculação da ciência do tronco geral da filosofia e a dissolução de sua submissão à teologia. O termo final desses desenvolvimentos coube a Isaac Newton e a publicação dos *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* (1687). Essa foi a primeira obra de unificação bem-sucedida da história da física, tendo reduzido os fenômenos celestes e os terrestres ao mesmo conjunto de leis gerais.

Ao final do século XVII, a visão de mundo escolástico-aristotélica havia sido completamente substituída pela *visão de mundo mecanicista*. Metodologicamente, a combinação da matemática com a experiência havia triunfado. Cosmologicamente, a Terra foi definitivamente retirada do centro do universo. O estudo da história da ciência moderna pode ser condicionado a uma visão em perspectiva do período da Revolução Científica, tanto no sentido do passado

– buscando compreender o processo de superação da visão antiga – quanto no sentido do futuro – buscando compreender em que medida a visão mecanicista de mundo condicionou os desenvolvimentos em todas as áreas da ciência para, em seguida, vir ela mesma a ser superada.

### **As Origens Filosóficas da Ciência Moderna**

As condições necessárias para o advento da Revolução Científica foram reunidas ao longo de dois milênios. Durante esse período, pensadores e filósofos desenvolveram amplas variedades de concepções sobre a constituição e o funcionamento da natureza. Entre as diferenças marcantes existentes entre os períodos prévio e posterior à Revolução Científica, algumas merecem ser destacadas. Em primeiro lugar, não havia ciências particulares – física, biologia, química etc. Até mesmo um pouco depois da Revolução Científica, a investigação da natureza (*physis*) ainda era denominada pelo nome conjunto de *filosofia natural*. A segunda diferença diz respeito ao caráter preponderantemente contemplativo da investigação natural, que se pautava por observações gerais seguidas de *teorização*. A ideia da manipulação e do controle das condições físicas para a observação de fenômenos e o teste de hipóteses – que define modernamente um *experimento científico* –, só se tornou um componente sistemático da investigação após a Revolução Científica.

Por esses motivos, não se pode compreender o nascimento das ciências sem compreender sua filiação ao pensamento filosófico. A filosofia foi uma invenção dos gregos antigos que inaugurou uma nova forma de pensar a realidade, caracterizada pela substituição da abordagem *mitológica* (*mithos*) pela abordagem *racional* (*logos*). Com ela, surgiram algumas das noções gerais mais importantes da ciência moderna, tais como as de *unidade*, de *uniformidade*, de *constância* e de *regularidade*. O pensamento racional procurava identificar elementos estruturais, subjacentes aos fenômenos, que os regulassem de forma independente da intervenção

de entidades divinas. A substituição da mitologia pela razão permitiu a fundação do *pensamento teórico* – em contraposição ao pensamento prático –, caracterizado pela construção de *sistemas de explicação* que, indo além da mera compilação de conhecimentos e técnicas úteis para os mais diversos fins, procurava submeter o todo da natureza a princípios gerais de funcionamento.

Nesse novo contexto de pensamento racional, surgiu a necessidade de desenvolver ainda mais o rigor e a objetividade. A lógica e a matemática foram criadas com esses fins, passando ambas por um desenvolvimento único entre os gregos. A matemática grega – aritmética e geometria – foi concebida como paradigma de correção de pensamento e demonstração de verdades sobre a natureza. Contudo, muito embora a lógica e a matemática gregas tenham atingido níveis muito elevados, elas permaneceram, na maior parte do tempo, disciplinas propedêuticas da filosofia, uma vez que eram consideradas meros meios para a elaboração ulterior do pensamento filosófico, o qual, por sua vez, compreendia sob seu escopo toda a investigação sobre a natureza física. Durante a primeira metade do período medieval – até o início do século XII –, o pensamento cristão se viu herdeiro da tradição helenística e adquiriu conotações neoplatônicas. O período seguinte, entretanto, foi paulatinamente dominado pela assimilação e reestruturação dos ensinamentos do mais influente de todos os pensadores antigos, Aristóteles, tendo como ponto de partida suas traduções e interpretações árabes. O pensamento de Aristóteles e a sua física constituem o pano de fundo contra o qual se deu a Revolução Científica, ainda que os filósofos medievais também tenham dado contribuições originais e seus trabalhos tenham sido essenciais para os desenvolvimentos posteriores.

## 1.2. Problemas Epistemológicos Fundamentais

Antes de dar continuidade à narrativa histórica, é importante que se faça uma breve passagem por alguns temas de filosofia da ciência. Pelo menos desde a época de Platão (c. 428 – 348 a.C.) – o grande filósofo que antecedeu Aristóteles –, já havia, dentro da filosofia, um discernimento entre *conhecimento, teoria do conhecimento e metafísica* que permanece válido até hoje. Os filósofos costumam definir *conhecimento (epistème)* como *crença verdadeira justificada*. Nessa formulação simples, encontram-se enraizados todos os problemas da *epistemologia*. Em primeiro lugar, *conhecimento é crença*. Para entender isso, consideremos um dos problemas mais prementes dentro da filosofia geral: o *problema da realidade do mundo externo*. Todos nós temos o hábito de tomar por *reais* todos os objetos que *observamos*, pois costumamos atribuir aos objetos que aparecem aos nossos cinco sentidos uma *existência independente de nossas mentes*. Contudo, sabemos que as percepções são *representações mentais*, ou seja, são resultado de uma *reconstrução* realizada dentro de nossos sistemas cognitivos. Os primeiros filósofos que chamaram atenção para esse problema foram o empirista Francis Bacon (1561 – 1626) e o racionalista René Descartes (1596 – 1650). O método cartesiano consistia em colocar em *dúvida* todas as nossas *crenças*, mesmo aquelas mais básicas, como a da *realidade* de um mundo externo, até que fosse possível alcançar *certezas* fundadas exclusivamente na *razão*. Isso mostra que o *racionalismo cartesiano* já estava comprometido com uma *teoria epistemológica* específica, que concedia prioridade de crença não aos elementos empíricos, mas às intuições intelectuais.

A epistemologia moderna fornece, com relação à definição de conhecimento, duas lições gerais. A primeira é que conhecimento é algo no qual *acreditamos* e que, portanto, tem associado a si *atitudes proposicionais*: *posturas de compromisso* com relação a certos *enunciados concretos e abstratos* que, no caso da ciência, são os  *fatos científicos*, as *leis da natureza* e as *teorias*

*científicas*. A segunda lição é que *conhecimento não pode ser um tipo qualquer de crença*. Ela precisa ser verdadeira e justificada. Porém, o que consideramos ser uma crença *verdadeira e justificada* já representa uma postura *filosófica* diante do próprio conhecimento e, portanto, implica uma certa *teoria* do conhecimento. E, se a ciência moderna se considera, a si mesma, conhecimento por excelência, ela deve estar comprometida com alguma epistemologia. A epistemologia, portanto, coloca a necessidade de se considerar o que são a *verdade* e a *justificação*. Ambos são problemas extremamente complicados. No que diz respeito à verdade, devemos nos perguntar o que faz com que *aceitemos* certas teorias científicas. Não há um consenso a esse respeito. Em termos simplificados, podemos discernir duas correntes principais de pensamento: o *realismo científico* e o *antirrealismo*.

Os *realistas científicos* sustentam que as nossas melhores teorias científicas são *verdadeiras*, ou melhor, *aproximadamente verdadeiras*. Isso significa que elas são um *relato* que *corresponde*, de maneira suficientemente *acurada*, ao que *objetivamente é o mundo*. Ou seja, teorias científicas contêm elementos que correspondem a *coisas reais* – *entes e propriedades, observáveis ou não observáveis* – e às *relações entre essas coisas* – *leis da natureza* –, cujas existências independem das próprias teorias, dos sujeitos que as pensam e de sua cultura. Seu compromisso, portanto, é com a noção de *objetividade*. Os *antirrealistas*, por sua vez, sustentam que nossas melhores teorias científicas são apenas bons *instrumentos* de predição. Elas não implicam compromisso algum com uma verdade aproximada, nem com a realidade das entidades não observáveis postuladas. O único compromisso de uma teoria científica é com a sua *adequação empírica*. Existem argumentos sérios para sustentar ambas as posições. Em favor do realismo, argumenta-se que a única explicação razoável do porquê uma teoria é empiricamente adequada é o fato de ser ela aproximadamente verdadeira – o *sucesso preditivo* é uma consequência natural



de sua verdade. Por outro lado, os antirrealistas costumam enfatizar um ponto sutil: a tese de *subdeterminação da teoria pela experiência*, segundo a qual é sempre possível construir duas ou mais teorias *diferentes* cujo conteúdo empírico seja exatamente *o mesmo*. Ou seja, embora duas teorias possam postular a existência de diferentes entes físicos – diferindo em sua *ontologia* – e/ou possam formular leis causais diferentes para os mesmos entes, o fato de que sejam ambas empiricamente adequadas torna impossível que possam ser escolhidas com base em *critérios puramente epistêmicos*. Para os antirrealistas, a aceitação de uma teoria específica se dá por meio de *critérios pragmáticos* – simplicidade, naturalidade, coerência com visões de mundo ou teorias já estabelecidas, economia de procedimentos, economia de entidades etc. Tais critérios, contudo, nada têm a ver com a verdade.

Uma questão relevante é o que motiva uma atitude antirrealista com relação às teorias científicas. Podemos usá-la para tecer comentários sobre o terceiro problema que costuma estar envolvido nas questões filosóficas: o *problema metafísico*. O conceito de *metafísica* é bastante complexo. Devemos entendê-la no sentido que costuma ser empregado modernamente, como sinônimo de *ontologia*. (*Ontos*, em grego, significa *ser*). A ontologia é a ciência (filosófica) que versa sobre *o ser em geral*, ou seja, sobre as coisas que se supõe existir e sobre as suas propriedades. Ela é normalmente compreendida como uma *teoria de categorias*, como uma prescrição sobre o modo como todas as coisas existentes no universo podem ser classificadas e sobre a hierarquia a que estão submetidas. O que dizer, contudo, daqueles entes físicos, postulados dentro das teorias – designados por *termos teóricos* – mas que não foram (ou não podem ser) observados? Os realistas tendem a subscrever sua existência, em virtude de sua adesão à noção de verdade aproximada. Os antirrealistas, contudo, tendem a acreditar que essa subscrição contamina as teorias e passa a aproximá-las de teorias não científicas e já desacreditadas,

tais como a astrologia, a parapsicologia, a homeopatia etc., nas quais várias dessas entidades difusas e não observáveis compõem. A exigência dos antirrealistas, portanto, é que os *termos teóricos* presentes em uma teoria sejam interpretados ou como *fórmulas econômicas*, que sintetizam uma série de observações, ou como *ficções*, cujo papel é exclusivamente funcional. A postura antirrealista é uma postura *antimetafísica*, que procura compromissos ontológicos mínimos, de modo que um *critério rígido de demarcação* entre conhecimento científico e não científico possa ser exibido.

De qualquer modo, ambas as correntes estão de acordo com a adequação empírica como critério de cientificidade. Costuma-se dizer que *a experiência é o principal elemento que justifica a aceitação de uma teoria científica*. Contudo, essa é, ainda, uma concepção de senso comum. Uma análise mais cuidadosa do conceito de *justificação* requer, além de uma definição precisa do que é um *experimento científico*, que se pergunte o que faz com que certas teorias científicas sejam *confirmadas*. Não há, também nesse caso, um consenso. O problema associado à confirmação de teorias científicas tem sua origem em outro gigante do pensamento moderno, o filósofo iluminista David Hume (1711 – 1776). Sua análise atacou de frente a seguinte questão: o que justifica a crença de que, no futuro, uma teoria que se mostrou empiricamente adequada continuará sendo bem-sucedida? Esse é o famoso *problema da indução*. Hume chegou à conclusão que não havia nada que autorizasse essa crença e, portanto, nenhuma possibilidade de se confirmar *enunciados de caráter universal*. Assim, não haveria nada que pudesse justificar a verdade de teorias científicas. Desde Hume, muitos lógicos e epistemólogos procuraram escapar dessa conclusão e tentaram construir *lógicas indutivas* que proporcionassem o mesmo grau de certeza que a *lógica dedutiva*. No início do século XX, a corrente filosófica do *empirismo lógico*, cujo maior representante foi o filósofo Rudolf Carnap (1891 – 1970), apresentou propostas baseadas

na estrutura axiomática do cálculo de probabilidades. Essas propostas, no entanto, falharam.

O maior progresso nessa linha foi a proposta *falseacionista*, do filósofo Karl Popper (1902 – 1994). Popper prescreveu o abandono da pretensão de construir uma lógica indutiva e de justificar a crença em teorias científicas através de uma estratégia *confirmacionista*. Para ele, uma teoria bem-sucedida não era uma teoria bem confirmada, mas uma que tenha resistido aos sucessivos testes experimentais a que foi submetida – ele usava o termo *corroboração*. Contudo, uma teoria bastante corroborada não estava imune a ser falseada nos testes seguintes. Essa corrente de pensamento – o *racionalismo crítico* – teve uma importância fundamental na história da epistemologia. Ela sedimentou a ideia de que teorias científicas não devem ser *dogmáticas*, uma vez que toda pretensão de verdade (ou mesmo de verdade aproximada) era vazia. Para Popper, teorias científicas são sempre *conjecturas*, construídas como *sistemas hipotético-dedutivos* destinados a *explicar*, de forma cada vez mais acurada, os fenômenos, porém, sempre passíveis de serem revisados, à medida que falhem nessa tarefa.

O abandono das pretensões de se alcançar verdades científicas absolutas teve influências provenientes de muitos campos externos ao das ciências naturais, o mais influente deles tendo sido o da história da ciência. Com relação a ela, é opinião de senso comum a ideia de que a ciência se caracteriza por apresentar *progresso*, que ela evolui, de forma mais ou menos linear, por meio de confirmações sucessivas, acumulando gradativamente mais conhecimentos e ampliando indefinidamente seu escopo. Tanto o confirmacionismo de Carnap quanto o falseacionismo de Popper se comprometem com essa ideia de progresso. Embora Popper não estivesse comprometido nem com o *indutivismo*, nem com o *dogmatismo*, ele ainda era um realista. O realismo científico de Popper era de viés ontológico, e não epistemológico, pois ele ainda acreditava que a verdade sobre a natureza poderia ser alcançada,

muito embora jamais se pudesse *saber* disso. Não tardou para que até mesmo essa pretensão ontológica viesse a ser abalada.

Voltemos ao problema da aceitação. O senso comum acredita que teorias científicas bem construídas e rigorosamente testadas cumprem os primeiros pré-requisitos para sua ampla aceitação no seio de uma comunidade. O filósofo Thomas Kuhn (1922 – 1996) desafiou esse entendimento. Para Kuhn, essa visão estava falsamente associada com a ideia de que apenas critérios epistêmicos são importantes para a aceitação de teorias. Kuhn considerou que fatores de ordem não cognitiva também entram em jogo de forma crucial, de modo que *a aceitação de teorias é um fato socialmente determinado*. Ele assumiu uma postura que não era apenas contrária ao indutivismo e ao dogmatismo: ela era, também, explicitamente antirrealista. Os argumentos de Kuhn são poderosos. Contra o indutivismo, ele invocou a tese da *sobrecarga teórica da experiência*, de acordo com a qual não é possível fazer quaisquer *observações* sem que antes se estabeleçam balizas teóricas que permitam dar sentido à massa de dados empíricos, classificando-a e estruturando-a. A própria definição correntemente aceita de *experimento científico* – manipulação e controle das condições físicas relevantes para a observação de fenômenos e o teste de hipóteses – requer balizas teóricas que estabeleçam previamente *quais* condições físicas controlar e *como* manipulá-las. Kuhn passou não apenas a contestar a nossa capacidade de prescindir de teorias para fazer observações, mas a contestar também nossa capacidade de *discernir* entre fato experimental e fato teórico. Contra o dogmatismo, Kuhn invocou, novamente, a tese de *subdeterminação da teoria pela experiência*. A primeira versão dessa tese já havia sido estabelecida, no século XIX, pelo filósofo Pierre Duhem (1861 – 1916), e retomada, no século XX, pelo filósofo Willard Quine (1908 – 2000). A chamada *tese Duhem-Quine* é um ataque demolidor às pretensões clássicas de se resolver o problema

da confirmação. Segundo essa tese, *teorias são blocos indissolúveis de enunciados*. Para Quine, o que possui significado empírico não são sentenças isoladas, mas porções mais abrangentes da teoria, de modo que, seja na instância da confirmação, seja na da refutação, nunca é possível saber quais dos enunciados isolados são os responsáveis pelo sucesso ou pelo fracasso do bloco inteiro. Isso coloca em cheque os projetos metodológicos de Carnap e de Popper.

A teoria kuhniana é, contudo, melhor compreendida como um ataque contra o realismo científico, sustentado por um certo conjunto de concepções bastante variadas e conjuntamente conhecidas pelo nome de *relativismo epistêmico*. Ela é uma teoria voltada para uma explicação do modo como as teorias científicas se sucedem ao longo da história do pensamento e seu conceito mais importante é o de *revolução científica*. De acordo com Kuhn, a evolução de um certo campo da ciência se dá, em larga medida, nos seguintes moldes. Em primeiro lugar, o campo vivencia um *período pré-paradigmático*, no qual convivem e concorrem diversas escolas e correntes de pensamento, até que uma delas triunfa sobre as demais e impõe sua própria maneira fecunda de resolver certos problemas. Kuhn diz, então, que se estabeleceu um *paradigma*. Esse é o evento que marca o nascimento desse campo científico. Segue-se um período de progresso cumulativo, denominado por Kuhn de *ciência normal*. Esse é um período em que os cientistas procuram realizar todas as *promessas de sucesso que o paradigma contém*. Essas promessas estão destinadas à frustração pelo advento de alguma *anomalia*, um problema que resiste ao assédio dos métodos e teorias criadas no âmbito do paradigma corrente. Por isso, para Kuhn, a ciência normal sempre contém o germe de uma *revolução científica: uma drástica mudança de paradigma*. Essa mudança é considerada drástica não exatamente porque apresentaria soluções inusitadas para os problemas anômalos. Na verdade, uma mudança mais profunda ocorre na visão geral compartilhada dentro

de uma comunidade científica, de tal modo que *o próprio problema científico passa por uma transformação*. Essa transformação implica novos critérios de solução e aceitação. O novo paradigma traz consigo, portanto, todo um conjunto de novos compromissos metodológicos, ontológicos e epistemológicos. A Revolução Científica é considerada, por muitos, como o exemplo mais ilustrativo do processo defendido por Kuhn.

As mudanças que ocorrem após o advento do novo paradigma são tanto substantivas – nos objetos, propriedades e relações – quanto não substantivas – nos métodos, padrões e critérios. Portanto, *é o próprio mundo teórico, no qual está imersa a comunidade científica, que se modifica*, de tal modo que os paradigmas que se sucedem perdem qualquer conexão entre si. Ou seja, perdem-se os próprios critérios que permitiriam uma comparação valorativa e/ou epistêmica entre os dois mundos. De fato, não seria sequer possível traduzi-los entre si. Kuhn diz, assim, que os paradigmas são *incomensuráveis*. Isso torna sua teoria antirrealista. Para Kuhn, *a ciência não é uma atividade de descoberta e acumulação, mas de construção e reconstrução*. É claro que, nessas condições, cabe perguntar como pode haver algum verdadeiro *progresso* na história do conhecimento. Kuhn argumentou que o sentido de progresso implicado pela sua teoria era “darwiniano”. Muito embora, ao se desenvolver por meio de sucessivas revoluções, a ciência nada preserve dos conteúdos epistêmicos do passado, ela aumenta sua capacidade de resolver problemas, tornando-se, nesse sentido, mais apta. O que não significa que a ciência tenha uma finalidade, como, por exemplo, atingir descrições cada vez mais verdadeiras da realidade: ela progride, mas sem nenhum fim determinado. Toda a *aparência de continuidade e acúmulo*, que a história da ciência tradicional nos transmite, é também um artifício dos novos paradigmas: cabe aos membros da comunidade acadêmica *reescreverem a história* de seu campo, *interpretando os desenvolvimentos passados como antecipações* às suas próprias realizações. Apesar do



relativo e quase instantâneo sucesso da teoria kuhniana, seu relativismo e antirrealismo radicais foram alvos de profundas críticas. Ainda assim, muitos de seus conceitos continuam sendo usados, sobretudo de forma mais moderada e articulada, uma vez que se considera que seus principais argumentos ainda dispõem de suficiente força. Se Popper foi responsável por assentar, de forma definitiva, a ideia de que a ciência é um corpo sempre provisório e passível de revisões, certamente, a partir de Kuhn, já não foi mais possível retornar a uma visão idealizada de uma ciência que evolui exclusivamente em função de suas próprias demandas pela verdade, de forma neutra e desconectada de muitas outras motivações, inclusive de natureza política.

Ainda que se possa encontrar características comuns aos dois conceitos, evitaremos o termo *paradigma* e daremos preferência ao termo *visão de mundo*. Esse termo foi escolhido pela sua abrangência e relativa independência de concepções epistemológicas específicas, sendo de uso corrente nas obras de filosofia da ciência. Para nós, uma visão de mundo deve ser compreendida, essencialmente, como sendo o conjunto de *imagens de natureza* e *imagens de ciência* que caracterizam determinado período do pensamento científico. Esses dois últimos termos se devem ao filósofo brasileiro contemporâneo Paulo Abrantes, que, na obra *Imagens de Natureza, Imagens de Ciência* (1998), os utilizou extensamente para se referir, no primeiro caso, às “*ontologias assistemáticas que orientam a atividade científica criadora*” e, no segundo caso, às concepções gerais, também assistematicamente constituídas, de critérios e de métodos que prescrevem *o que* uma teoria científica *deve* ser e *como* a investigação científica *deve* ser realizada.

### **1.3. O Problema da Demarcação: Afinal, o que é a Ciência?**

Diferentes correntes, em filosofia da ciência, a partir do século XX, tiveram no *problema da demarcação* uma de

suas principais motivações. Na busca por responder à questão: “afinal, o que é a ciência?”, essas correntes procuraram estabelecer critérios de diferenciação com respeito a outros tipos de empreendimento intelectual e/ou cultural, desde os considerados mais respeitáveis, tais como a própria filosofia, a história, a matemática, a lógica, as tecnologias, as artes, a ética, a estética, o direito etc., até aqueles considerados “irracionais” ou “obscurantistas”, tais como as religiões, os misticismos, as práticas divinatórias, a astrologia, a alquimia etc. Não apenas os filósofos, mas os próprios cientistas nutriram uma enorme convicção de que, diferentemente de todos esses outros empreendimentos, as ciências – e, principalmente, as ciências *naturais* – eram as únicas cuja natureza e cuja metodologia eram suficientemente universais e objetivas para estabelecerem-se, para além de qualquer dúvida razoável, como “paradigmas” ou “modelos” de *verdade*, tendo, portanto, precedência sobre todos os demais. Essa esperança, encarnada, inicialmente, no confirmacionismo de Carnap e do empirismo lógico, começou a ser fortemente abalada com o fracasso do projeto indutivista e com as críticas de Popper.

Contudo, Popper acreditou ter sido capaz de fornecer um critério de demarcação. Afinal, uma teoria só poderia ser considerada científica se pudesse fornecer elementos para a sua própria refutação. Não demorou para que críticos revelassem uma série de problemas com esse critério. Hoje, sabemos que o falseacionismo estrito é um requisito de difícil execução, principalmente em função da demolidora tese Duhem-Quine. Desde então, as esperanças nutridas em torno de uma solução simples para o problema da demarcação arrefeceram. Evidentemente, isso não significa que não haja critérios que permitam caracterizar a ciência e diferenciá-la de outros empreendimentos, contanto que propostas mais moderadas e sofisticadas sejam construídas e, principalmente, que elas próprias sejam passíveis de revisão.

Para além de necessidades puramente acadêmicas, a definição do que é e o que não é ciência tem consequências muito mais abrangentes. É extremamente importante, por exemplo, estabelecer critérios sobre que tipos de conhecimento são suficientemente objetivos e empiricamente balizados para merecerem o rótulo de conhecimento científico. Esse rótulo é importante, já que é o conhecimento científico que se supõe dever ser ensinado nas instituições de ensino e universidades ou ser utilizado para balizar decisões sobre políticas públicas em geral.

Uma definição moderna, devida ao filósofo contemporâneo Gerhard Schurz – na obra *Philosophy of Science – A Unified Approach* (2013) –, estabelece o seguinte: “*ciências são todas as disciplinas empíricas, em sentido amplo, juntamente com as ciências formais auxiliares (matemática, lógica, computação e estatística)*”. Para Schurz, *ciências em sentido amplo* são todas aquelas que perseguem o chamado *objetivo epistemológico supremo*: “*encontrar proposições, leis ou teorias, verdadeiras e ricas em conteúdo, relacionadas com um determinado domínio de fenômenos*”. Para tanto, é necessário que se comprometam com um conjunto de *condições epistemológicas básicas*, as quais, por sua vez, implicam um conjunto de *características metodológicas básicas*. As *condições epistemológicas básicas* são *condições necessárias* para a cientificidade de qualquer teoria: (i) *realismo mínimo* – compromisso com a existência de uma realidade independente dos sujeitos que conhecem, ainda que não necessariamente com a possibilidade de conhecer todas as suas propriedades; (ii) *falibilismo* – compromisso com uma atitude crítica (não dogmática) de repúdio às certezas absolutas, embora se possa estabelecer se uma proposição, lei ou teoria é mais ou menos provável; (iii) *intersubjetividade* – postura de compromisso com uma noção mais fraca de objetividade, de acordo com a qual as proposições científicas são independentes de subjetividades individuais na exata medida em que possam ser publicamente compartilhadas; (iv) *empirismo mínimo* – exigência de que as proposições científicas sejam,

por princípio, passíveis de acesso pela experiência e observação, sem, contudo, excluir a existência de conceitos teóricos que se coloquem para além dessa possibilidade; (v) *lógica em sentido amplo* – exigência de que tanto a estrutura das teorias como os procedimentos de teste empírico requeiram o uso extensivo dos métodos da lógica, sejam dedutivas, sejam indutivas.

É importante constatar que as ciências devem se distinguir de outros empreendimentos também por compartilharem *características metodológicas peculiares*, que prescrevem o que um empreendimento científico *deve fazer e como deve fazê-lo*. Segundo Schurtz, essas características são implicadas pelas condições previamente estabelecidas: (i) *busca por hipóteses* – a ciência deve procurar construir hipóteses (leis ou teorias) tão gerais e ricas em conteúdo quanto possível; (ii) *pesquisa factual* – a ciência deve procurar pelo máximo possível de sentenças que sejam capazes de refletir os resultados de experimentos, observações e medidas (fatos científicos); (iii) *explicação e predição* – a ciência deve procurar, com a ajuda das hipóteses, explicar o conhecimento observacional atual e predizer novas e ainda desconhecidas sentenças observacionais futuras; (iv) *testagem* – a ciência deve buscar testar suas hipóteses, comparando as previsões com os fatos observados. A definição proposta por Schurz tem o mérito de ser eclética e ampla. Tem, ainda, o mérito de articular tanto exigências de caráter *normativo* – o que a epistemologia diz que a ciência *deve ser* – com exigências de caráter *descritivo* – o que a história da ciência diz à epistemologia o que a ciência *foi e é*.

O objetivo epistemológico supremo solicita que a ciência esteja sempre em busca de *proposições, leis e teorias*, mas não chega a definir o que são essas construções. Elas dependem da disciplina científica e, mesmo dentro de cada disciplina, esses conceitos não foram os mesmos, ao longo da história. Em geral, definir o que é uma *teoria em uma determinada ciência* requer que digamos algo a respeito da própria

ciência, de preferência, definindo-a. É interessante finalizar com uma definição – despreziosa e, talvez, apenas provisória – do que se entende ser uma *teoria física*. Essa definição balizará o desenvolvimento dos temas e está em acordo com as definições de Schurz. De uma perspectiva filosófica ampla, *teorias físicas são construções conceituais abstratas, cujos fundamentos são ontológicos, a estrutura é matemática e os balizadores são empíricos*. Os *elementos ontológicos* – as *entidades* estabelecidas *a priori*, designadas por *termos teóricos* – devem encontrar-se articulados por meio de uma *estrutura de relações matemáticas* para produzirem uma descrição completa (qualitativa e quantitativa) da realidade supostamente constituída por esses elementos. Os *fundamentos ontológicos* são, *entretanto, mutáveis, revisáveis e puramente convencionais*. Observe que *o elemento empírico* não pode ser fundamento, primeiramente, pela virtual impossibilidade de se levar a cabo o projeto indutivista. Em segundo lugar, pelo risco de se recair em *positivismo* e/ou *psicologismo*, reduzindo teorias físicas a meras descrições de fenômenos. Esse último requisito depende de que se assuma uma postura epistemológica de *realismo ontológico* – que dá por garantida a *existência independente do mundo e de sua estrutura* –, ainda que não seja necessário – ou, talvez, possível – sustentar um realismo epistemológico. Embora, não seja fundamento, *o elemento empírico é essencial, pois ele é o único balizador dessas construções*. Sem essa baliza, as teorias físicas se reduziriam a teorias metafísicas. O elemento empírico é baliza porque é capaz, em princípio, de afastar todas as construções hipotéticas que não são capazes de acomodá-lo. Esse caráter de juiz concedido à observação foi a melhor solução encontrada para satisfazer a condição de intersubjetividade. Note-se que, dentro dessa definição, existe a possibilidade (remota) de que o elemento empírico seja capaz de afastar todas as possibilidades metafísicas, com exceção de uma: a verdadeira. Contudo, diante da impossibilidade prática de se chegar a tal termo, *deve-se, no estágio presente de qualquer desenvolvimento científico, conformar-se*

*com teorias que não são mais do que estruturas hipotéticas de múltiplas convenções ontológicas empiricamente adequadas.*

Por fim, cabe perguntar por que não dispensar as convenções ontológicas e considerar apenas a estrutura formal dos axiomas e o conjunto de experimentos que satisfazem à estrutura axiomática. Há, basicamente, duas respostas para essa pergunta. A primeira é fornecida pela lógica. O conjunto de experimentos precisa da mediação de *modelos semânticos*, sem os quais os termos puramente *sintáticos* da estrutura carecem de qualquer tipo de significado, já que teorias físicas são *estruturas axiomáticas interpretadas*. É a ontologia que, geralmente, provê o conjunto de modelos semânticos que permitem interpretar a estrutura formal, conectando teoria e experiência, embora isso não seja, de fato, sempre a regra. Como nos (raros) casos em que somente se aceita modelos semânticos que estejam em estrita relação de correspondência com a fenomenologia. A segunda resposta é pragmática e está contida na história da ciência. Poucos avanços substanciais ocorreram na ciência sem que uma ontologia tivesse sido a responsável por guiar a atividade de construção e descoberta. As atitudes realistas cumprem uma função *heurística* que as torna imprescindíveis e que dificilmente pode ser cumprida por uma atitude antirrealista. Por outro lado, é verdade que em momentos de crise e falência de programas ou de paradigmas, as atitudes antirrealistas são capazes de preconizar uma por vezes indispensável atitude de prudência, exigindo que se suspenda crenças metafísicas que podem começar a se tornar obstáculos para vislumbrar novas perspectivas. É o que procuraremos tornar evidente, ao longo dos episódios narrados neste livro.

#### **1.4. O Panorama Prévio à Revolução Científica: a Visão de Mundo Aristotélica**

Nessa seção, faremos uma breve exposição do pano de fundo filosófico e científico contra o qual se deu a Revolução

Científica: a *visão de mundo aristotélica*. A cosmovisão criada por Aristóteles (c. 384 – 322 a.C.) imperou por quase dois milênios e consistiu no primeiro sistema completo de física, fornecendo explicações profundas e coerentes do universo de sua época. Além da física, o sistema aristotélico compunha-se de todos os fundamentos lógicos, metafísicos, metodológicos e conceituais que formaram os pilares sobre os quais toda a ciência antiga e medieval se apoiou e que, por fim, permitiu à ciência dos tempos modernos superá-lo.

Aristóteles foi sucessor de Platão e dos filósofos pré-socráticos (séc. VII - séc. X a.C.), cujas contribuições ao seu próprio sistema não podem ser ignoradas. Esses primeiros filósofos já haviam reconhecido a grande importância da matemática em suas construções metafísicas, porém, tendiam a negligenciar investigações empíricas sistemáticas. Aristóteles efetuou uma mudança de postura metodológica: abandonou o interesse pela matemática, mas privilegiou a observação empírica, passando a fazer sistematizações de todos os tipos de fatos do mundo natural. Isso implicou a construção de uma ciência qualitativa, com relativa preponderância dada à natureza *viva*. Os reflexos dessa atitude podem ser observados nas suas noções de *ato* e *potência*, de *movimentos naturais* e, principalmente, de *causalidade final*.

### **A Metafísica de Aristóteles**

A física e a metafísica aristotélicas são partes de uma mesma construção. É impossível compreender a primeira sem compreender a segunda. A rigor, é sempre impossível falar sobre a estrutura das leis e princípios de qualquer ciência particular sem antes estabelecer a sua *metafísica*. É ela que se encarrega, essencialmente, de fixar as *categorias* de objetos sobre os quais essa ciência se debruça. Isso quer dizer que a metafísica define, entre outras coisas, uma *ontologia*. No tempo de Aristóteles, todo o universo dos entes e propriedades, naturais ou não, ainda carecia de suficiente ordenação. A *metafísica* era a primeira dentre as *ciências teóricas*, aquela

que se questionava pelas *causas e princípios primeiros da realidade*. Logo, a noção de *causalidade* assumia um papel central. No que se referia ao mundo natural, eram quatro as causas operantes: *material, formal, eficiente e final*, estando todas elas sempre presentes. Eram elas que definiam as *condições de inteligibilidade* da constituição (estática) e da transformação (dinâmica) dos objetos físicos.

A *causa material* referia-se ao *substrato* do qual as coisas eram feitas. Esse substrato era uma *matéria primitiva*, completamente destituída de *propriedades*, ou *determinações*. As determinações constituíam o conjunto de condições que permitiam a *individuação* dos seres. Tais seres individuais, concretos, eram chamados de *substâncias*. Toda substância era constituída por um substrato material e pelo conjunto de determinações que, agindo como *causas formais*, conferiam a uma porção de matéria uma *essência*. As primeiras determinações da matéria primeira eram aquelas que permitiam formar os *quatro elementos fundamentais*: Terra, Água, Ar e Fogo. Na sequência, causas formais adicionais determinavam matérias compostas por esses quatro elementos, como, por exemplo, o ferro ou a madeira. As duas outras noções de causa procuravam explicar a realidade em seu processo de mudança e transformação. A *causa eficiente* identificava, no processo de transformação, o agente responsável. A *causa final* identificava o objetivo em função do qual uma mudança acontecia. De todas as noções de causa, apenas a noção de causa eficiente continuou a ser utilizada no contexto da física moderna, em virtude da substituição da metafísica aristotélica pela *metafísica mecanicista cartesiana*, durante a Revolução Científica.

Aristóteles elencou as modalidades possíveis de um discurso sobre tudo o que existe: sobre todos os *significados do Ser*. Para nós, são relevantes apenas as modalidades do *Ser como categorias* e do *Ser como ato e potência*. O *Ser como categorias* diz respeito aos *modos* do Ser. Esses modos eram dez: *substância, qualidade* (aspectos como cor, textura, brilho, sabor,



temperatura – se era “quente” ou “frio” – , umidade – se era “seco” ou “úmido”- etc.), *quantidade* (a extensão, o tamanho ou o número), *relação* (situação ou ordenação com relação às demais substâncias), *ação* (o modo como age sobre outras substâncias), *paixão* (o modo como sofre a ação), *lugar*, *tempo*, *estado* (o resultado final após ter agido) e *hábito* (circunstância ou resultado após ter sofrido ação). Todas as nove últimas categorias eram *propriedades* do Ser, ou seja, correspondiam às determinações (*formas*, em geral) que permitiam expressar exaustivamente tudo o que podia ser dito sobre a primeira delas, a substância, com exceção da sua própria *essência* (*forma substancial*). As substâncias, por sua vez, eram as *coisas reais* que compunham o universo, ou seja, cada uma das infinitas coisas existentes (concretas e naturais). Para Aristóteles, as substâncias eram sempre sínteses indissolúveis de *matéria* e de *forma*. A matéria, embora fosse essencial para a substância – pois era princípio constitutivo – não passava de mera *potencialidade* indeterminada, não existindo sem uma forma. E a forma, mesmo sendo a essência do que um objeto era, só existia enquanto determinação da matéria e, portanto, também não era independente.

Chegamos, agora, às noções de *ato* e *potência*. Enquanto as categorias podem ser compreendidas como compondo um corte “transversal” do discurso aristotélico sobre o Ser, as noções de ato e potência são uma “dimensão extra”, que permitia desdobrar o Ser “longitudinalmente”, segundo o plano do devir, ou seja, da transformação, perpassando todas as categorias. Nesse sentido, incorporavam o tempo não como categoria, mas como elemento dinâmico, de descrição do fluxo da mudança, e revelavam uma filiação íntima para com a noção de desenvolvimento orgânico, modelado pela observação do desenvolvimento dos seres vivos. Uma coisa era *em ato* quando já havia adquirido realidade (*atualizada*). Uma coisa era *em potência* quando tinha o poder de se atualizar, ou seja, de se *tornar real*, adquirindo alguma forma. Nesse

sentido, toda mudança era sempre a *atualização* de alguma *forma* que existia *potencialmente* nas coisas, antes da mudança completar-se. Assim, num exemplo que se tornou clássico, uma semente era árvore em potência. A árvore era o resultado do processo de (infinitas) atualizações pelas quais a semente passava. A matéria em geral era *potência pura*, pois era capaz de receber qualquer forma, e só se atualizava quando a recebia. Já a forma se configurava como ato ou concretização da potencialidade da matéria. A substância era, por isso, sempre um misto de ato e potência. As noções de ato e potência, assim como as das categorias, são elementos fundamentais que não só fornecem os termos nos quais a física aristotélica se expressava, mas, principalmente, permitiam fazer dela uma construção coerente e inteligível.

### **A Física de Aristóteles**

Após a metafísica, a segunda ciência em dignidade e valor era a física. Seu objetivo era a investigação dos *processos de transformação* aos quais as *substâncias* podiam ser submetidas. Para Aristóteles, toda *transformação era passagem da potência ao ato*. Potência e ato diziam respeito a todas as categorias. Para nós, o que importa é a *transformação segundo a categoria de lugar* – a locomoção. Toda locomoção era atualização de uma *forma de lugar* que poderia ser, eventualmente, um *lugar natural*. Para Aristóteles, o movimento em si mesmo não era uma mera propriedade da substância: constituía uma realidade independente, pois ele era entendido como a própria *potencialidade em ato*: um *processo*. Essa visão contribuiu para solidificar as noções antiga e medieval de movimento e repouso como instâncias *absolutas*. Aristóteles tinha assimilado muitos dos elementos da cosmologia platônica, e um desses elementos foi o *teleológico*. Ele concebeu a natureza por analogia com um organismo vivo, incluindo o propósito, ou causa final, como elemento irreduzível e fundamental. A causa final era sempre descrita como atualização de alguma potência. Essa visão orgânica levou Aristóteles a postular que todos os corpos

da natureza podiam apresentar dois, e apenas dois, tipos de movimento: *movimentos naturais* ou *movimentos violentos*.

Os movimentos violentos eram sempre resultado da *ação por contato* do *corpo que age* (“movente”) sobre o corpo que sofre a ação (“movido”). Eles possuíam uma dinâmica peculiar e não eram geralmente vistos como passíveis de estudo sistemático, dada a sua infinita variedade. Os movimentos naturais eram observados diretamente nos seres *autônomos*, cujos protótipos eram os seres vivos, em geral. Todo movimento natural era entendido como a expressão mais pura da *natureza* específica do objeto que se movia. Esse movimento era totalmente guiado por algum propósito. Porém, havia também o caso de *coisas inanimadas* que, embora não tivessem em si mesmas um princípio de autonomia, pareciam mover-se naturalmente para certos lugares, sem o concurso de nenhuma ação externa visível. Aristóteles denominou esses corpos de *leves* e *pesados*, em conformidade com o seu tipo de movimento: o movimento natural dos leves era para cima; o dos pesados, para baixo; ambos sempre *radiais*. Era da natureza dos pesados possuir a *potência* para *atualizar* um *lugar natural* mais próximo do centro do universo, enquanto os leves possuíam a *potência* para *atualizar* um *lugar natural* mais próximo de sua periferia. Portanto, a noção de *lugar natural* cumpria um papel crucial. Note-se que foi a observação de uma vasta gama de fenômenos naturais – em um ambiente que hoje sabemos ser dominado pela gravidade e pela atmosfera – que impôs a diferenciação qualitativa com respeito aos tipos de movimento. Não existia a noção de força gravitacional, ou de qualquer força que não fosse o resultado direto da ação por contato. Aristóteles montou sua cosmologia determinando os lugares naturais de cada um dos quatro elementos fundamentais, segundo um esquema derivado diretamente da observação. O elemento Terra, sendo o mais “pesado”, tinha no centro do universo seu lugar natural. Os elementos Água, Ar e Fogo ocupavam lugares naturais dispostos,

sucessivamente, em esferas concêntricas. Definidos os lugares naturais das substâncias elementares, o movimento e o repouso naturais de todas as demais substâncias compostas podiam ser compreendidos, já que sua matéria específica devia ser formada por uma composição dos quatro elementos e, a partir de suas proporções, era possível determinar seu lugar natural no esquema cosmológico. Uma vez alcançado seu lugar natural, cada corpo entrava em *repouso natural*. O estado de repouso era considerado *absoluto*: era a atualização final de uma potencialidade. A remoção de um corpo de seu estado de repouso natural só era possível por meio de um movimento violento.

Outra consequência deduzida da existência de lugares naturais era a concepção de um universo finito. Em um universo finito, o movimento perpétuo em linha reta era, obviamente, impossível. Os corpos celestes possuíam um movimento perpétuo que, diferentemente dos movimentos naturais dos corpos terrestres, parecia sempre retornar ao mesmo lugar. A figura geométrica mais simples – e que encerrava ideias de imutabilidade e eternidade – era o círculo. Assumindo mais um elemento platônico, Aristóteles concedeu aos astros o movimento circular. A implicação imediata foi a divisão do universo em duas partes distintas. A primeira parte era o *mundo sublunar* dos corpos terrestres, compostos pelas quatro substâncias elementares, com a Terra, imóvel, ocupando seu centro. Era o lugar da mudança e da transformação. A segunda parte era o *mundo supralunar* ou celeste. Nenhuma transformação acontecia nesse mundo, com exceção do eterno movimento circular. Para garantir sua imutabilidade, Aristóteles o fez composto de uma *quinta essência*: o *Éter*.

As noções qualitativas de peso e leveza jogavam papel fundamental na descrição do movimento. A velocidade de um corpo, em movimento natural, aumentava proporcionalmente com seu peso ou leveza ( $W$ ). Por outro lado, todo

movimento devia ser feito em um meio com certa densidade, já que a metafísica aristotélica não permitia o espaço vazio. Isso implicava que o meio devia oferecer alguma *resistência* (R) ao movimento. Aristóteles assumiu explicitamente que a velocidade com que um corpo se movia devia ser inversamente proporcional à resistência do meio. Em termos modernos, a expressão matemática para a velocidade de um corpo em movimento natural seria  $v = k \frac{W}{R}$ , com  $k$  uma constante para ajustar as dimensões. Devemos ter reservas com relação a essa expressão, pois não é claro se Aristóteles pensava na velocidade média ou na instantânea. Note-se, de passagem, que em um meio com resistência nula, onde  $R = 0$ , a velocidade seria infinita, o que era um absurdo. Aristóteles usou esse argumento adicional para negar a existência do espaço vazio. A dinâmica dos movimentos violentos, do ponto de vista quantitativo, não chegou a ser formulada com clareza, mas, *grosso modo*, igualava a força de contato com o produto do “corpo movido” – “peso” ou “quantidade de matéria” (M) – pela sua velocidade:  $F = Mv$ . No que diz respeito à dinâmica de Aristóteles, o principal fato é que, sem o concurso de uma ação contínua ou potência natural, não podia haver movimento. Todo corpo deveria parar imediatamente após cessada a causa que o fazia mover-se. Essa formulação colocou problemas muito sérios, sobretudo para a física medieval. Das reiteradas tentativas de solucioná-lo surgiram os conceitos de *impetus* e, finalmente, de *inércia*. Dentre esses problemas, notoriamente o mais sério foi o do movimento balístico ou lançamento sob a ação da gravidade, pois envolvia perda de contato com o agente motor. Porém, esse movimento não podia ser natural e a física aristotélica jamais pôde solucioná-lo satisfatoriamente.



# A Etapa Inicial da Revolução Científica

**A** Revolução Científica foi o resultado da interação conflituosa entre duas visões de mundo originadas da antiga oposição entre platonismo e aristotelismo. De um lado, o *naturalismo renascentista*, fundado na *tradição pitagórico-platônica*, foi tributário do resgate operado pelo *Renascimento* (sécs. XV e XVI) dos ideais da Antiguidade Clássica mais remota. Sua característica essencial estava na ideia de que o universo era um *cosmos* de *harmonias matemáticas subjacentes*. No século XVII, seu desdobramento deu origem ao programa da *física matemática*. De outro lado, a *filosofia mecânica*, resultado exclusivo da nova mentalidade da Revolução Científica, representou a ideia de que, por detrás das aparências de um mundo de infinitas formas fenomênicas, operavam *mecanismos invisíveis*, responsáveis pelo nexo causal entre esses fenômenos. Um dos sentidos atribuídos à *síntese newtoniana* foi a superação das diferenças entre essas duas correntes e a união da física matemática e da filosofia mecânica em um mesmo programa.

## 2.1. Copérnico e a Revolução Cosmológica

Na época em que viveu Nicolau Copérnico (1473 – 1543), a astronomia encontrava-se alicerçada em, basicamente, dois fundamentos, ambos questionáveis. O primeiro era o sistema das *esferas homocêntricas*, criado pelo matemático platônico Eudócio de Cnido (c. 400 – 350 a.C.). Esse sistema foi assimilado pela cosmologia aristotélica – na qual as esferas (agora *cristalinas*) adquiriram *realidade física*. O segundo era o sistema matemático-astronômico que vinha se desenvolvendo desde a Antiguidade e que atingiu o seu ápice com Cláudio Ptolomeu (c. 85 – 170 d.C.). Suas diferenças advinham de razões epistêmicas, as quais dividiam seus defensores em dois grupos: os “físicos” – que interpretavam a cosmologia aristotélica como uma descrição *verdadeira* do mundo – e os “matemáticos” – para os quais a astronomia era apenas um *sistema de cálculo*. A despeito disso, foram referidos conjuntamente por meio do termo *sistema aristotélico-ptolemaico*, pois compartilhavam os mesmos compromissos cosmológicos e ontológicos: a centralidade e imobilidade da Terra; a ideia de universo fechado e limitado pela esfera das estrelas fixas e a ideia de que a física celeste era fundada na composição de movimentos *circulares uniformes*.

O sistema aristotélico de esferas homocêntricas cristalinas não fazia descrições acuradas dos dados astronômicos disponíveis. Já o sistema ptolemaico, embora acurado, era excessivamente complicado. Em vista disso, Copérnico propôs, novamente, um sistema heliocêntrico para o universo, na sua obra *Sobre a Revolução das Esferas Celestes* (1543). Do sistema antigo, ele manteve as esferas cristalinas e os movimentos circulares uniformes. A mais importante vantagem apresentada pelo novo sistema era uma explicação muito mais natural e simples do *movimento retrógrado dos planetas*, que passou a ser visto como um efeito aparente, associado à projeção do movimento tangencial do planeta, perpendicularmente à linha de visada de um observador na superfície



da Terra. Outros sucessos do novo sistema consistiram em explicações mais naturais da *variação anual do brilho dos planetas*, do problema de sua ordenação no sistema solar e do motivo pelo qual Vênus e Mercúrio sempre apareciam muito próximos um do outro. O sistema aristotélico-ptolemaico explicava muitos desses fenômenos de maneira completamente *ad hoc* – por definição, recorrendo a *recursos arbitrários que visavam apenas sua preservação por meio do acréscimo de novas hipóteses que restauravam a compatibilidade com os dados observacionais*. Entre esses recursos, estavam os *deferentes excêntricos*, os *epiciclos* e os *pontos equantes*.

### **Instrumentalismo Versus Realismo**

O que tornava o sistema heliocêntrico mais vantajoso eram suas maiores *simplicidade* e *elegância*. Esses não são, contudo, critérios epistêmicos, como o são a adequação empírica ou a verdade aproximada. Teorias mais simples ou elegantes não são necessariamente mais verdadeiras. Simplicidade e elegância são critérios *pragmáticos*, condicionantes ditados pela medida humana das coisas. Dentre esses condicionantes, os mais costumeiros são a economia de recursos, a utilidade prática e a capacidade de gerar bons programas de pesquisa. Essas considerações ganham maior relevância quando se sabe que o sistema copernicano não era, quantitativamente, muito mais acurado do que o sistema ptolemaico. Apesar de em menor quantidade, o sistema copernicano também teve que lançar mão dos mesmos recursos *ad hoc*. Isso explica porque não foi fácil convencer os astrônomos da época – herdeiros da visão de mundo aristotélica –, já que o custo de abandonar seus compromissos ontológicos era elevado demais e não chegava a ser compensado pelas virtudes qualitativas do sistema rival. Uma maneira de tornar as ideias de Copérnico mais palatáveis era adotar uma postura *instrumentalista*. Foi exatamente isso que fez o teólogo luterano Andreas Osiander (1498 – 1552), que prefaciou o livro de Copérnico, após a sua morte. Osiander apresentou o sistema

de Copérnico como se fosse apenas mais um instrumento de cálculo para “salvar os fenômenos”.

O próprio Copérnico, contudo, assumiu uma postura *realista* com respeito ao sistema heliocêntrico. De fato, diversas são as evidências de seu compromisso com uma metafísica pitagórica e neoplatônica. A identificação do Sol com Deus – daí a sua centralidade – era um tema explicitamente neoplatônico. E o Deus dos pitagóricos, platônicos e neoplatônicos era responsável pela *ordenação geométrica mais simples e elegante do universo*. Cabia ao filósofo rasgar o véu das aparências e penetrar o íntimo mistério dessa ordem implícita que regia a natureza. A diferença entre Copérnico e os antigos filósofos de cepa neoplatônica estava na sofisticação matemática do sistema que utilizou para realizar essa tarefa. Isso revela a relevância dos pressupostos metafísicos na proposição de novas teorias sobre a natureza. Revela também que *simplicidade e elegância, para Copérnico, não eram nem critérios epistêmicos, nem pragmáticos: eram consequências necessárias de seus vínculos metafísicos*.

## **2.2. A Revolução Astronômica: as Novas Atitudes de Galileu e de Kepler**

Provavelmente, o heliocentrismo não teria prosperado não fosse pelas atitudes de dois personagens centrais da Revolução Científica: Johannes Kepler (1571 – 1630) e Galileu Galilei (1564 – 1642). Eles trilharam caminhos muito distintos, a começar pelo modo como consideravam o problema da demonstração da verdade do novo sistema. Para Galileu, o problema era a compatibilização do movimento da Terra com o movimento dos corpos sobre sua superfície. Para Kepler, o problema era mostrar que a harmonia e a simplicidade matemática do universo se revelavam pela concepção de que o Sol era o seu centro e sua fonte de poder e de vida. Apesar dessas diferenças, ambos compartilhavam duas crenças fundamentais: a primeira, de que *a matemática era a única chave para*

a descoberta dos mistérios da natureza; a segunda, de que suas especulações teóricas jamais poderiam ser sustentadas em desacordo com os fenômenos. Sem o saber, ambos iniciaram o desvendamento do mistério da gravidade, partindo de lados opostos do problema. Kepler foi um dos primeiros a propor a *mecanização do mundo celeste*, na contramão da tradição que concebia a astronomia como um ramo da matemática. Por outro lado – exceção-se o caso da estática, levada quase à sua elaboração definitiva por Arquimedes (c. 287 – 212 a. C.) –, a mecânica parecia resistir a um tratamento matemático mais elaborado. Galileu foi quem, finalmente, obteve os primeiros êxitos no processo de *matematização do mundo terrestre*.

A contribuição mais importante de Kepler são as suas *três leis do movimento planetário*. Ele chegou a elas como resultado da adesão às mesmas crenças místico-matemáticas que haviam inspirado Copérnico. A primeira obra de Kepler foi o *Mistério Cosmográfico* (1596), na qual já estavam presentes os temas que o motivariam por toda a vida. Revertendo à metafísica platônica expressa no *Timeu*, ele engendrou um modelo astronômico que posicionava as órbitas circulares de cada planeta segundo um esquema que permitia dar a cada um dos cinco poliedros regulares – *poliedros de Platão* – um papel estruturante no universo, ao mesmo tempo em que preservava a solidez das esferas cristalinas. Essa ideia logo se revelou empiricamente insustentável. Nessa época, Kepler ainda não possuía dados astronômicos confiáveis. Apesar disso, esse é um entre centenas de exemplos de como a intuição e a imaginação, quando guiadas por crenças de natureza metafísica, são essenciais no chamado *contexto da descoberta* e podem, eventualmente, mostrar-se bem-sucedidas.

### **A Nova Astronomia e a Mecanização do Mundo Celeste**

Quem forneceu a Kepler os dados astronômicos corretos foi o astrônomo Ticho Brahe (1546 – 1601). O imediato abandono de Kepler de suas primeiras elucubrações era um claro sinal dos novos tempos. Ele não sustentaria um sistema

que não refletisse as órbitas observadas, por mais comprometido que estivesse com vínculos de ordem metafísica. De qualquer modo, o Sol tinha que desempenhar um papel central no seu esquema do universo. Além disso, Kepler estava igualmente convencido de que a astronomia não podia se restringir apenas à tarefa de “salvar os fenômenos”. Mais importante era descobrir princípios sólidos que permitissem derivar o movimento dos corpos celestes como resultado exclusivo de *causas físicas*. Isso o conduziu a uma das ideias mais profundas da história da cosmologia: a *identificação do Sol com a causa dos movimentos dos planetas*. Essa ideia era absolutamente nova e representou um passo fundamental no caminho das descobertas que Newton faria posteriormente.

À obra em que apareceram as duas primeiras leis do movimento planetário Kepler deu o nome de *Nova Astronomia, Fundada em Causas* (1609). Essa obra apresenta o relato de sua incessante busca pela descrição matemática mais simples e objetiva das órbitas planetárias e o seu compromisso com as acuradas observações de Brahe – o qual, por sua vez, já havia descoberto eventos astronômicos que indicavam que as esferas cristalinas não podiam, de fato, existir. Sem o recurso das esferas cristalinas, outra causa deveria ser encontrada para o movimento dos planetas. Kepler empregou os mesmos princípios então vigentes para a mecânica terrestre: a dinâmica aristotélica – em que o movimento só podia ocorrer pelo concurso de forças motrizes. Essa abordagem representou a primeira tentativa já feita de uniformizar as leis que regem os fenômenos terrestres e celestes e de construir uma verdadeira *dinâmica celeste*. A originalidade de Kepler estava, primeiro, em se concentrar nas variações das distâncias e das velocidades dos planetas, ao longo de suas órbitas, e, principalmente, em se concentrar no formato geométrico da órbita em si – convencido de que uma razão física mais profunda deveria estar por detrás de suas aparências. Para tanto, ele retornou a uma hipótese arrojada: *a de que o Sol emanava, como os raios de uma*

*roda, uma força* – a sua *anima motrix* – que, em razão da própria simetria radial, deveria decair em intensidade com a distância. Embora seguindo por caminhos tortuosos e utilizando raciocínios equivocados, ele finalmente chegou a sua *segunda lei dos movimentos planetários (lei das áreas)*. Ela representou a conquista de uma ferramenta que lhe possibilitaria abandonar definitivamente qualquer necessidade de retornar ao círculo, pois, agora, ele dispunha de pelo menos um princípio no qual se basear para a construção da dinâmica celestial.

Retornando ao problema das órbitas, após muitas tentativas infrutíferas, Kepler se deparou com a possibilidade de ajustá-las por elipses. Ao fazê-lo, percebeu que a forma elíptica permitia que o comprimento do raio-vetor variasse segundo uma função senoidal. Essa uniformidade sugeria uma ação puramente física, o que veio ao encontro de suas expectativas. Ele chegou, assim, à sua *primeira lei dos movimentos planetários*. O encantamento do círculo havia sido definitivamente quebrado. No lugar de sua perfeição e imutabilidade, novos padrões de *harmonia universal* e de uniformidade haviam sido criados. Até o final de sua vida, Kepler continuaria por buscá-los. Sua *terceira lei dos movimentos planetários* foi fruto desse projeto (*Harmonias do Mundo*, 1619). Kepler ainda tinha que resolver o problema do que *causava* a variação da distância e da velocidade dos planetas com relação ao Sol, ou seja, encontrar o *mecanismo* responsável por esses fenômenos. A questão, posta *nesses termos*, representou o primeiro passo para a construção da visão de mundo que dominaria a ciência por quase três séculos. O modelo mecânico proposto por Kepler foi inspirado na obra de William Gilbert (1544 – 1603) – *Sobre o Magnetismo* (1600). O Sol e os planetas foram imaginados como dois gigantescos magnetos que interagiriam de tal forma que órbitas excêntricas fossem produzidas, mas esse modelo não passou do nível qualitativo. Apesar de representarem o maior avanço na astronomia em séculos, as descobertas de Kepler não foram aceitas em sua própria

época. A mentalidade herdada do mundo medieval podia suportar que o sistema kepleriano salvasse os fenômenos, mas não que ele pudesse expressar a realidade da natureza. A causa copernicana contaria, entretanto, com outros reforços.

### ***O Mensageiro Sideral***

Em 1610, Galileu publicou o seu *Mensageiro Sideral*, resultado das espetaculares descobertas realizadas com a luneta, pela primeira vez empregada com finalidade científica. Esse fato representou uma pequena revolução epistemológica, pois, até então, o uso de qualquer tipo de instrumento ótico era considerado pouco confiável. A ampliação da capacidade observacional proporcionada pela luneta – e também pelo microscópio, inventado pouco depois – era um sinal dos novos tempos. De fato, a Revolução Científica inaugurou uma aliança definitiva entre ciência e tecnologia. Dentre as descobertas de Galileu, destacaram-se as *fases do planeta Vênus*. Esse novo fenômeno era evidência significativa a favor de Copérnico, pois o sistema geocêntrico tinha dificuldades em acomodá-lo. Em contraposição, as tão aguardadas *paralaxes estelares* ainda não podiam ser observadas, de modo que as objeções ao sistema heliocêntrico permaneciam. Para além dessas dificuldades, Galileu estava convencido da realidade do sistema heliocêntrico. O acúmulo de evidências contrárias ao sistema ptolemaico e a incapacidade da física aristotélica de resolvê-los levaram-no a dar o passo que nenhum grande pensador até então havia ousado: rejeitar a ambos, ampla e integralmente.

### **2.3. Galileu, Descartes e os Pilares Epistemológicos da Ciência Moderna**

Para a história geral da ciência, a maior contribuição de Galileu consistiu na dissolução da epistemologia aristotélica através da construção de uma nova conexão entre um princípio *metafísico* – a crença na estrutura *matemática* da

realidade última da natureza – e um princípio *metodológico* – a crença na *experiência* como único tribunal competente para o julgamento de proposições científicas. Embora já prenunciados por seus antecessores, Galileu foi o primeiro a elevar ambos os princípios a um patamar de superioridade epistemológica absoluta. Até mesmo *o conceito moderno de experimento científico* – manipulação e controle sistemático das condições ambientais para a produção e observação de fenômenos, com o objetivo de testar hipóteses – embora antecipado pelo grande filósofo natural árabe Ibn al-Haytham (Alhazen, 965 – 1040) – pode ser considerado uma invenção genuinamente galileana.

Em suas primeiras obras científicas – e.g., *Sobre o Movimento* (c. 1590) –, embora ainda partidário da teoria medieval do *impetus*, Galileu já demonstrava o desejo de construir uma dinâmica matematicamente exata, aos moldes da estática de Arquimedes. A rejeição definitiva da dinâmica aristotélica sobreveio quando se convenceu da incapacidade da teoria do *impetus* de remover a principal objeção à aceitação do heliocentrismo: como seria possível que o comportamento dos corpos terrestres não fosse drasticamente afetado pelo movimento da Terra? A rigor, é claro que a dinâmica dos objetos terrestres *é* afetada, mas não pelos motivos alegados pelos aristotélicos. Mesmo na situação hipotética de ser a Terra um *sistema inercial*, a física aristotélica implicava que corpos que perdessem o contato com sua superfície deveriam ser deixados para trás, no espaço, pois lhes faltaria uma força motiva que continuasse a arrastá-los.

### **O Princípio de Inércia**

Em 1632, Galileu apresentou a solução que removia essas dificuldades com a publicação de seu *Diálogo Sobre os Dois Principais Sistemas do Mundo*. O modo como Galileu introduziu sua descoberta mais importante, o *princípio de inércia*, acabou por implicar uma forma equivocada – um princípio *curvilíneo* – pois esteve condicionada por uma situação experimental

específica. A essência do princípio, contudo, estava claramente posta: *o movimento não é um efeito que depende da existência de agentes causais*. O princípio de inércia resolvia o maior problema apresentado pela física aristotélica: o lançamento sob ação da gravidade. É bem verdade que, na tentativa de sanar essa deficiência, os neoplatônicos João Philoponus (490 – 570 d.C.) e Ibn Sina (Avicena, 980 – 1037 d.C.) já haviam elaborado o conceito de *força impressa* que, antecipando a ideia de *impetus*, permitia entender a continuidade do movimento balístico. De fato, Avicena foi o primeiro a expressar que, *na ausência de um meio resistente, um corpo, uma vez colocado em movimento, permaneceria, indefinidamente, em movimento retilíneo e uniforme*. O filósofo medieval Jean Buridan (c. 1292 – 1363) quantificou essa força impressa ao estabelecer que o *impetus* era medido pelo *produto da quantidade de matéria pela velocidade* – antecipando, desse modo, o conceito de *quantidade de movimento*. Apesar de engenhosas, essas soluções ainda estavam vinculadas a pressupostos aristotélicos, pois, a despeito de estabelecerem o mesmo *efeito* – movimento retilíneo e uniforme – *este não acontecia na ausência de agentes causais*.

Nicolau Copérnico, Giordano Bruno (1548 – 1600) e Isaac Beeckman (1588 – 1637) também aventaram explicações que renunciaram o princípio de inércia, mas os primeiros a chegarem à sua forma *retilínea* foram Pierre Gassendi (1592 – 1655) e René Descartes. Apesar disso, o princípio de inércia de Galileu teve o insuperável mérito de ter estabelecido, pela primeira vez, a *relação entre estado de movimento e sistema de referência*. O cerne da revolução galileana estava na mudança radical de concepção sobre a própria *natureza* do movimento. Galileu conseguiu conceber o movimento como um atributo *relativo*, não mais como uma propriedade *essencial* dos corpos. Movimento e repouso passavam a ser *estados*, intrinsecamente dependentes da *descrição de um observador*. No enunciado galileano, um corpo em movimento num *plano horizontal ideal* (sem atrito) continuaria a se mover com velocidade uniforme



até que alguma influência externa operasse no sentido de mudá-la. Seguindo ainda parte da velha tradição, Galileu sustentou que esse movimento deveria ser circular – o único compatível com um cosmos bem ordenado por uma inteligência divina. Porém, mais significativo foi seu estudo exaustivo do movimento acelerado em planos inclinados, que o levou a descobrir a *lei de queda dos corpos*. Galileu observou que, independentemente da inclinação dos planos, todos os corpos adquiriam a mesma velocidade final, ao serem liberados de uma mesma altura inicial. Portanto, era exclusivamente a *variação de altura com relação à superfície da Terra* que alterava o estado de movimento do corpo. Desse modo, mover-se em um “plano horizontal” significava, literalmente, mover-se em uma superfície cujas partes estivessem igualmente afastadas do centro da Terra.

### ***Duas Novas Ciências e a Matemática do Mundo Terrestre***

A indiferença dos corpos com relação ao seu estado de movimento foi essencial para a remoção das objeções ao sistema copernicano e, principalmente, para a solução do problema do lançamento sob a ação da gravidade. Um corpo podia participar de vários movimentos simultâneos e mutuamente independentes, uma vez que o estado de movimento não era parte de sua essência. Desse modo, ele demonstrou que o movimento horizontal de um projétil se compunha com seu movimento vertical uniformemente acelerado para formar uma trajetória *parabólica*. Foi com a obra *Discursos e Demonstrações Matemáticas Sobre Duas Novas Ciências* (1638) que Galileu estruturou, de forma definitiva, suas novas ideias a respeito dos movimentos uniforme e acelerado, da composição de movimentos e da cinemática da queda dos corpos. Embora considerasse que a investigação da *causa* da queda dos corpos fosse ainda prematura, isso não o impediu de fornecer sua descrição matemática. Ao restringir-se à cinemática, Galileu se deparou com o problema de como justificar, fisicamente, a atuação da gravidade. Com a transformação

do movimento em *estado*, um novo efeito dinâmico devia ser atribuído ao agente causal. Galileu supôs, acertadamente, que esse efeito era a *aceleração*. Apelando para um princípio de simplicidade, argumentou que a *aceleração deveria ser constante e igual para todos os corpos, independentemente dos seus pesos*. A constatação experimental desse resultado representou uma estupenda vitória contra a física aristotélica, mas a sua verdadeira explicação permaneceu um mistério cuja elucidação dependia da compreensão da natureza da gravidade e de uma correta definição de massa inercial. Apesar de todas essas dificuldades, Galileu foi bem-sucedido na construção dos fundamentos de uma ciência matemática do movimento. Ainda nos *Discursos*, ele se voltou para a discussão de dois outros assuntos: o movimento dos pêndulos e o problema envolvido com a resistência a rupturas de estruturas estáticas. Com relação a esse último ponto, refletindo sobre as dificuldades envolvidas na explicação da coesão – ao se considerar a matéria como uma estrutura *contínua* – ele aderiu ao *atomismo* e voltou a defender a existência do *espaço vazio*.

### **A Fundação da Ciência Moderna**

O retorno à cena de considerações sobre o atomismo se insere dentro de um contexto filosófico mais amplo, relacionado com a retomada da antiga concepção democritiana da diferença entre *qualidades primárias* e *secundárias*. Também Galileu e Descartes sustentaram a prioridade ontológica absoluta das qualidades primárias – o número, a forma, a grandeza, a posição, o ordenamento e o movimento dos átomos. As qualidades secundárias, por sua vez – cor, brilho, cheiro ou textura – não correspondiam a nada real, pois eram apenas um aspecto interno da estrutura sensorial humana, ou seja, eram propriedades *subjetivas*. A realidade *objetiva* deveria ser exclusivamente matemática. Observe-se a estreita conexão que Galileu e Descartes estabeleceram entre os três seguintes atributos da realidade: (i) ser uma *qualidade primária*, (ii) ser *objetiva* e (iii) ser *passível de formulação matemática*.

Galileu foi responsável por acrescentar um último atributo a essa cadeia de conexões: (iv) ser *mensurável*. Isso revelava uma estreita, e ainda subestimada, *relação entre matemática e experiência*. Todo ato de *medir* é, intrinsecamente, matemático. Ao estabelecer em bases sólidas a relação entre matemática e experiência, Galileu foi capaz de dar a contribuição realmente decisiva para a passagem da perspectiva *contemplativa* da ciência antiga e medieval para a perspectiva *ativa* da ciência moderna.

Embora Galileu tenha compartilhado o ideal pitagórico-platônico, ele pouco se deixou influenciar pelo seu caráter mágico-místico. É bem verdade que a realidade correspondia ao mundo ideal das relações matemáticas abstratas. Porém, para além do aspecto ontológico, Galileu percebeu o seu papel *epistemológico*, na relação entre conhecimento e realidade, pois ele pensava *a matemática como a linguagem da natureza*. Estreitamente relacionado ao seu platonismo foi o seu *racionalismo*. Para Galileu, a razão superava os sentidos como guia para a verdade. Ao se opor aos aristotélicos, ele contrapôs *construções ideais* – que ele supunha serem sempre mais conformes à natureza das coisas – às evidências sensoriais. O caso da validação do princípio de inércia é paradigmático, em razão de sua evidente *não observabilidade*. Para Galileu, era evidente que o princípio de inércia não passava de uma *situação-limite*. Sua validade absoluta não podia ser estabelecida por experiência, ainda que se pudesse verificar sua *verdade aproximada* por meio de experiências cada vez mais refinadas. Contudo, a força da tese racionalista está no fato de que é *impossível* depreender, estritamente a partir da experiência, a veracidade do caso-limite. Primeiramente, porque, sem uma inteligência prévia das relações causais, não é possível sequer conceber em que *direção* prosseguir experimentalmente para obter aproximações cada vez melhores. Em segundo lugar, porque a instância da *lei* envolve uma declaração de validade *exata e universal*, que jamais pode ser *verificada* indutivamente.

## A Metafísica Cartesiana e o Advento da Filosofia Mecânica

Durante o século XVI, o pensamento ocidental se caracterizou por uma íntima conexão entre, por um lado, a filosofia neoplatônica, as tradições hermética e cabalística, a magia, a astrologia e a alquimia e, por outro lado, as nascentes ciências empíricas. À medida que a Revolução Científica avançou, a ascensão da filosofia mecânica promoveu um progressivo afastamento com relação ao pensamento mágico. O responsável pela formulação mais sistemática da filosofia mecânica foi René Descartes (1596 – 1650). Embora tenha sido um pensador profundo, Galileu eximiu-se, em boa parte de sua obra, de construir qualquer sistema de pensamento completo. Descartes, por outro lado, investiu seus esforços em refundar toda a filosofia natural, lançando as bases metafísicas, epistemológicas e metodológicas a partir das quais todo o pensamento moderno seria desenvolvido. Se Galileu foi o grande responsável pela derrocada da física aristotélica, Descartes cumpriu papel análogo e complementar na derrocada da *metafísica* e da *visão de mundo* aristotélicas. Ele as substituiu pela sua própria *visão de mundo mecanicista*, que dominou o pensamento científico ocidental por, aproximadamente, dois séculos e meio.

Nas obras *Discurso sobre o Método* (1637) e *Meditações Metafísicas* (1641), Descartes estabeleceu sua estratégia filosófica de dúvida radical e sistemática, que começava por suspeitar da evidência dos sentidos e culminava na dúvida com relação até mesmo às ideias mais puras da razão, como as provenientes da matemática. Tendo estabelecido sua única verdade irrefutável – a de que existia como *ser pensante* (*res cogitans*) – ele pôde restabelecer, gradativamente, a possibilidade do conhecimento verdadeiro, fundado apenas nas ideias *claras* e *distintas* do intelecto. A partir desse ponto, ele distinguiu entre os *princípios gerais* de sua física – derivados a partir da investigação das *ideias inatas* – e os *mecanismos particulares* que postulava para explicar a ampla gama dos

fenômenos observados. Entre essas ideias claras e distintas, estava a concepção de que a única propriedade essencial dos corpos materiais era a sua *extensão geométrica* (*res extensa*). Outra ideia clara e distinta era a de que o universo consistia em um *plenum material*. Isso implicava a *total identificação ontológica entre espaço e matéria*.

A metafísica cartesiana expurgou o universo de todo resquício de animismo e vitalismo, concebendo o mundo como uma máquina composta por corpos inertes, que se moviam por exclusiva necessidade física. Contra o empirismo e as crenças mágicas em simpatias, antipatias e forças ocultas agindo na natureza, Descartes propugnou uma abordagem racional, baseada em princípios físicos que admitiam apenas a ação por contato. Contra o intuicionismo, defendeu a prioridade e a infalibilidade da percepção intelectual pura e da razão lógico-discursiva. A metafísica cartesiana também desarticulou a ontologia aristotélica, a começar pelas formas substanciais. Boa parte das categorias aristotélicas foi considerada “irreal”, em conformidade com o novo entendimento das qualidades secundárias. De fato, a nova metafísica propugnava um programa radical de *redução* ontológica. Descartes eliminou completamente as noções de causalidade formal, causalidade final, ato e potência. O *único princípio metafísico do universo consistia na causalidade eficiente das forças de contato operando entre os corpos materiais*.

### **A Mecânica Cartesiana**

A física cartesiana foi apresentada nas obras *O Mundo* (1633) e *Princípios de Filosofia* (1644). Como suposição fundamental, a existência de uma matéria única, comum a todos os corpos do universo. Isso dissolveu os antigos limites entre os mundos celeste e terrestre, antecipando a síntese newtoniana, no âmbito da cosmologia. Essa matéria universal era infinita em extensão e infinitamente divisível (*contínua*). A teoria cartesiana do espaço admitia uma certa concepção *abstrata*, o *lugar interno*, que era sempre uma mera extensão

geométrica tridimensional, definida *em relação* a um conjunto arbitrário de corpos selecionados no *plenum*. O *lugar interno* era, portanto, uma extensão vazia *imaginária*, sucessivamente “ocupada” por diferentes corpos. Para Descartes, essas noções abstratas correspondiam à concepção vulgar de *movimento como mudança de lugar interno*, exatamente à qual Galileu se referia ao sustentar a natureza *relativa* do movimento.

À teoria do espaço real correspondia uma concepção *própria* de movimento, definido como sendo a “*transferência de uma porção de matéria, ou de um corpo, das vizinhanças daqueles corpos imediatamente contíguos e considerados em repouso, para as vizinhanças de outros corpos*”. Diferentemente da concepção vulgar de movimento *relativo*, a concepção *própria* era melhor caracterizada como sendo tipicamente *relacional*. Nesse sentido, definia movimento como uma *relação dinâmica instanciada na matéria*. A dinâmica cartesiana era fundamentada em três *leis de movimento*. De acordo com a *primeira lei de movimento*, “*cada coisa, na medida em que é simples e una, permanece no mesmo estado; e, conseqüentemente, uma vez que seja movida, ela sempre continua a mover-se*”. A *segunda lei de movimento* estabelecia que “*cada parte da matéria, considerada por si mesma, não tende a mover-se ao longo de linhas oblíquas, mas, somente em linhas retas. [...] A razão para essa regra, como também para a precedente, é a imutabilidade e a simplicidade da operação pela qual Deus conserva o movimento na matéria*”. Uma compreensão mais profunda do princípio de inércia de Descartes provém de sua *terceira lei de movimento*, que articula o seu *princípio de conservação da quantidade de movimento*: “*um corpo, quando vai ao encontro de um corpo ‘mais forte’, não perde nada de seu movimento; mas, quando vai ao encontro de um corpo ‘mais fraco’, perde tanto de seu movimento quanto transfere para o corpo ‘mais fraco’*”.

A terceira lei apresenta dois aspectos importantes. Primeiro, ela é uma *lei de interação* que estabelece uma noção peculiar de *agente causal* ou “força”. A *força cartesiana* é a *tendência* do corpo de permanecer no seu estado original de repouso ou de movimento retilíneo e uniforme. Ela se manifesta

justamente *na situação em que ocorre a ação de um corpo sobre outro*. Segundo, ela já indica uma *quantificação da força devida ao movimento*. De fato, a medida da *força cartesiana* – ou *quantidade de movimento* – foi definida como o produto do volume do corpo pela sua *velocidade (escalar)*. O *princípio dinâmico fundamental dos processos físicos era a conservação da quantidade total de movimento*. A dinâmica cartesiana carecia do conceito de *massa inercial* e, de fato, não tinha sequer como acomodá-lo, dados os vínculos metafísicos que identificavam matéria com extensão geométrica. O *princípio metafísico cartesiano fundamental era um princípio de causalidade, que identificava a transferência de quantidade de movimento como a causa subjacente ao efeito manifesto: a mudança de estado de movimento de um corpo*.

### **A Teoria dos Vórtices**

Quando Galileu estabeleceu o seu princípio de inércia, ele procurou compatibilizá-lo com as inclinações naturais dos corpos pesados de se dirigirem para o centro da Terra. Portanto, seu princípio de inércia era profundamente mesclado com os efeitos da gravidade. Descartes não podia aceitar nenhum ingrediente oriundo da metafísica aristotélica, como as obscuras inclinações naturais. No sistema cartesiano, *tudo* tinha que ser explicado *exclusivamente* em termos de extensão e movimento, *inclusive* os efeitos da gravidade. Há *dois* efeitos da gravidade que, até a época de Galileu e Descartes, estavam completamente desconectados: a queda dos corpos em direção ao centro da Terra e a órbita dos planetas. Galileu continuou a conceber esses dois fenômenos como sendo intrinsecamente diferentes. Descartes, porém, os viu como efeitos devidos aos mesmos princípios físicos, e isso se deveu exclusivamente à sua metafísica.

Na cosmologia cartesiana, toda partícula que se movia cedia lugar a outra partícula, como nos movimentos de um fluido *incompressível* – uma matéria etérea que preenchia todo o universo. A conservação da quantidade de movimento implicava que esse fluido era perfeito (sem atrito).

Essas propriedades implicavam uma dinâmica global em que cada elemento de matéria se movia em um *circuito fechado*. Portanto, o universo deveria ser constituído de um número ilimitado de *vórtices* adjacentes, interligados e estruturados, como em um reticulado. Essa *teoria dos vórtices* possibilitava explicar os movimentos circulares dos planetas e, ao mesmo tempo, a queda dos corpos pesados, na superfície da Terra. Movimentos que desviassem de linhas retas requeriam uma explicação pela presença de um agente mecânico. Nos movimentos circulares, os corpos têm uma permanente tendência a se afastarem do centro em torno do qual se movem. As variadas tendências centrífugas dos elementos constituintes de cada vórtice geravam *pressões* nas camadas imediatamente exteriores, o que, por sua vez, implicava uma *contrapressão*, na direção do centro, efetuada em uma outra parte do sistema. Uma órbita era estabelecida pelo equilíbrio dinâmico entre a tendência centrífuga do planeta e a contrapressão. Se, contudo, um corpo tivesse *deficiência de tendência centrífuga* com relação à matéria circundante, então isso se manifestaria como *peso*. Com a eliminação das esferas cristalinas, a teoria dos vórtices acabou por se mostrar a mais plausível explicação para a estrutura do sistema solar. Apesar de dificilmente reconciliável com as leis de Kepler, seu compromisso com a noção de *causação física* e amplo apelo explicativo a tornaram hegemônica por quase meio século.

### **O Atomismo e o Empirismo de Gassendi**

O programa mecanicista cartesiano não foi a única alternativa para a nascente ciência do século XVII. Havia, também, o atomismo de Pierre Gassendi, cuja própria metafísica permitiu estruturar um discurso epistemológico oposto ao do racionalismo cartesiano: o do empirismo, que influenciou sobremaneira os filósofos naturais do século XVII, principalmente, os britânicos e, em particular, Newton. A metafísica do atomismo não é incompatível com os princípios gerais da filosofia mecânica. No atomismo, a matéria apresenta



um limite para a divisibilidade. Sejam quais forem as formas geométricas assumidas pelos átomos, se eles forem *rígidos* – e isso parece ser uma propriedade necessária, já que é muito difícil imaginar um objeto físico que possa ser deformado, mas não possa ser dividido –, então é necessário, para que haja movimento, que eles estejam em um *espaço vazio*.

As consequências epistemológicas da admissão do espaço vazio são mais profundas. Quando Gassendi rejeitou a equivalência entre extensão geométrica e matéria, ele abalou dois pilares do programa cartesiano de ciência: a crença no poder ilimitado da razão para descobrir, apenas por si mesma, a essência da realidade – pois, embora extensos, os átomos não têm, na extensão geométrica, sua essência –; e o ideal de física como uma ciência geométrica e, portanto, demonstrativa. De fato, Gassendi era completamente avesso à ideia de uma razão plenipotenciária. Alcançar a essência da realidade não era sequer o principal objetivo da investigação científica. A ciência devia ser *positiva*, ou seja, devia preocupar-se apenas com descrições de fenômenos. Essa forma de pensar a ciência foi, ainda que de modo diverso, compartilhada por Galileu, que, além de adepto do atomismo, também se recusou a seguir a tradição da ciência aristotélica, na sua eterna busca pelas essências. A influência de Gassendi sobre Newton foi enorme e foi justamente na obra newtoniana que esse programa atomista-positivista produziu os seus melhores frutos.



# A Etapa Final da Revolução Científica: a Síntese Newtoniana

### 3.1. O Período de Transição: a Física Matemática de Christiaan Huygens

A física cartesiana se estabeleceu criando uma forte tensão com a tradição original da física matemática fundada por Kepler e Galileu. Essa tensão manteve-se até o surgimento da obra de Isaac Newton (1642 – 1727), a quem coube superá-la, realizando, com isso, uma das sínteses que lhe foram atribuídas. A síntese entre a filosofia mecânica e a física matemática não pôde ser realizada sem profundas modificações de ambas. Com relação à primeira, foi necessário superar a ideia de que a causação física se restringia ao contato direto entre corpos. E, com relação à segunda, foi necessário superar o patamar da mera descrição de regularidades matemáticas espaço-temporais. Para tanto, foi necessário também ir além dos métodos geométricos, que haviam atingido o limite de sua capacidade de resolver problemas. O caminho que conduziu a essa grande síntese teve indispensáveis contribuições de muitos outros

cientistas, alguns contemporâneos de Descartes e Galileu, outros, do próprio Newton. Entre eles, Pierre Gassendi, Pierre de Fermat (c.1601 – 1665), Evangelista Torricelli (1608 – 1647), John Wallis (1616 – 1703), Blaise Pascal (1623 – 1662), Robert Boyle (1627 – 1691), Christopher Wren (1632 – 1723), Robert Hooke (1635 – 1703) e Edmund Halley (1656 – 1742). Todos buscaram, dentro de seus respectivos campos de interesse – ótica, hidrostática, teoria dos gases, mecânica colisional e astronomia –, fazer avançar a tradição da física matemática galileana, com maior ou menor adesão à filosofia mecânica.

Porém, a figura de maior estatura intelectual desse “período de transição” foi Christiaan Huygens (1629 – 1695), o mais bem-sucedido e criativo cientista que, trabalhando dentro dos contornos da filosofia mecânica cartesiana, avançou na direção de lhe dar maior precisão, rigor e capacidade de descrição, na melhor tradição da física matemática galileana. Huygens foi o primeiro a fazer uso explícito do princípio de relatividade galileana para estabelecer os fundamentos de uma dinâmica colisional. Obteve a fórmula do período do pêndulo simples e a utilizou para calcular, pela primeira vez, um valor acurado para a aceleração da gravidade. Sua descoberta mais importante foi a expressão matemática da *tendência centrífuga*, posteriormente interpretada, por Newton, como *força centrípeta*. Também de grande importância foi a descoberta de uma outra quantidade que permanecia constante em colisões elásticas: a soma do *produto das magnitudes dos corpos pelo quadrado de sua velocidade*, denominada pelo seu pupilo Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 – 1716) de *vis viva* – *força viva*, o precursor do conceito de *energia cinética*. Em retrospectiva, é possível dizer que, na medida em que toda a dinâmica pudesse ser reduzida a colisões instantâneas, a mecânica previamente esboçada por Descartes e finalmente construída por Huygens consistia na *primeira lei de Newton* – o princípio de inércia – juntamente com uma espécie de *forma integrada da terceira lei de Newton* – o princípio de conservação

da quantidade de movimento. Observe-se, contudo, que nem o conceito (newtoniano) de força, nem o conceito de massa inercial comparecem de forma explícita. De fato, a massa de um corpo continuava sendo identificada com o seu peso e peso não era mais do que deficiência de força centrífuga. Por outro lado, Huygens fazia objeções à ideia de espaço vazio muito mais por razões físicas do que metafísicas. Assim como Leibniz e grande parte dos filósofos naturais do continente europeu, Huygens não pôde jamais aceitar uma das mais controversas ideias da física newtoniana: a ação à distância.

### **3.2. Os *Principia Mathematica*: o Estabelecimento da Visão de Mundo Mecanicista**

#### **O Éter Dinâmico e a Superação da Filosofia Mecânica**

Newton foi profundamente influenciado por alguns dos principais defensores da filosofia mecânica: Robert Boyle, o filósofo político Thomas Hobbes e, principalmente, os rivais Gassendi e Descartes. Se, por um lado, Newton assumiria, até o final de sua carreira, uma crença consistente e irrevogável no atomismo de Gassendi; ele, por outro lado, travaria uma verdadeira batalha interna em torno da ideia da existência de *um meio material pervasivo, que ocupava completamente o universo* e cumpria funções análogas ao do *plenum* cartesiano. Essa batalha interna se desenvolveu a partir das profundas tensões geradas entre suas necessidades metafísicas, por um lado, e as suas severas exigências epistemológicas e metodológicas, por outro. Sua solução de compromisso foi a postulação de um novo tipo de *éter*: uma substância tênue e sutil, constituída por partículas que, diferentemente dos éteres aristotélico e cartesiano, era *uma matéria microscopicamente atomizada que preenchia um espaço físico preexistente*. A concepção de éter de Descartes era puramente *mecânica*. As sucessivas elaborações newtonianas, contudo, fizeram do éter uma entidade com características *dinâmicas*. O éter dinâmico newtoniano

está intimamente associado com a história do seu conceito de *força*. Essa história é bastante intrincada porque, embora o éter tenha aparecido sempre entrelaçado com todos os demais temas newtonianos, ele nunca superou o patamar de uma *hipótese metafísica*. E foi exatamente propondo a radical *negação de todas as hipóteses metafísicas* que se assentou, *metodologicamente*, a sua maior obra, os *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* – *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* (1687).

Um dos primeiros trabalhos em que a noção de éter compareceu não era de mecânica, mas sim, de ótica: *Uma Hipótese para Explicação das Propriedades da Luz* (1675). O éter foi o recurso utilizado para explicar os fenômenos associados ao comportamento periódico da luz: a refração, a difração e os altamente intrigantes *anéis de Newton*. Esses fenômenos foram imputados às vibrações e às variações da densidade de um éter – mais rarefeito e muito mais elástico do que o ar –, que alteravam as trajetórias das *partículas de luz*. Essas ideias não eram exatamente novas e, quase certamente, ele se inspirou na teoria dos gases desenvolvida por Robert Boyle. Desde a metade do século XVII, a postulação de meios etéreos havia se tornado uma exigência para explicar as propriedades peculiares associadas aos fenômenos “não mecânicos”, tais como eletricidade, magnetismo, reações químicas e os fenômenos óticos. Newton estendeu sua utilização para explicar, virtualmente, todos os fenômenos da estrutura da matéria, como a coesão, a expansão dos gases, as reações químicas exotérmicas (a origem do calor) e a miscibilidade dos líquidos – onde “princípios secretos”, evocando as antigas simpatias e antipatias, pareciam operar. Até mesmo a constituição dos corpos materiais foi imaginada como resultado de condensações do éter. Contudo, as dificuldades e limitações da filosofia mecânica para prover essas explicações acabaram por levar Newton a uma mudança de perspectiva.

## A Criação dos Modernos Conceitos de Massa Inercial e de Força

A exposição sistemática, à maneira geométrica, dos conceitos de massa inercial, de força e dos demais elementos que constituem a nova mecânica encontra-se no Livro I dos *Principia* – *Sobre o Movimento dos Corpos*. A física cartesiana concebia força como uma ação de contato de um corpo sobre outro e isso implicava sua identificação com a quantidade de movimento. A contribuição fundamental de Newton consistiu em mudar o foco do problema. No lugar de conceber *processos mecânicos típicos como trocas de velocidades entre dois corpos* – na qual a conservação da quantidade de movimento desempenha o papel fundamental, mas esconde a noção de força, internamente ao processo de colisão –, Newton passou a considerar *processos dinâmicos típicos como mudanças do estado de movimento de um único corpo*. Nesses processos, a noção de *força* passou a ser diretamente associada *com a medida da aceleração de um corpo*. Além da associação com um *efeito cinemático mensurável*, o conceito newtoniano de força ganhou uma definição matemática precisa e um *estatuto ontológico de agente causal*. Porém, uma mesma força podia promover efeitos diferentes, no caso de sua ação ser realizada sobre diferentes corpos. Esse fato já estava implicado pela mecânica cartesiana. Para Descartes, a única diferença possível entre corpos eram suas extensões geométricas. Para Newton, a diferença passou a ser uma propriedade intrínseca completamente diferente, cuja identificação precisa coube-lhe alcançar: a *massa inercial*.

A história por detrás do conceito de massa inercial é longa e um pouco complicada pelo fato de, nele, estarem implicados, na verdade, dois conceitos distintos: o de *quantidade de matéria* e o de *inércia*. A primeira definição matemática de “quantidade de movimento” – a rigor, de *impetus* –, fornecida por Jean Buridan, já fazia menção ao conceito de quantidade de matéria. Para os filósofos medievais, o *impetus* era uma *forma aristotélica*, impressa no corpo que se move,

cuja *matéria passiva* era caracterizada por uma *potência para a realização de movimento*. Essa potência era tanto maior quanto maior fosse a quantidade de matéria presente no corpo. Evidentemente, se se tratasse de movimentos naturais, esse pensamento implicaria uma proporcionalidade entre quantidade de matéria e *peso* – compreendido como uma potência para ocupação de um lugar natural. No caso dos movimentos violentos, contudo, não havia uma clara indicação de qual seria a interpretação correta da quantidade  $M$  que representava o corpo submetido à ação de contato, na expressão  $F = Mv$ , mas a tendência foi sempre a de considerar  $M$  como sendo ou idêntico ou proporcional ao peso. Logo,  $M$  também devia ser proporcional à quantidade de matéria.

Por outro lado, os filósofos medievais também já haviam desenvolvido um conceito de *resistência interna* que permitia livrar os movimentos naturais da necessidade de um *meio circundante* resistivo. Para tanto, a resistência  $R$ , na *lei de movimento natural*,  $v = k \frac{W}{R}$ , passou a ser considerada uma *propriedade do corpo*, não do meio. Uma comparação com a *lei de movimento violento*,  $F = Mv$ , implicava que o corpo que era submetido ao movimento ( $M$ ) passava a ser representado pela sua resistência interna ( $R$ ). Naturalmente, portanto, os filósofos medievais chegaram à conclusão de que, no que se refere à sua pura *passividade*, ou seja, à tendência a permanecer em repouso, *a quantidade de matéria de um corpo estava diretamente relacionada à sua resistência a ser movido*. Sendo força e massa inercial conceitos essencialmente complementares, não é de se espantar que os primórdios do conceito de massa inercial também possam ser encontrados em Kepler. Kepler também pensava em termos conceituais aristotélicos. Porém, seguindo suas inclinações neoplatônicas, na investigação da *Nova Astronomia*, ele compreendeu que *a natureza intrínseca de toda matéria consistia exatamente na resistência à ação da força* – no caso, das forças emanadas pelo Sol, que causavam o movimento dos planetas. E, para referir-se a essa natureza



intrínseca, ele utilizou o termo *inércia*. Foi exatamente a noção geral de inércia kepleriana a que Newton herdou, corrigiu e generalizou, nos *Principia*, para alcançar o seu próprio conceito de massa inercial.

A propósito, os problemas relacionados à inércia não paravam por aí. Galileu, Gassendi e Descartes já haviam entendido que movimento e repouso eram apenas *estados* que dependiam de um sistema de referência, cuja alteração dependia da ação de algum agente causal. Portanto, era natural concluir que a quantidade de matéria devia ser proporcional a uma propriedade intrínseca do corpo que não apenas estivesse relacionada com a resistência que ele oferecia a ser retirado do estado de repouso, mas com a *resistência a qualquer alteração de seu estado de movimento*. Newton foi capaz de chegar a essa conclusão, unificando os conceitos kepleriano, galileano e cartesiano de inércia e, com isso, fundando o moderno conceito de massa inercial. Para Newton, a inércia – *vis inertiae* (força de inércia), ou antes, *vis insita* (força inerente) – era uma propriedade intrínseca, irredutível e universal de todos os corpos materiais, definida como “*a disposição a resistir, pela qual cada corpo, na medida de sua quantidade, persevera em seu estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme*”. Tal disposição era concebida por Newton como uma *força*, proporcional à quantidade de matéria presente em cada corpo, que só se manifestava no momento em que a matéria fosse instada a mudar seu estado de movimento.

Antes de Newton, os conceitos de peso e quantidade de matéria encontravam-se confusamente relacionados, ora representando propriedades quase equivalentes, ora completamente distintas. Esse foi um complicador adicional de considerável importância, pois, na base dessa confusão, estava não apenas o desconhecimento da natureza da gravidade, mas, também, um fato altamente desconcertante: *a virtual igualdade entre as massas inercial e gravitacional*. A física newtoniana jamais foi capaz de explicar essa igualdade, porém,

não parece ter havido nenhum motivo, à época de Newton, para considerá-las distintas, sobretudo se se colocasse o problema de como explicar por que todos os corpos caíam com idêntica aceleração. O que permitiu a Newton esclarecer a natureza do peso foi sua tentativa de compreender (matematicamente) a gravidade. Ele conseguiu identificar o peso como uma *força externa* ao corpo, resultado da *atração gravitacional universal*. Isso fornecia uma explicação unificada para as órbitas planetárias e para a queda dos corpos na superfície terrestre. Tendo obtido a lei geral da gravitação e percebido que o peso deveria ser, necessariamente, uma função da distância entre o corpo e o centro da Terra, ele concluiu que o peso não poderia ser uma propriedade intrínseca e, portanto, um corpo deveria ser essencialmente caracterizado por uma outra propriedade.

Se a massa inercial era concebida como “força”, mas era, sobretudo, uma *propriedade* de corpos materiais, bem diferente era a concepção newtoniana de força como *agente causal*. Newton usou a expressão *força impressa*, tendo-a definido como sendo “*uma ação exercida sobre um corpo, com o intuito de mudar seu estado, seja de repouso, seja de movimento retilíneo uniforme*”. A força impressa era concebida como uma ação pura, que não mais residia no corpo sobre o qual agia, cessado o seu efeito. Essa ação podia ser originada de diferentes formas. Newton fez questão de incluir, entre essas formas, não apenas as originárias das concepções precedentes – forças de contato (impacto e pressão) –, mas também uma nova categoria conceitual: a *força centrípeta*, definida como “*aquela pela qual corpos são dirigidos, impelidos ou, de qualquer forma, tendem na direção de um ponto central*”. O conceito de força centrípeta foi o modo pelo qual Newton, finalmente, permitiu a introdução, no escopo da mecânica, da noção de uma *força que age à distância*: “*a quantidade absoluta de uma força centrípeta é a medida da mesma, proporcional à eficácia da causa que a propaga a partir de um*

centro através dos espaços que o circundam”. Ele tinha em mente, evidentemente, a força de atração gravitacional.

As três leis de Newton cumprem, no Livro I, o papel de axiomas. Elas completam a sistematização da nova mecânica, introduzindo os elementos que serão necessários, no Livro III, para o desenvolvimento da teoria da gravitação universal. A primeira lei é a lei de inércia, conforme enunciada por Descartes: “*Todo corpo persiste em seu estado de repouso, ou de movimento uniforme em linha reta, a menos que ele seja compelido a mudar o seu estado pela ação de forças impressas*”. A terceira lei, embora seja original, pode ser compreendida como uma expressão das leis de colisão de Huygens, em que comparece explicitamente o conceito de força: “*A toda ação existe sempre oposta uma reação igual: ou as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais, e dirigidas às partes contrárias*”. A segunda lei e suas definições associadas são a definitiva expressão do novo conceito de força. Sua introdução, em um sistema de mecânica matemática, completa a cinemática de Galileu com uma dinâmica: “*A mudança do movimento é proporcional à força motiva impressa, e é realizada na direção da linha reta em que essa força age*”. Observe que por “mudança de movimento”, Newton referia-se à mudança em sua quantidade. A quantidade de movimento havia sido previamente definida, por Newton, em termos aparentemente idênticos aos de Buridan: “... *aparecendo conjuntamente como produto da velocidade pela quantidade de matéria...*”. Obviamente, nesse conceito já está embutida a massa inercial. Em notação moderna, a expressão matemática da segunda lei seria  $F \propto \Delta(mv)$ . Entretanto, no seu uso subsequente, é fácil depreender que Newton também estava se referindo a formas tais como:  $F\Delta t = \Delta(mv)$  ou  $F = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = ma$ , onde já comparecem as noções de impulso – força atuante ao longo do tempo – e a expressão que, propriamente, exhibe a aceleração como efeito cinemático mensurável. Essas formas, entretanto, não aparecem, explicitamente, em nenhuma parte dos *Principia*. Em dois corolários que se

seguem às leis, ele expressou a *natureza vetorial* da força, ao estabelecer a *lei de composição do paralelogramo*.

A sequência do Livro I é dedicada à aplicação das leis do movimento a *massas pontuais*, em particular, àquelas orbitando centros de atração. Esse ponto é também digno de nota, e encontra-se associado com a filosofia atomística. Toda a estrutura conceitual da nova mecânica está assentada sobre a possibilidade de analisar, matematicamente, qualquer corpo extenso em termos de uma infinidade de *pontos geométricos*, cuja natureza é, a um só tempo, *ideal* – enquanto abstração matemática – e *real* – já que, fisicamente, todos os corpos são constituídos por átomos que, no limite, ocupam pontos no espaço. A natureza física desses pontos geométricos requer que eles sejam *massivos*. Em última instância, a mecânica newtoniana é uma *dinâmica de pontos materiais sob ação de forças*. Newton passou, então, a realizar o seu grande objetivo: *demonstrar, matematicamente, a validade das leis de Kepler*. Os pontos cruciais da exposição são: (i) a demonstração de que a condição necessária e suficiente para a validade da segunda lei de Kepler (lei das áreas) é a força impressa ser *central* – e que isso implica, ainda, *movimento planar* –; (ii) a demonstração de que *se a força central decair com o inverso do quadrado da distância ao centro, então as trajetórias descritas pelos pontos materiais serão seções cônicas – elipses*, quando suas velocidades tangenciais estiverem abaixo de certo valores; (iii) a demonstração de que a terceira lei de Kepler também deve seguir-se de uma lei de força central que decaia com o inverso do quadrado da distância ao centro.

### **A Teoria da Gravitação Universal**

A teoria da gravitação universal foi uma hipótese cosmológica arrojada que representou o ápice do processo de mecanização do mundo celeste – em termos físicos e matemáticos sólidos e, principalmente, unificados com a física do mundo terrestre. Ela veio a público em 1685, como a culminação de uma série de investigações envolvendo vários

cientistas. Entre eles estavam Robert Hooke, Christopher Wren, John Wallis e Edmund Halley. Todos acreditavam – seguindo Kepler – que uma *força central* era exercida pelo Sol e deveria decair com a distância ao centro. Alcançar uma explicação dinâmica – porém, em termos *matemáticos* exatos – para as leis de Kepler tinha-se tornado o principal problema para esses astrônomos e matemáticos. Contudo, já em 1666, Newton havia se dedicado, com sucesso, à solução matemática do problema. Essencial foi ele ter resolvido novamente o problema de quantificar a “força centrífuga” nos movimentos circulares. Voltando-se para a mecânica celeste, Newton utilizou a terceira lei de Kepler para mostrar que as “tendências centrífugas” dos planetas eram compatíveis com a lei de decaimento com o *inverso do quadrado* da distância – cuja ideia, aliás, já vinha sendo considerada. Newton foi além. Para mostrar que era possível que a natureza da gravidade terrestre fosse a mesma da força que mantinha a Lua em sua órbita, ele comparou a sua aceleração centrífuga  $g_L$  com a medida  $g_T$  da aceleração da gravidade, na superfície da Terra. Ele sabia que a órbita da Lua era cerca de sessenta vezes maior que o raio da Terra. Sabendo o período de revolução da Lua, era possível calcular sua velocidade e, desse modo,  $g_L$ . A razão entre os dois valores forneceu  $g_T / g_L = 3,56 \times 10^3$ . Por outro lado, a imposição de uma lei do inverso do quadrado para ambas as acelerações forneceu  $g_T / g_L = (R_L / R_T)^2 = 60^2 = 3600 = 3,60 \times 10^3$ . A proximidade entre esses dois valores era espantosa. Aqui, estavam lançados os germes da teoria da gravitação universal. Note-se, entretanto, que *Newton ainda não se referia a forças de atração, apenas a tendências centrífugas*. Em 1679, Robert Hooke colocou-se o problema de calcular a trajetória de um corpo sob ação da gravidade terrestre pela *composição de um movimento tangencial com uma força de atração central*, seguindo uma lei de decaimento com o quadrado da distância. Ele estava certo de que a órbita deveria ser uma elipse. A correspondência com Hooke instigou Newton a demonstrar matematicamente

que uma trajetória elíptica realmente implicava uma lei do inverso do quadrado, o que o levou a abandonar a abordagem por forças centrífugas.

A teoria da gravitação universal, em sua forma final, apareceu no Livro III dos *Principia – Sobre o Sistema do Mundo*. Com os princípios da mecânica fundamentados, no Livro I, e a teoria cartesiana dos vórtices destruída, no Livro II, Newton se dedicou, no Livro III, a construir o seu próprio sistema universal. A partir dos exemplos do sistema solar e do sistema jupiteriano, ele invocou o seu *princípio de uniformidade* para efetuar uma ampla generalização indutiva: que *forças atrativas operando segundo leis do inverso do quadrado eram universais*. Para estabelecer a lei da gravitação universal, entretanto, ele ainda tinha que prover uma demonstração definitiva da correlação entre a gravidade na superfície da Terra e a aceleração – agora *centrípeta* – da Lua. Para isso, um papel fundamental foi desempenhado pela demonstração de que a gravidade de uma massa homogeneamente distribuída em uma esfera sólida era equivalente à gravidade de um ponto material com toda a massa da esfera concentrada em seu centro geométrico.

### **Espaço e Tempo Absolutos**

A mecânica newtoniana é uma vasta tentativa de reduzir matematicamente todos os fenômenos do universo à dinâmica de pontos materiais discretos, interagindo por meio de forças de ação central. Nos *Principia*, esse programa só podia ser cumprido se, além de partículas massivas e forças de atração gravitacional, dois outros elementos fossem considerados: espaço e tempo. Para cumprir com sucesso o programa atomista, Newton desvinculou as noções de *extensão espacial* e *quantidade de matéria*. Embora essa desvinculação estivesse implicitamente realizada nas obras de Kepler, de Galileu e de Gassendi, coube a Newton sua sistematização e, nesse processo, suas mais arrojadas hipóteses metafísicas apareceram de forma explícita.

Newton realizou essa tarefa a partir da metafísica de fundo que já havia guiado Galileu e Descartes, procurando reduzir toda a física ao tratamento das *qualidades primárias*. Assim, no *Scholium* à definição VIII, dos *Principia*, espaço e tempo foram concebidos como *estruturas matemáticas puras, porém, com status ontológico de realidade, correspondentes a entidades com existência independente da matéria*. Com efeito, de modo análogo a Descartes, Newton diferenciou as noções *vulgares* de espaço e de tempo – relativos, aparentes e comuns, construídos a partir de suas relações com objetos materiais – das *noções verdadeiras de espaço e de tempo absolutos*. O *tempo absoluto*, ou *duração*, foi concebido como um *fluxo estacionário*, no qual todas as coisas estavam postas segundo a *ordem da sucessão*. O tempo relativo era uma medida da duração, realizada através do movimento. O *espaço absoluto*, ou *extensão*, era uma arena tridimensional, homogênea, isotrópica e imóvel, na qual todas as coisas estavam postas segundo a *ordem da situação*. O espaço relativo era uma medida do espaço absoluto, realizada por meio de corpos. A partir dessas definições, Newton pôde definir *movimento e repouso absolutos*.

As concepções absolutas de Newton implicavam um retorno às concepções aristotélicas, já que se contrapunham à concepção de movimento como estado relativo, dependente de observadores. Porém, havia uma diferença crucial, porque ele estava ciente de que era impossível *conhecer* o estado absoluto. Essa ideia passou a constituir o que, posteriormente, ficou conhecido como *princípio da relatividade galileana*. As noções absolutas de Newton são, de fato, uma evidência cristalina de sua adesão a hipóteses *metafísicas*. Ainda assim, Newton considerava que existiam argumentos *a priori* que permitiam dar suporte a tais compromissos, sobretudo porque ele acreditava que, para explicar os *efeitos inerciais* – a exemplo das forças centrífugas em referenciais girantes – era necessário supor a existência do espaço absoluto. De qualquer modo, os argumentos desenvolvidos no *Scholium*

visavam não a uma *demonstração* da existência do espaço absoluto, mas à demonstração da impossibilidade de seu afastamento em favor de instâncias relativas.

### **3.3. *Hypotheses non Fingo*: o Positivismo Newtoniano**

Os compromissos metafísicos de Newton com respeito ao espaço, ao tempo e à gravidade colocavam-se em contradição com os princípios de sua epistemologia. Já no prefácio dos *Principia*, Newton propôs-se a abraçar uma filosofia *empirista*, em repúdio ao que ele considerava serem os excessos produzidos pelos racionalismos que, desde os gregos antigos, passando pelos aristotélicos medievais e desembocando nos sistemas de Descartes e Leibniz, haviam desviado a filosofia natural de seu caminho correto. Assim, ele prescreveu uma *metodologia estritamente indutivista* – ao estilo de Francis Bacon – e uma *epistemologia estritamente positivista*, com o objetivo de reduzir todos os problemas da filosofia natural à investigação das forças da natureza *partindo exclusivamente dos fenômenos* do movimento e, somente a partir daí, *demonstrar, matematicamente*, os demais fenômenos. É importante observar que o papel da matemática sempre foi, para Newton, instrumental. O método newtoniano pressupunha que toda investigação deveria começar da experiência e terminar com a experiência. Diferentemente do racionalista Galileu, Newton só admitia o uso da matemática na exata medida em que pudesse ser a contrapartida do elemento empírico. Como Gassendi, ele não acreditava que a razão fosse capaz de desvelar a natureza intrínseca subjacente aos fenômenos, a despeito de sua argumentação no *Scholium* à definição VIII. Foram essas crenças que o levaram a criticar e a tentar banir, da filosofia natural, as chamadas *hipóteses*: “O que quer que seja que não tenha sido deduzido dos fenômenos é chamado uma hipótese; e hipóteses, sejam metafísicas ou físicas, sejam sobre qualidades ocultas ou mecânicas, não têm lugar na filosofia experimental”.



Para articular esse radical programa positivista, Newton propôs, nos *Principia*, sua própria metodologia, fundada em quatro *Regras para o Raciocínio em Filosofia*. A primeira regra expressava um *princípio de simplicidade*: “*Não se deve admitir mais causas de coisas naturais do que aquelas que sejam verdadeiras e suficientes para explicar as aparências*”. A segunda regra expressava um *princípio de uniformidade*: “*Aos mesmos efeitos naturais deve-se, tanto quanto possível, imputar as mesmas causas*”. Juntas, essas regras reproduziam o princípio nominalista medieval conhecido como a *Navalha de Occam*. A terceira regra expressava um *princípio de generalização indutiva*: “*As qualidades dos corpos que não admitem intensificação ou diminuição de graus, e que tenham sido verificadas como pertencentes a todos os corpos ao alcance de nossos experimentos, devem ser julgadas qualidades universais de todo e qualquer corpo*”. A quarta regra buscava expressar uma mescla de um *princípio de falibilismo e revisionismo* com um *princípio de empirismo extremo*: “*Na filosofia experimental, devemos considerar as proposições inferidas por indução geral a partir de fenômenos como sendo acuradamente ou muito aproximadamente verdadeiras, a despeito de quaisquer hipóteses contrárias que possam ser imaginadas, até o momento em que outros fenômenos ocorram e que permitam que essas proposições possam ou ser construídas de modo ainda mais acurado, ou devam ser julgadas passíveis de exceções*”. Enquanto as três primeiras regras pareciam permitir ainda alguma liberdade de especulação metafísica, a quarta regra estabelecia com clareza a interdição, de modo que *toda e qualquer hipótese só podia ser considerada na medida em que representasse uma tentativa de fazer avançar a investigação empírica*.

Esse programa newtoniano foi julgado, já em sua própria época, equivocado, apesar do retumbante sucesso de sua teoria física. Muitos foram capazes de perceber que as hipóteses metafísicas que Newton julgava ter expurgado de sua teoria encontravam-se profundamente enraizadas nas suas definições, nas suas três leis e, principalmente, na sua nova concepção de força como agente causal invisível. A teoria da gravitação universal foi severamente criticada como tendo

reintroduzido na física o que Descartes tinha lutado arduamente para eliminar: as qualidades ocultas da matéria. O fato é que ninguém pôde compreender o que significavam forças de atração cujos efeitos se faziam sentir à distância, sem a intermediação de qualquer meio material. Esses julgamentos se mostraram, em parte, injustificados. Se é verdade que Newton sustentou um ideal de ciência que julgava ser a natureza, em última instância, inextricável, por outro lado, não é verdade que estivesse revertendo aos modos aristotélico-medievais ou renascentistas de explicação dos fenômenos. O que ele estava fazendo era superando os últimos entraves para o estabelecimento de uma filosofia mecânica que estivesse em consonância com os princípios da nova física matemática. Que Newton estivesse envolvido com hipóteses metafísicas é absolutamente certo. Porém, a diferença entre Newton e muitos de seus predecessores estava na sua aguda consciência de que essas hipóteses e princípios precisavam manter-se controlados e exclusivamente à serviço da elucidação dos fenômenos. E a consciência de que, se as causas não pudessem ser descobertas, no estágio presente de qualquer investigação científica, seria antes preferível abster-se de especulações estéreis. Ele sempre pensou desse modo e, no *Scholium Geral*, adicionado, em 1713, à segunda edição dos *Principia*, Newton se pronunciou enfaticamente a esse respeito: “Mas, até agora, eu não fui capaz de descobrir a causa daquelas propriedades da gravidade a partir dos fenômenos, e eu não fabrico hipóteses – *hypotheses non fingo*.”

Na fase mais fortemente dominada pelo seu credo positivista (1685 – 1713), Newton não parece ter acreditado que a causa da gravidade pudesse ser de natureza mecânica. Porém, próximo ao fim de sua carreira, ele voltaria a buscar por uma explicação mecânica para a gravidade, não apenas porque pode ter sentido nessa lacuna uma fragilidade estrutural de sua concepção cosmológica, mas também porque considerava importante conduzir o entendimento para além

de aspectos puramente instrumentais. E, embora tenha-se recusado a lançar mão da hipótese de um éter, nos *Principia*, a ela retornaria, nas edições finais de sua outra obra-prima: a *Optica*.

### 3.4. A *Optica* e a Outra Face de Newton

#### O Prisma e o Problema das Cores

Até o início do século XVII, as cores eram consideradas propriedades reais dos corpos, e a luz, essencialmente distinta delas, servia apenas para exibi-las. Descartes foi o primeiro a estabelecer uma explicação puramente mecânica para ambas. A luz era real, pois consistia em corpúsculos. Como qualidades secundárias, as cores não eram reais, eram efeitos fisiológicos associados às velocidades de *rotação* dos corpúsculos sobre a retina. Com base em experimentos realizados com prismas, na observação da dispersão da luz e na formação do espectro colorido, Descartes supôs que a refração no prisma alterava as velocidades de rotação da luz branca, embora o motivo pelo qual várias cores eram criadas fosse deixado sem explicação. A explicação cartesiana se manteve firme por boa parte do século XVII. No geral, contribuições tais como as de Francesco Grimaldi (1618 – 1663) – descobridor da *difração* da luz – Robert Hooke e Robert Boyle – os primeiros a observar o fenômeno de *interferência* – acabaram se ajustando à concepção mecânica original. A novidade mais promissora esteve por conta da *teoria ondulatória* de Huygens – que também descobriu o fenômeno de *polarização* associado à birrefringência.

#### O *Experimentum Crucis*

A história da ótica sofreria a sua principal reviravolta com Newton e a publicação de sua *Optica*, em 1704, resultado de elaborações de ideias surgidas quarenta anos antes. Newton propôs uma nova teoria da dispersão da luz, na qual, pela primeira vez, a luz branca era considerada *composta de raios*

*de diferentes cores*. Em função disto, cada raio sofreria um efeito de refração distinto no prisma, produzindo sua separação. Newton também observou que o espectro produzido era *alongado*, o que não era explicado pela teoria cartesiana. Prevendo uma resposta *ad hoc*, Newton utilizou uma estratégia que, a partir de sua obra, passou a ser conhecida por *experimento crucial* – *experimentum crucis*. Com o uso de um segundo prisma posicionado para capturar apenas um raio monocromático, ele mostrou que esse raio sofria nova refração, mas nenhuma outra dispersão. Se a teoria cartesiana fosse correta, um novo efeito dispersivo era esperado.

Estratégias desse tipo não eram novas. Em tese, um experimento crucial é aquele claramente desenhado para testar duas teorias rivais cujas previsões sejam suficientemente distintas. É relativamente importante, portanto, que as teorias rivais sejam capazes de fazer previsões acuradas. Foram múltiplos os exemplos surgidos, ao longo da Revolução Científica, de experimentos tidos por cruciais. Embora sua ideia seja sedutora e pareça, de fato, sólida, a verdade é que a crítica filosófica, a partir do século XIX, lançou dúvidas sobre sua validade. A base dessa crítica é uma versão da tese Duhem-Quine. O ceticismo moderno com relação aos experimentos cruciais é variado, de acordo com a maior ou menor força da versão da tese. As versões mais radicais sustentam que é sempre possível inviabilizar qualquer experimento desse tipo lançando mão da estratégia de construção de novas hipóteses auxiliares (*ad hoc*). Porém, a prática científica de todas as épocas jamais aderiu completamente às versões mais fortes da tese, sobretudo porque a estratégia de criar hipóteses *ad hoc* geralmente esbarrava em outros problemas, relacionados com aspectos pragmáticos.

### **O Modelo Mecânico Dual para Luz: do Éter Mecânico ao Éter Dinâmico**

Durante a década de 1670, Newton desenvolveu uma teoria *hipotética* puramente mecânica para a luz. No seu *modelo*

*corpuscular*, a luz era um feixe de partículas materiais, minúsculas e que se moviam com altíssimas velocidades. O tamanho das partículas podia ser variado e essa propriedade estaria associada à sua cor. Portanto, mesmo sem o éter, as propriedades da ótica geométrica podiam ser compreendidas em termos mecânicos – a propagação retilínea, pelo princípio de inércia; a reflexão, pelo impacto e ricocheteio; a refração, pelo impulso, embora, nesse caso, faltasse compreender a origem do impulso. Foi para completar a explicação mecânica, e incluir as propriedades periódicas, que Newton lançou mão do conceito de éter. Com efeito, ele especulou que as variações de densidade e as vibrações periódicas do éter atuavam *diretamente* sobre as partículas de luz, alterando suas trajetórias por meio de *impactos*. A partir de então, esse modelo dual também permitiu construir explicações para os processos de separação e de formação das cores no prisma e em superfícies rugosas e para a origem da refração, da difração e dos anéis de Newton. Observe-se que o éter atomizado proposto nessa primeira fase especulativa – correspondente à publicação de 1675 – não era *mecanicamente* diferente do éter de Descartes.

Embora a face especulativa de Newton já tivesse sido mostrada desde a publicação da primeira edição inglesa da *Optica* (1704), nela, a hipótese do éter ainda não havia reaparecido, pois, nessa segunda fase especulativa, suas estratégias de explicação ainda eram tributárias do modelo metodológico desenvolvido nos *Principia*. De fato, Newton passou a tentar explicar todos os fenômenos óticos apenas pela postulação de *forças atrativas* entre as próprias partículas de matéria, inclusive as de luz. Esse passo representou a primeira mudança, no campo da ótica, na concepção mecânica cartesiana que só admitia causação por contato (*impactos*). Sem a hipótese do éter, entretanto, os fenômenos periódicos associados à luz deixavam de ter uma explicação plausível. Mesmo na versão latina da *Optica* (1706), Newton ainda se

recusou a retornar à hipótese do éter, tendo dado às suas próprias especulações uma forma definitivamente contrária às especulações mecanicistas cartesianas. Ele se opunha tanto aos modelos de explicação baseados no *plenum* material quanto à teoria *ondulatória* da luz, de Huygens. Para Newton, a hipótese de um universo preenchido implicava problemas astronômicos sérios, comprometendo a regularidade e, até mesmo, a possibilidade dos movimentos planetários. Esse período intermediário corresponde à publicação do *Scholium Geral* da segunda edição dos *Principia*, no qual Newton identificava, no *espaço absoluto*, uma espécie de *Sensorium Dei* – sede das sensações divinas –, provendo um suporte teológico para o *movimento absoluto*, para a manifestação das forças e para a conservação do movimento no universo.

A reviravolta aconteceu com a publicação da segunda edição inglesa da *Optica* (1717), que representou a fase final de seu pensamento. Newton retomou a hipótese do éter, porém, com uma grande novidade: diferentemente do éter mecânico das especulações anteriores, sua nova *concepção dinâmica de éter* transferia a função dos “poderes ativos” imateriais – em última instância, divinos, responsáveis pela manifestação das forças de ação à distância – para um conjunto (hipotético) de *forças repulsivas*, agindo entre as partículas massivas que constituíam a estrutura do novo éter. Essa concepção de éter dinâmico representou, a uma só vez, o ápice da metafísica e da síntese histórica newtonianas, na medida em que realizou a unificação final, em uma mesma entidade, do par dicotômico *matéria passiva/força ativa*, com a consequente superação da dicotomia metafísica entre a filosofia mecânica e a física matemática. O éter dinâmico era extremamente rarefeito, no espaço, para evitar sua interferência na movimentação dos corpos massivos. Ele deveria ser constituído por partículas extremamente leves. As forças repulsivas entre essas partículas confeririam ao éter uma excepcional elasticidade. Sua postulação deveria permitir, segundo prognósticos arrojados,

a explicação de todos os fenômenos ditos “não mecânicos”, não apenas eletricidade, magnetismo, forças de coesão da matéria e afinidades químicas, mas, também calor, luz e... gravidade! O éter dinâmico restaurava a possibilidade de explicar, em bases novas, os fenômenos periódicos da ótica, através da ação das forças geradas pelo éter sobre as partículas de luz. Ainda mais impressionantes são as especulações a respeito das causas da atração gravitacional. Newton sugeriu que a gravidade poderia ser entendida como um efeito de impulsão (mecânica) dos corpos macroscópicos, na direção uns dos outros, proporcionado por gradientes de densidade do éter. Para tanto, era forçoso supor que a densidade do éter era tanto menor quanto mais internamente ele estivesse imiscuído no interior da matéria sólida e tanto mais denso quanto mais afastado estivesse de corpos materiais, como no espaço celeste. A gravidade seria o efeito observado das pressões que as forças elásticas repulsivas do éter exerceriam sobre todos os corpos.

É quase certo que essas radicais mudanças de postura com relação ao papel das hipóteses tenham sido fruto das severas críticas sofridas e das acusações de ter reintroduzido qualidades ocultas na natureza. Segundo Abrantes, a postulação do novo éter dinâmico foi sua solução de compromisso final, que contemplava tanto as exigências metafísicas mecanicistas quanto as suas próprias. É bem verdade, contudo, que a postulação do éter atomizado, posto em uma arena espacial vazia, remetia o problema da ação à distância para o nível microscópico, já que as próprias partículas de éter não entravam em contato direto entre si. Por isso, dificilmente se pode dizer que as novas especulações tenham resolvido o problema original. Elas abririam, contudo, uma imensa gama de possibilidades para o que, um século e meio depois, seria o início do processo de superação da visão de mundo mecanicista, particularmente, com o advento da noção de *campo*.





## Interlúdio

---

# A Estrutura Conceitual da Física do Século XIX

*“The beauty and clearness of the dynamical theory, which asserts heat and light to be modes of motion, is at present obscured by two clouds. I. The first [...] involved the question, how could the earth move through an elastic solid, such as essentially is the luminiferous ether? II. The second is the Maxwell-Boltzmann doctrine regarding the partition of energy”.*

Lord Kelvin (1900)

**N**o século XIX, todos os campos clássicos da física – a mecânica, a ótica, a termodinâmica e o eletromagnetismo – alcançaram o ápice de seus desenvolvimentos. A física dos séculos XVII e XVIII havia se desenvolvido, majoritariamente, na mecânica e na ótica, na esteira do legado de Newton. Embora a segunda metade do século XVIII tenha testemunhado, no campo experimental, avanços nas investigações sobre a eletricidade, o magnetismo, o calor e a estrutura da matéria, foi ao longo do século XIX que a nova

visão mecanicista da natureza prosperou e, sob a influência paradigmática de duas grandes inovações teóricas – os conceitos de *campo* e de *energia* –, obteve dois sucessos retumbantes. O primeiro, a unificação da ótica, da eletricidade e do magnetismo. O segundo, a compreensão dos fenômenos térmicos e sua unificação com a mecânica, primeiramente, em termos macroscópicos – com a *termodinâmica* – e, em seguida, em termos microscópicos – com a *mecânica estatística*. A chave para a compreensão de como essas unificações foram realizadas está no modo como os novos conceitos de campo e de energia se articularam com três elementos teóricos hipotéticos já previamente concebidos: o *éter*, as *ondas* e os *átomos*. Esses elementos teóricos representaram diferentes compromissos ontológicos no interior da visão de mundo mecanicista, ainda que ela implicasse sua necessária redução às categorias de *matéria*, *movimento* e – a depender do compromisso ontológico assumido – *força*.

A *visão atomística* original esteve comprometida com a crença *metafísica* de que todo o conteúdo do universo era *descontínuo*, formado por *partículas* – massivas, no caso da matéria ordinária – que se moviam no espaço vazio, interagindo através de forças de diferentes tipos. A luz, o calor, a eletricidade e o magnetismo também foram concebidos como tipos especiais de matéria atomizada. Essa visão atomística original evoluiu naturalmente a partir da ideia do éter dinâmico de Newton e, no caso da ótica, implicou uma simplificação da teoria dual. De fato, a própria luz assumiu natureza “etérea” e as forças que mediavam sua interação com a matéria ordinária acabaram por esvaziar a função original do éter newtoniano. Já a *visão ondulatória* original esteve comprometida com a crença *metafísica* na existência de uma ou mais entidades *contínuas* que, além de ocupar todo o espaço, tinham como propriedade essencial a capacidade de sustentar variações locais de suas respectivas *densidades*. A visão ondulatória operou um deslocamento conceitual de extrema importância: luz, calor, eletricidade e magnetismo não eram mais concebidos

como diferentes *tipos especiais de matéria*, mas como *movimento que se propagava como perturbação em, eventualmente, diferentes tipos de substrato material*. Com isso, a *hipótese da existência de vários éteres ressurgiu naturalmente*. De modo diverso da visão atomística, a visão ondulatória também era tributária da categoria de força, pois, para sustentar ondas, o substrato etéreo deveria possuir algum tipo de *elasticidade*.

Quando os conceitos de campo e de energia surgiram, eles começaram a deslocar a função do conceito de força no interior das diferentes teorias. Os cientistas do século XIX, embora comprometidos com o mecanicismo, começaram a perceber a grande distância existente entre a *realidade física* e os diferentes *modelos mecânicos e matemáticos* que eram engendrados para representá-la. Desse modo, as visões ondulatória e atomística originais sofreram uma transformação no sentido de passarem a ser gradativamente consideradas *modelos de explicação*, cujo valor residia mais em sua capacidade de tornar os fenômenos inteligíveis e menos em serem descrições fiéis da realidade. O crescente interesse dos físicos por descrições matemáticas mais sofisticadas, aliado à desconfiança de parte deles com relação às hipóteses metafísicas, acabou por abrir espaço para que os conceitos de campo e de energia – que eram bem mais abstratos e instrumentais do que o conceito de força – tomassem, paulatinamente, o seu lugar. A superação da visão de mundo mecanicista esteve intimamente associada com esse processo.

### **As Teorias Físicas no Século XVIII: *Física Geral e Física Particular***

No século XVIII, a física se caracterizou por uma crescente dicotomia na investigação dos fenômenos naturais. Essencialmente, foram abertas duas correntes principais de desenvolvimento, cujas origem e inspiração estavam, ambas, nas obras fundamentais de Newton: os *Principia* e a *Optica*.

A corrente principal, denominada *física geral* – herdeira dos *Principia* –, era caracterizada pela investigação matemática

e experimental dos fenômenos tipicamente mecânicos e, por isso, relacionados com propriedades consideradas universalmente imputáveis a todas as entidades da natureza, tais como a extensão, a impenetrabilidade, o movimento e a inércia. Em última instância, seus conceitos básicos resumiam-se a espaço, tempo e massa inercial. A física geral era altamente abstrata, evitando hipóteses e conjecturas a respeito da estrutura última da matéria, seja dos átomos, seja da natureza das forças. Nesse sentido, seguiu na direção de depurar a física newtoniana de todos os seus elementos metafísicos e teológicos, até o limite extremo de procurar eliminar até mesmo a categoria de força. Ela foi caracterizada por sua alta sofisticação matemática e deveu-se, principalmente, aos trabalhos de Daniel Bernoulli (1700 – 1782) e de Leonard Euler (1707 – 1783) – em mecânica dos fluidos e na teoria da elasticidade –; de Jean d’Alembert (1717 – 1783) – em mecânica teórica e mecânica dos fluidos –; de Joseph-Louis Lagrange (1736 – 1813) – em mecânica analítica, cálculo de variações e mecânica celeste –; e de Pierre-Simon Laplace (1749 – 1827) – em mecânica celeste e análise aplicada. Esses físicos matemáticos levaram os desenvolvimentos da mecânica newtoniana às suas (quase) últimas consequências, generalizando-a tanto no sentido de aplicá-la à *física dos meios contínuos*, quanto no sentido de fundar uma *mecânica analítica*. Ambas as extensões cumpririam papel fundamental nas transformações efetuadas sobre o mecanicismo do século XVII e, posteriormente, na superação do mecanicismo do século XIX.

Em contraste, havia uma corrente, inicialmente secundária, denominada *física particular* – herdeira das especulações arrojadas e do franco empirismo da *Optica* –, que se ocupou, principalmente, do estudo daqueles fenômenos que ainda escapavam de uma formulação mecânica quantitativa e exata: luz, calor, eletricidade, magnetismo e reações químicas. Essa corrente era caracterizada por seu crescente interesse pela abordagem experimental e pelo uso praticamente

indiscriminado de hipóteses sobre a constituição da matéria. Essas hipóteses acabaram se estruturando a partir das especulações de Newton a respeito do éter dinâmico que, no século XVIII, deu origem a uma grande quantidade de novas entidades físicas. Elas ficaram conhecidas como *fluidos imponderáveis* e estiveram intimamente associadas com a noção de forças de ação à distância. O sucesso da mecânica newtoniana havia praticamente soterrado todas as objeções com relação a forças de ação à distância, de modo que elas passaram a ser aceitas de modo relativamente pouco crítico. A *física particular* foi fundamental para a sustentação de uma atitude rebelde, frente à *física geral*, pois sua recusa a assumir atitudes estritamente positivistas também contribuiu para a superação da visão mecanicista. Pierre-Simon Laplace também foi o guia intelectual de toda uma geração de físicos que trabalhou sob o ideário dos fluidos imponderáveis – Joseph Black (1728 – 1799) e Antoine Lavoisier (1743 – 1794), na teoria do calórico; Tobias Mayer (1723 – 1762), Johann Lambert (1728 – 1777) e Charles Coulomb (1736 – 1806), em magnetismo; Alessandro Volta (1745 – 1827), Henry Cavendish (1731 – 1810) e Coulomb, em eletricidade.

### **A Física Laplaciana e a Teoria Matemática do Calor**

A criação de uma ciência física unificada, na segunda metade do século XIX, ocorreu sob a influência de alguns “paradigmas” heterogêneos que conviveram na passagem do século XVIII para o século seguinte. Esses “paradigmas” corresponderam a diferentes atitudes metodológicas, epistemológicas e metafísicas, tanto com relação à dicotomia *física geral/física particular*, quanto com relação à herança da física newtoniana que havia se estabelecido como a visão mecanicista definitiva de mundo. De um lado, estava a *física laplaciana*. A ela se opondo, de um modo ou de outro, estavam a teoria matemática do calor, a teoria ondulatória da luz e o princípio de conservação da energia.

Laplace e seus seguidores buscaram pavimentar a ligação entre a física geral e a física particular, especulando sobre possíveis formulações matemáticas para as forças entre as partículas dos fluidos imponderáveis, de modo a aplicá-los tanto aos fenômenos puramente mecânicos quanto aos fenômenos térmicos, elétricos, magnéticos e óticos. Essas ideias acabaram se consubstanciando em um programa universal de explicação, exclusivamente baseado em *forças moleculares*, que se contrapunha ao programa analítico-positivista dos físicos-matemáticos. Além da perspectiva unificadora, a escola laplaciana foi caracterizada por dar extrema importância à física experimental e ao desenvolvimento de métodos e instrumentos cada vez mais precisos para a medição de grandezas físicas. Assim como o éter dinâmico newtoniano, os fluidos imponderáveis eram constituídos por uma matéria tênue (rarefeita) e sutil (pervasiva). Suas partículas – diminutas, invisíveis e, virtualmente, sem massa – interagem entre si através de *forças repulsivas* – de ação à distância, mas *de curto alcance* –, conferindo-lhe *elasticidade*. Os átomos dos fluidos imponderáveis também interagem com os átomos da matéria ordinária, através de *forças atrativas* – também de ação à distância e *de curto alcance*. Assim, a matéria comum atraía para o seu intermeio os fluidos responsáveis pelo calor (calórico), pela luz (matéria análoga ao “fogo”), pela eletricidade (fluido elétrico) e pela combustão (flogístico). A física laplaciana foi a mais legítima herdeira dos ideais de ciência tipicamente newtonianos, tendo se comprometido com a visão atomística – a *visão astronômica da natureza* – que transpunha, para o nível microscópico, os paradigmas da gravitação universal.

É importante mencionar a contribuição de Joseph Fourier (1768 – 1830). Com a publicação, em 1822, de sua *Teoria Analítica do Calor*, Fourier conseguiu construir o que foi, provavelmente, a primeira ponte sólida entre a física geral e a física particular, ao empregar métodos puramente analíticos para tratar a propagação do calor em sólidos, *sem*

*comprometer-se com conjecturas a respeito de sua estrutura.* Apesar de ter sido fortemente criticado por Poisson – que não aceitava a eliminação dos mecanismos moleculares – e por Lagrange e Laplace – que não aceitavam a falta de rigor dos métodos de expansão em séries trigonométricas –, Fourier teve decisiva influência sobre um gigante da física do século XIX, William Thomson (*Lord Kelvin*, 1824 – 1907), principalmente no que se referia à nítida distinção entre representação matemática e realidade física.

### **Teoria, Fenômeno e Realidade: o Estatuto da Explicação Mecânica no Século XIX**

Dos pontos de vista ontológico e epistemológico, a física do século XIX continuou ligada aos ideais metafísicos e aos princípios de explicação cartesianos. Mesmo após o advento da concepção newtoniana de força, ela ainda buscava reduzir *a estrutura fundamental da realidade física apenas às categorias de matéria e de movimento.* Desse modo, o aspecto reducionista e unificador que caracterizava a filosofia mecânica do século XVII foi incorporado à agenda dos cientistas do século XIX. Como Descartes, eles também consideravam *realidade física e fenômeno como coisas essencialmente distintas.* Porém, estavam bastante cientes da tensão existente entre a ontologia mecânica e os modelos hipotéticos inventados para explicar os fenômenos.

As variadas formas pelas quais as explicações mecânicas foram construídas recaíam em, basicamente, três categorias. A primeira categoria era a do mecanicismo tipicamente *newtoniano.* A conexão entre fenômeno e realidade era realizada por meio de modelos que consistiam em configurações de pontos materiais, interagindo através de forças. A segunda categoria era a do mecanicismo tipicamente *cartesiano.* Acoplado com as amplas modificações tecnológicas propiciadas pela Revolução Industrial do século XVIII, ele buscava conectar fenômeno e realidade através de *mecanismos* propriamente ditos, ou seja, modelos mecânicos, análogos a

dispositivos e máquinas complexas, cuja ação se fazia apenas por contato. Esses mecanismos podiam ser elaborados a partir de *corpos rígidos* – rodas, engrenagens, hastes e articulações –, a partir de *corpos elásticos* – sólidos compressíveis, em geral, tais como molas – ou a partir de *fluidos* – gases ou líquidos, compressíveis ou incompressíveis. A terceira categoria foi o resultado direto da redução operada, no século XVIII, do mecanicismo newtoniano à física matemática. Era a categoria do formalismo abstrato da dinâmica analítica de Lagrange, ou mecanicismo *dinamicista*. Um modelo mecânico não era mais do que um sistema matematicamente representado por um número finito de *graus de liberdade*, cuja dinâmica era descrita por *equações de movimento*, eventualmente derivadas a partir de *princípios de extremização*.

Essas formas de articular a visão mecanicista não eram, necessariamente, mutuamente excludentes, e foram todas responsáveis, em diferentes níveis, por avanços conceituais de amplo alcance. O mecanicismo newtoniano subscrevia naturalmente uma metafísica *atomística* para a natureza e guiou os avanços no sentido da compreensão da estrutura da matéria. Por outro lado, o mecanicismo cartesiano subscrevia uma metafísica *continuísta* e não apenas apresentou-se como horizonte conceitual para a articulação das bases mecânicas envolvidas nos fenômenos ondulatórios como antecedeu os avanços no sentido da formulação do conceito de *campo*. O mecanicismo dinamicista, por sua vez, teve o insuperável mérito de acomodar e reduzir – matemática e ontologicamente – tanto o mecanicismo newtoniano quanto o cartesiano. De fato, quando o conceito de energia começou a suplantar o conceito de força, no contexto das explicações mecânicas, o dinamicismo se apresentou como a categoria de explicação mais capaz de fornecer o suporte para a superação definitiva da visão de mundo mecanicista.



# Luz, Eletricidade, Magnetismo e o Advento da Relatividade Especial

### 4.1. A Teoria Ondulatória da Luz de Christiaan Huygens

**U**ma alternativa ao modelo corpuscular consistia em conceber a luz como *perturbação que se propaga através de um meio material*. Robert Hooke foi o primeiro a supor, em 1660, que a luz poderia ser uma perturbação que se propagava como *pulsos individuais*. Essa ideia foi desenvolvida por Christiaan Huygens, sob o escopo da filosofia mecânica cartesiana. Huygens – que baseou suas concepções em analogia com ondas na superfície da água – modificou a estrutura do éter cartesiano, passando a considerá-lo um fluido *compressível e elástico*, capaz de sustentar *ondas de pressão*. Isso implicava a finitude da velocidade da luz, em concordância com a intuição originária de Galileu e com a primeira medida experimental bem-sucedida, em 1676, devida ao astrônomo Ole Römer (1644 – 1710). Como base em sua teoria, Huygens conseguiu demonstrar que as vibrações mecânicas no éter

eram compatíveis com a propagação retilínea da luz e derivou as leis da reflexão e da refração. Fundamental para esses sucessos foi a criação do conceito de *frente de onda*, resultado de um procedimento geométrico de superposição que passou a ser conhecido como *princípio de Huygens-Fresnel*. Huygens chegou a esses resultados em 1678, mas só os publicou em 1690, no seu *Tratado da Luz*.

Embora promissora, a teoria ondulatória proposta por Huygens tinha deficiências. Surpreendentemente, ela não era capaz de explicar fenômenos de interferência. O motivo era que suas ondas não eram *periódicas*. Elas consistiam apenas de *pulsos* únicos, que trafegavam *individualmente*. Esse problema acabou impedindo que a teoria ondulatória se mostrasse como francamente superior ao modelo corpuscular newtoniano e, por isso, a maior parte dos cientistas do século XVIII aderiu à teoria corpuscular. Dentre eles, Laplace, que concebeu a luz em termos de um fluido imponderável: uma substância elástica, análoga ao fogo. Laplace usou essa ideia para explicar, com sucesso, o fenômeno de refração como resultado da atração que a matéria ordinária exercia sobre os corpúsculos de luz.

#### **4.2. A Rejeição dos Fluidos Imponderáveis: o Éter Luminífero como Sólido Elástico**

A rejeição dos fluidos imponderáveis teve início, principalmente, entre os físicos britânicos, e foi um dos mais significativos desenvolvimentos do primeiro quarto do século XIX. Nos estudos de eletroquímica, o químico Humphry Davy (1778 – 1829) abandonou o fluido elétrico, na esteira da invenção da pilha elétrica e da descoberta da eletrólise da água. Na teoria da luz, esse processo coube aos trabalhos independentes de Thomas Young (1773 – 1829) e Augustin Jean Fresnel (1788 – 1827).

Em 1801, no trabalho *Sobre a Teoria da Luz e das Cores*, Thomas Young propôs sua própria versão da teoria

ondulatória para explicar todos os fenômenos periódicos da luz, em particular os fenômenos de difração e interferência, sem as deficiências da teoria de Huygens. Young idealizou e realizou o famoso *experimento de dupla fenda*, demonstrando que interferência e difração eram exibidos tanto no caso da luz como em sistemas físicos materiais, tais como ondas na superfície da água. Sua analogia principal era, entretanto, com ondas sonoras. Por isso, ele pensou em ondas luminosas *longitudinais* propagando-se como pressão em um meio: o *éter luminífero*. Apesar desse sucesso, a descoberta da polarização por reflexão, por Etienne Malus (1775 – 1812), representou uma séria objeção à teoria de Young. E, em 1816, o físico experimental François Arago (1786 – 1853) demonstrou a ausência de interferência entre feixes de luz perpendicularmente polarizados. Esses problemas finalmente levaram Young a perceber que as vibrações do éter luminífero não podiam ser longitudinais. Elas deviam ser *transversais*.

Independentemente, na França, Fresnel, já por volta de 1814, começou a suspeitar que calor e luz pudessem ser ambos fenômenos ondulatórios em um éter material. Inicialmente similar à teoria de Young, a teoria desenvolvida por Fresnel, em 1821, foi bastante além. Ele foi capaz de perceber que um éter fluido não podia transmitir vibrações transversais. Para isso, o éter tinha que apresentar *rigidez* e, portanto, tinha que ser modelado como um *sólido elástico*. Dessa forma, ele foi capaz de descrever com sucesso todos os fenômenos periódicos da luz – refração, polarização e difração, usando, para esse último, o princípio de interferência. Sua teoria era matematicamente sofisticada e recebeu suporte experimental inequívoco por parte de Arago, o que contribuiu para a ulterior aceitação da visão ondulatória.

A partir de Fresnel até a época de Michael Faraday, as investigações se pautaram pelo duplo objetivo de desenvolver ainda mais as bases matemáticas para os princípios da ótica e de estabelecer as propriedades físicas e a estrutura

mecânica do éter luminífero. Em 1830, o matemático Augustin Louis Cauchy (1789 – 1857) já havia formulado várias versões de uma teoria matemática da luz baseada em hipóteses sobre a estrutura molecular de um sólido elástico. O elevado grau de especulação envolvida nessas hipóteses implicou sérias objeções. A despeito de sua elevada sofisticação matemática, o modelo mecânico proposto não era convincente. No mesmo período, outros matemáticos tentaram resolver o problema, evitando compromissos com modelos ou hipóteses sobre a estrutura molecular do éter. Em 1838, George Green (1793 – 1841) conseguiu, pela primeira vez, executar o programa de explicação dinamicista na ótica, derivando suas leis exclusivamente a partir dos princípios da mecânica analítica. As críticas surgiram, dessa vez, pelo lado oposto, pois muitos físicos recusavam-se a considerar a abordagem dinamicista como sendo uma verdadeira explicação mecânica.

Em 1839, James MacCullagh (1809 – 1847) executou o mesmo programa de Green, porém, procurando justificar as propriedades mecânicas que o éter luminífero deveria possuir para que ela fosse compatível com uma descrição dinamicista. Seu resultado foi notável, pois antecipava os resultados que Maxwell estabeleceria, em 1861. Ele descobriu que a elasticidade do éter não poderia ser proveniente nem de simples *distorção*, nem de simples *deformação*, mas apenas da *distorção angular* dos seus elementos moleculares. Embora alguns físicos, como Young e Fresnel, acreditassem na possibilidade de conexão entre luz, eletricidade e magnetismo, não havia, ainda, um indício suficientemente forte para sustentar essa crença. A descoberta de MacCullagh foi o primeiro desses indícios, sobretudo porque o caráter rotacional do magnetismo já tinha sido descoberto. Porém, sua descoberta ficou esquecida por longo tempo, porque houve dificuldades na aceitação de que um meio material pudesse sustentar esse tipo de estrutura. Essa objeção foi removida, por William Thomson, em 1847. A procura por uma solução

mecânica parece ter chegado ao paroxismo nas mãos do físico e matemático George Stokes (1819 – 1903). A hipótese de um sólido elástico trazia uma série de problemas. Um dos mais difíceis era explicar a aparente ausência de resistência no movimento dos planetas. Stokes elaborou um modelo mecânico análogo a um *coloide* – uma mistura de um fluido com uma pequena quantidade de matéria sólida. Essa mistura possuiria propriedades similares a de um fluido de baixa viscosidade, mas ainda seria capaz de transmitir vibrações transversais.

### **4.3. O Éter Elétrico e a Descoberta do Eletromagnetismo**

A pesquisa em eletricidade, no século XVIII, também esteve vinculada à escola laplaciana dos fluidos imponderáveis. Foi acreditando na existência de *fluidos elétricos* de duas qualidades, *positiva* e *negativa*, que Charles de Coulomb (1736 – 1806), no ensaio *Primeira Memória sobre a Eletricidade e o Magnetismo* (1785), obteve o primeiro sucesso na implementação do programa laplaciano, sob nítida inspiração newtoniana, descrevendo matematicamente e demonstrando experimentalmente a interação por forças de ação à distância. Até o início do século XIX, especulava-se sobre as possíveis conexões entre fluidos elétricos e magnéticos, mas, em geral, sob o peso da autoridade de Coulomb e dos laplacianos, eletricidade e magnetismo foram considerados fenômenos independentes.

Com a virada do século, o panorama geral começou a se transformar. Até a invenção da pilha elétrica (1800), por Alessandro Volta (1745 – 1827), não era possível sustentar correntes estacionárias que permitissem descobrir a interação entre os dois fenômenos. Em 1820, Hans Christian Oersted (1777 – 1851) inaugurou o *eletromagnetismo* ao descobrir a interação entre agulhas imantadas e correntes elétricas. Sua descoberta representou um choque para os físicos da época. A

*estrutura rotacional* exibida pela *ação magnética* desafiou os paradigmas de explicação baseados no esquema newtoniano de forças centrais. Outro aspecto de nota era sua evidente *distribuição espacial*, constituindo “*esferas de atividade*” de longo alcance, na terminologia de Oersted. Na França, a descoberta de Oersted foi introduzida pelas mãos dos físicos experimentais Auguste de la Rive (1801 – 1873) e François Arago. Apenas alguns meses depois dessas demonstrações, Jean-Baptiste Biot (1774 – 1862) e Felix Savart (1791 – 1841), operando dentro da visão laplaciana, estabeleceram experimentalmente a relação matemática que hoje leva os seus nomes. A construção da lei de interação entre corrente e magneto seguiu o esquema newtoniano de leis de forças de ação à distância que variassem com o inverso do quadrado e, coerentemente com a disposição positivista de Biot, eximiu-se de qualquer compromisso com hipóteses sobre estruturas moleculares.

A discussão em torno do problema do *pluralismo* versus *monismo* foi intensa durante a segunda metade do século XVIII e todo o século XIX. O trabalho de Oersted se inseria em uma corrente filosófica que se opunha ao materialismo e ao pluralismo de princípios materiais que caracterizavam a visão laplaciana. Por esse motivo, ele realmente esperava encontrar uma conexão entre eletricidade e magnetismo. Denominada de *Naturphilosophie*, essa corrente filosófica enfatizava as noções de *atividade* e de *unidade* da natureza. A partir da crença em *poderes imateriais* imanentes, interpretava todos os fenômenos da natureza como provenientes de um *princípio físico/metafísico unificado*. A descoberta de Oersted representou um primeiro deslocamento da prioridade ontológica da categoria de *matéria* para a categoria de *força*. Ela contribuiu para que a noção puramente mecânica de *éter elétrico* começasse a adquirir conotações associadas com a noção de “*esfera de atividade*”, apontando para a desmaterialização do éter e para sua transformação em uma nova entidade, um *campo de ações distribuídas pelo espaço*. Mais do que isso, entretanto, a noção de

*unidade fundamental da natureza e de conversão mútua dos poderes ativos* pavimentou o caminho para a descoberta do *princípio de conservação da energia*.

A partir da descoberta de Oersted, os desenvolvimentos subsequentes foram rápidos. No mesmo ano de 1820, André Marie Ampère (1775 – 1836) levou o estado do eletromagnetismo a um patamar substancialmente distinto, ao descobrir e descrever matematicamente o fenômeno *eletrodinâmico de interação entre correntes*. O cerne do trabalho de Ampère consistiu na compreensão mais simples e unificada das interações entre magnetos e entre correntes e magnetos. Primeiramente, ele percebeu, na existência de polos norte e sul, a analogia entre *corrente fechadas* e magnetos. Nessas condições, o modo mais simples de estabelecer a identidade entre os dois fenômenos – como expressão da mesma realidade física – era supor que *magnetos eram materiais circundados por correntes elétricas*. Assim, *a redução do magnetismo estava realizada*. Esse resultado espetacular pode ser considerado a primeira de uma série de unificações que tiveram lugar, ao longo do século XIX. Objetos magnetizados passaram a ser interpretados como constituídos por *correntes elétricas moleculares*, artifício com o qual a indivisibilidade dos polos magnéticos era não apenas preservada, mas explicada. Nessas condições, tornava-se evidente a existência de interação entre correntes elétricas (fechadas) e Ampère elaborou experimentos para demonstrá-la. Na sequência, Ampère estendeu, matematica e experimentalmente, sua demonstração para *elementos (infinitesimais) de corrente*. Seu trabalho – *Memória sobre a Teoria Matemática dos Fenômenos Eletrodinâmicos* – foi publicado em 1827. Com todo o rigor de um newtoniano, ele formulou uma *lei de força central*, que satisfazia a terceira lei de Newton e era descrita exclusivamente em termos de *ação à distância*. Por detrás de sua ênfase no fato de que sua teoria não se comprometia com modelos hipotéticos sobre a natureza das correntes ou das forças envolvidas, havia, pelo

menos parcialmente, objetivos estratégicos. A verdade é que Ampère era um opositor da visão laplaciana. Na França, seu único suporte vinha de Fresnel e de Arago. Laplace e Biot se opunham frontalmente a Ampère e um dos motivos alegados era que ele estava ressuscitando os vórtices cartesianos. Para manter a separação entre magnetismo e eletricidade, os laplacianos imputaram a interação eletrodinâmica a um efeito de magnetização transitória dos condutores, causado pela passagem da corrente.

Apesar dessas objeções, a partir de Ampère, as teorias matemáticas de ação à distância passaram a ter proeminência na física continental. Em um ambiente científico distinto, a Inglaterra, a predileção pelos modelos mecânicos e um forte espírito empiricista foram motores para a descoberta de outros fenômenos eletromagnéticos que conduziram à criação do novo conceito de campo.

#### **4.4. A Origem do Conceito de Campo**

No ano da descoberta de Oersted, Humphry Davy realizou uma série de experimentos em eletromagnetismo que acabaram por interessar ao seu assistente, Michael Faraday (1791 – 1867). Faraday decidiu refazer todos os experimentos até então conhecidos e, graças a um estilo de investigação mais prospectivo do que demonstrativo, foi capaz de descobrir um fenômeno diferente: a *rotação eletromagnética*. Ela consiste na rotação do polo de um magneto em torno de uma extremidade condutora com corrente (e vice-versa). Nesse experimento, pela primeira vez, a eletricidade foi convertida em trabalho mecânico. A rotação eletromagnética podia ser explicada em termos puramente amperianos. Porém, Faraday se recusava a basear sua explicação em correntes elétricas invisíveis. Também não consentia com o uso de fluidos magnéticos. Por isso, acabou engendrando uma visão própria. Diferentemente de Ampère, ele tentou reduzir todos os fenômenos magnéticos e eletrodinâmicos à ação de *centros de força*:



os polos magnéticos. Os polos de Faraday podiam ser gerados por quaisquer configurações – magnetos, solenoides e, até mesmo, *fios retilíneos*. A partir dos polos emanavam, no espaço circunvizinho, as forças de atração ou de repulsão.

Baseado nessas ideias, em 1825, ele tentou descobrir se a simples presença de uma *ação magnética* era capaz de gerar correntes elétricas. Muitos acreditavam que alguma ação desse tipo deveria acontecer, em virtude de uma presumida simetria ou reciprocidade de situações. Mas a descoberta da *indução eletromagnética* aconteceu apenas em 1831. Faraday obteve sucesso quando percebeu que a passagem de uma corrente elétrica por um fio enrolado (circuito primário) em um anel metálico induzia uma *corrente elétrica transiente* em um outro fio enrolado (circuito secundário), no mesmo anel, *no momento em que o circuito primário era ligado*. De modo ainda mais intrigante, ele observou que uma corrente elétrica transiente de sentido *oposto* era induzida no circuito secundário no momento em que o circuito primário era *desligado*. (Posteriormente, ele descobriu que a indução ocorria também a partir do *movimento relativo* entre magnetos e circuitos e que isso estava relacionado à *variação na densidade de linhas de força magnética* que atravessavam o circuito. Essas ideias se consubstanciaram na chamada *lei de Faraday*.)

A própria situação experimental sugeria uma explicação *continuísta*, por ação transmitida, ponto a ponto, no espaço. Ele imaginou que a passagem da corrente elétrica no circuito primário induzia um estado de “tensão elétrica” nas partículas do anel metálico – um *estado eletrotônico* –, cujo aumento ou diminuição induzia corrente no circuito secundário. Faraday concebeu o estado eletrotônico como *polarização elétrica das moléculas da matéria*. Para articular a noção de polarização com a noção de transmissão da força elétrica, ele empregou, pela primeira vez, uma das suas ideias mais geniais, as *linhas de força*. Inicialmente, elas eram apenas uma

representação espacial dos alinhamentos das partículas polarizadas.

A partir desse ponto, Faraday se voltou para o modo como a força elétrica era transmitida através do espaço. Ele percebeu que a mera contiguidade das moléculas polarizadas do “*meio dielétrico*” não era suficiente, pois a ação de uma molécula sobre a molécula vizinha não ficava elucidada. Isso exigiu uma mudança de perspectiva. Em 1844, ele concluiu que a teoria molecular era insustentável e propôs uma solução radical: conceber a *própria matéria como um continuum de forças*. Esse passo espetacular representou o *marco inaugural do conceito de campo* e, com isso, a segunda tentativa de realizar o deslocamento metafísico que retirava a prioridade ontológica da matéria, transferindo-a para a força. Embora efetuado apenas em termos qualitativos, esse passo era uma enorme antecipação teórica daquilo que somente ao final do século XIX seria plenamente possível: a superação da visão mecanicista. Em um trabalho de 1846, Faraday utilizou sua nova concepção de matéria para explicar a propagação da ação elétrica através das *vibrações das linhas de força*. Essa ideia já havia sido estendida, em 1845, para as linhas de força magnéticas, no contexto de suas descobertas do *diamagnetismo* e do *efeito magneto-ótico*: o fenômeno de rotação do plano de polarização da luz, pela aplicação de um campo magnético alinhado com a sua direção de propagação. Essa última descoberta representou a primeira evidência experimental de que luz, eletricidade e magnetismo estavam mutuamente relacionados e que podiam ser, eventualmente, unificados.

### **Os Legados de Ampère e Faraday**

A descoberta da indução eletromagnética levou a ciência do eletromagnetismo a apenas um passo de sua construção completa. A eletrostática e a magnetostática, de Coulomb e Poisson, e a eletrodinâmica, de Ampère e Faraday, sintetizavam o estado da arte dos fenômenos elétricos e magnéticos,

na época em que James Clerk Maxwell (1831 – 1879) debruçou-se sobre o problema.

Os legados de Ampère e Faraday foram desenvolvidos de diferentes formas, em diferentes contextos científicos e diferentes lugares. No contexto da ciência continental (França e Alemanha), as descobertas experimentais de Faraday não foram compreendidas em toda a sua coerência e profundidade teóricas. O estilo experimental de Faraday implicava uma crença epistemológica diversa da de Ampère. Faraday viu, no empirismo, uma atitude mais sólida e eficiente para descobrir e compreender a racionalidade e a unidade fundamental dos fenômenos. Por isso, seus experimentos eram flexivelmente desenhados no sentido da prospecção do fato desconhecido, evitando compromissos espúrios com hipóteses teóricas, como por exemplo, a natureza da corrente elétrica. Por outro lado, Ampère via, na construção de um sistema matemático, o fato epistemológico básico, e seu racionalismo implicava uma atitude experimental mais rígida e voltada para a demonstração, não para a prospecção, mantendo o mundo empírico fortemente controlado pelos seus princípios teóricos, unicamente a partir dos quais a unificação da natureza poderia ser alcançada.

Esse estilo foi o adotado no continente, saldado como uma encarnação do espírito positivista newtoniano – comprometido com a eliminação de conteúdos metafísicos e vagos – que resistiu à derrocada do programa laplaciano. A evolução da física-matemática, no continente, fomentou o programa de redução da física a formulações matemáticas (pretensamente) deduzidas apenas de experimentos. Em consonância, surgiram progressivas preocupações por evitar hipóteses sobre a constituição molecular e por evitar modelos mecânicos, optando-se pela categoria de explicação dinamicista. Essas características conduziram a um programa de pesquisa em eletrodinâmica que fez prosperar as teorias de ação à distância – com Carl Friedrich Gauss (1777 – 1855), Franz

Neumann (1798 –1895), Wilhelm Weber (1804 –1891), Gustav Kirchhoff (1824 – 1887) e Hermann von Helmholtz (1821 – 1894) –, *a despeito de Ampère não ser um positivista e não estar comprometido com teorias de ação à distância.*

Na Inglaterra, o estudo da eletrodinâmica tomou rumos bastante diversos. A teoria de campo baseada em linhas de força inspirou dois dos mais brilhantes admiradores e sucessores de Faraday, William Thomson e James Clerk Maxwell, a prover sua descrição matemática. A teoria de campo suplantou as teorias de ação à distância quando a mais espetacular previsão de Maxwell, as *ondas eletromagnéticas*, foram finalmente detectadas. Essa seria a segunda vez que os físicos britânicos superariam os físicos do continente, ironicamente, revertendo ao pensamento continuísta que, cerca de um século e meio antes, Newton tinha varrido do mapa da Europa. Curiosamente, nem Thomson, nem Maxwell aceitavam as conseqüências mais radicais da visão de Faraday. Eles tentaram construir *modelos mecânicos* para o éter elétrico com o objetivo de reconduzir o conceito de linhas de força ao seio da visão mecanicista e materialista.

#### **4.5. Do Éter Mecânico ao Campo Eletromagnético: a Síntese Maxwelliana**

Thomson obteve o primeiro sucesso na tarefa de estruturar matematicamente as ideias de Faraday, tratando o problema da transmissão da ação elétrica através de um meio contínuo. Ele inspirou-se diretamente no trabalho de Fourier para explorar a *analogia matemática* existente entre o fluxo de calor e o “fluxo de força elétrica”, demonstrando, em 1843, a equivalência matemática entre as linhas de força, em alguns problemas eletrostáticos, e as linhas de fluxo de calor, em um sólido elástico infinito. Inicialmente, Thomson se opôs a conferir realidade física às suas analogias matemáticas. Porém, a partir de 1846, seguindo ainda na direção de estruturar as intuições de Faraday, ele começou a enveredar

pelo caminho das hipóteses que, no fim, o levaria a mudar de ideia. Em 1856, referindo-se a uma “ilustração dinâmica”, ele argumentou em favor de uma explicação para o efeito magneto-ótico como resultado da ação *mecânica* de um *fluido etéreo* em movimento de *vórtice*. Essa foi a origem do que se tornou, em 1858, a doutrina do *Plenum Universal*, em que abandonou o modelo de sólido elástico e passou a conceber o éter como um *fluido*. Sua conversão aos modos de pensamento unificados de Faraday foi ainda mais profunda. Mesmo sem abandonar a materialidade do éter, ele passou a conceber a própria *matéria* como sendo constituída por *vórtices de éter*.

A influência de Faraday e Thomson sobre Maxwell foi imensa. Seu trabalho constituiu a tentativa mais sistemática e bem-sucedida de cumprir o programa de estruturar matematicamente a teoria de campo. O primeiro trabalho nessa direção foi *Sobre as Linhas de Força de Faraday* (1856), no qual ele interpretou as linhas de força como uma representação geométrica de um *fluxo*, empregando uma analogia com a mecânica dos fluidos. Nesse modelo geométrico-analógico, as linhas de força de um campo *eletrostático* forneciam as *direções* das forças sustentadas pelo campo, enquanto as superfícies normais, em cada ponto, a essas linhas representavam as superfícies equipotenciais. As linhas de força eram interpretadas como *tubos* que atravessavam as sucessivas superfícies equipotenciais e a largura de cada tubo variava na razão inversa da intensidade da força. Uma maior concentração de linhas de força correspondia a uma maior intensidade da força elétrica, do mesmo modo que, em um fluido incompressível, elas correspondiam à uma maior velocidade de escoamento. As superfícies equipotenciais eram análogas a superfícies de pressão constante. Diferenças de pressão, no fluido, foram interpretadas como diferenças de potencial elétrico e as cargas elétricas, como fontes e sorvedouros. Ele prosseguiu na construção da primeira representação matemática da indução eletromagnética. A força eletromotriz induzida em um

circuito fechado era igual à variação do *número de tubos que o atravessavam*. Aqui, porém, surgiu uma dificuldade, pois lhe pareceu fisicamente ininteligível que uma indução de corrente *no circuito* dependesse da variação do número de linhas de campo que passavam *através* do circuito. Isso requeria uma compreensão da natureza do *estado eletrotônico* do condutor. Maxwell imaginou que a força eletromotriz deveria ser oriunda da variação de *intensidade* desse estado. Assim, ele inventou o conceito de *potencial vetor* – a intensidade do estado eletrotônico – e, a partir daí, explicou a corrente elétrica induzida como resultado de um campo elétrico induzido pela variação temporal da intensidade do estado eletrotônico. O entendimento completo da natureza desse estado, contudo, ainda lhe escapava.

Embora defensor de uma visão geométrica e intuitiva dos fenômenos físicos, Maxwell jamais aceitou a interpretação não mecânica de Faraday. Por isso, no trabalho seguinte – *Sobre as Linhas de Força Físicas* (1861–1862) –, ele passou da abordagem puramente geométrica para o tratamento físico, ou seja, mecânico, do campo, adotando duas ideias já previamente utilizadas por Thomson. Primeiro, ele assumiu que a estrutura do éter material devia sustentar o campo de forças de modo análogo ao campo de tensões em um sólido elástico. Segundo, ele acoplou, a esse modelo, os vórtices de fluidos. Com isso, Maxwell foi capaz de elaborar uma teoria completa, sistemática e inteligível da transmissão local das forças elétricas e magnéticas e, a partir dele, realizou uma das mais espetaculares unificações da física do século XIX ao, finalmente, demonstrar matematicamente que *a luz poderia ser uma onda eletromagnética*. No seu modelo, as *linhas de força magnéticas adquiriram realidade física, a partir de sua interpretação como eixos de vórtices moleculares* imersos em um *meio elástico de natureza elétrica* – ou seja, um *meio eletromagnético*. Os próprios campos magnéticos eram filamentos de vórtice em um fluido elástico. No caso de uma corrente elétrica estacionária em um fio

condutor, os filamentos de vórtice apareciam configurados, geometricamente, como círculos concêntricos, ao redor do fio. As velocidades angulares dos vórtices forneciam a intensidade do campo magnético. A estrutura do éter tinha que explicar, contudo, a origem e a transmissão do movimento de rotação dos vórtices magnéticos. Elas foram atribuídas à existência de um mecanismo de “rolamentos” que garantiam, entre outras coisas, que todos os vórtices girassem sempre no mesmo sentido. Portanto, a estrutura do éter deveria ser tal que, entre cada par de camadas de filamentos de vórtice, existisse uma camada de *partículas* – elementos da estrutura do meio elástico – que giravam, em contato direto, garantindo a transmissão do movimento entre os vórtices. Esse movimento propagava-se, ponto a ponto, ao longo do meio *eletromagnético*, tornando inteligível, do ponto de vista mecânico, a produção de um campo magnetostático.

Para explicar a indução eletromagnética, nesses termos, Maxwell imaginou que, a partir do instante inicial em que uma corrente elétrica fosse produzida, em um fio condutor, a camada de vórtices imediatamente contígua ao fio sofreria uma aceleração rotacional. A transmissão do movimento para a camada contígua seguinte, formada por partículas de éter, era acompanhada de um impulso, cujo efeito era um *deslocamento lateral* dessas partículas na direção contrária ao movimento da corrente e *perpendicular às linhas de campo magnéticas*. Foi esse deslocamento perpendicular inicial que Maxwell utilizou para explicar a existência de *campos elétricos induzidos*. Para isso, ele imaginou que as partículas do éter eram *partículas eletricamente carregadas*. O *deslocamento elétrico* dessas partículas mantinha-se até o momento em que ocorresse a estabilização da corrente elétrica. Todo o processo mecânico tornava-se compatível com os fenômenos eletromagnéticos envolvidos. Eletrodinamicamente, o aumento da velocidade de rotação dos vórtices estava associado com o aumento da intensidade do campo magnético e, portanto,

com o aumento do seu fluxo através das seções transversais dos vórtices. Mecanicamente, contudo, o aumento da velocidade de rotação dos vórtices implicava o surgimento de uma força, que atuava sobre as partículas elétricas, produzindo o seu deslocamento perpendicular. Essa era, portanto, a explicação puramente mecânica da origem do campo elétrico circuintal induzido – ao redor das linhas de campo magnéticas, e no sentido compatível com a *lei de Lenz*. Desse modo, a explicação mecânica operava uma redução completa dos fenômenos e dos conceitos eletromagnéticos.

A rigidez do éter implicava um deslocamento lateral limitado, pois as forças elásticas exercidas pela estrutura tendiam a restaurar as posições de equilíbrio das partículas elétricas. A esse deslocamento elétrico das partículas do éter foi associada uma corrente elétrica *transiente: a corrente de deslocamento*. Modelando a elasticidade de acordo com a lei de Hooke, o deslocamento das partículas era proporcional à força elétrica. Portanto, a velocidade associada ao deslocamento devia ser proporcional à *derivada da força* e, daí, à *derivada temporal do campo elétrico*. Como uma corrente era definida como velocidade de movimento de cargas, Maxwell concluiu que o rotacional do campo magnético deveria ser produzido não apenas pela corrente já postulada pela lei de Ampère, mas também por essa nova *corrente de deslocamento*. Após o estabelecimento da corrente estacionária, a corrente de deslocamento desaparecia, deixando, como único efeito, um campo magnético constante, constituído pelos vórtices moleculares estacionários. A explicação mecânica para a lei de indução de Faraday era, agora, possível. Cada variação temporal na corrente elétrica produzida em um circuito primário induzia uma perturbação ao longo da estrutura dos vórtices magnéticos que se propagava pelo meio até alcançar o circuito secundário, produzindo uma corrente. Essa explicação reduzia o fenômeno de indução a um fenômeno local, transmitido ponto a ponto através da estrutura do



éter. Quanto aos campos eletrostáticos, Maxwell passou a concebê-los em exata analogia com o fenômeno de *polarização* de um meio dielétrico, como imaginado por Faraday, ou seja, como uma tensão, produzida no meio elástico constituído pelas partículas elétricas do éter, devido ao seu deslocamento com relação às suas posições de equilíbrio. Por fim, Maxwell mostrou que esse modelo explicava mecanicamente como um conjunto de campos elétricos e magnéticos perpendiculares e mutuamente induzidos se propagavam como *pulsos transversais* – uma vez que uma corrente elétrica variável fosse estabelecida – cuja *direção de propagação era perpendicular aos dois campos*. Disso, evidentemente, se seguia que *uma variação periódica da corrente elétrica em um fio condutor deveria produzir uma onda eletromagnética*, que se propagaria pela estrutura do éter com uma velocidade que poderia ser *calculada*.

A conexão com a ótica surgiu naturalmente, pois Maxwell já sabia que a teoria ondulatória da luz requeria que o *éter luminífero* fosse um sólido elástico, para permitir a existência de ondas transversais. *Ao calcular a velocidade de propagação das suas ondas eletromagnéticas, ele constatou que ela era, dentro de uma margem ínfima de erro, compatível com o valor da velocidade da luz* – cuja medida, à época, já apresentava excelente precisão. É importante observar que a grande descoberta de Maxwell – a *corrente de deslocamento* – não surgiu, originalmente, de considerações de consistência matemática, mas de uma consequência do seu modelo mecânico e de seu compromisso *ontológico* com a existência de um éter.

Apesar das estupendas conquistas realizadas com o auxílio de suas hipóteses sobre a estrutura do éter, no trabalho seguinte, *Uma Teoria Dinâmica do Campo Eletromagnético* (1865), Maxwell assumiu uma perspectiva completamente diferente. Ele passou a apresentar apenas as expressões matemáticas que descreviam o comportamento do campo, abrindo mão de quaisquer modelos mecânicos. Os novos métodos escolhidos por Maxwell foram aqueles da dinâmica

analítica de Lagrange. Maxwell não abandonou a ideia de que o éter possuía uma estrutura mecânica. O que ele abandonou foi a tentativa de construir *modelos*. Primeiramente, porque ele pensava haver certo risco de que modelos hipotéticos viessem a ser confundidos com a realidade física, principalmente no caso de serem bem-sucedidos. Portanto, Maxwell jamais acreditou que o seu modelo mecânico pudesse ser qualquer coisa além de uma representação intelectual, destinada a prover a inteligibilidade de fenômenos que, de outra forma, permaneceriam misteriosos. Em segundo lugar, porque lhe era evidente que havia uma virtual possibilidade de se conceber uma infinidade de modelos mecânicos distintos, todos eles compatíveis com a mesma descrição matemática dos fenômenos eletromagnéticos. Sua nova postura dinamicista lhe permitiu realizar uma mudança de prioridade conceitual da maior importância. Explicitamente, ele passou a enfatizar que a natureza essencial do campo eletromagnético estava associada à sua função como *repositório de energia mecânica*. Esse deslocamento conceitual, associado ao declínio do conceito de força, já estava em curso antes do advento da teoria dinâmica do campo eletromagnético, pois o princípio de conservação da energia já tinha sido estabelecido, na década de 1840. A parte *cinética* da energia foi associada com o *movimento* do éter e das cargas elétricas, de modo que foi identificada com a *energia do campo magnético*. Por outro lado, a parte *potencial*, armazenada nas tensões das conexões da estrutura do éter, foi identificada com a *energia do campo elétrico*. A propagação de ondas eletromagnéticas podia, desse modo, passar a ser interpretada como um processo de transformações e conversões mútuas de energias no interior da estrutura do éter mecânico – ou melhor, *dinâmico*.

### **Os Legados de Thomson e Maxwell**

A eletrodinâmica de Maxwell foi compilada em sua obra *Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo* (1873). Nela, constam

todos os elementos da *síntese maxwelliana*: a unificação da ótica com o eletromagnetismo, subsumidos aos conceitos de campo e de energia. A despeito de sua fundamentação dinamicista e energeticista, a maior parte dos físicos que sucederam a Thomson e Maxwell não abandonaram os modelos mecânicos de inteligibilidade. Um aspecto difícil continuava sendo as relações entre ótica e eletromagnetismo, pois Maxwell tinha deixado praticamente intocados os problemas relacionados com refração e meios refringentes, com dispersão e, em particular, com o efeito magneto-ótico. Nesses assuntos, havia uma tensão permanente entre as duas perspectivas de unificação: a que reduzia a teoria ondulatória da luz ao eletromagnetismo – por meio de modelos mecânicos de sólido elástico – e a que explicava o efeito magneto-ótico pela ação do campo magnético – cujo modelo mecânico requeria vórtices em fluidos.

No continente, a aceitação da teoria de Maxwell não foi imediata. Neumann, Kirchhoff, Weber e Helmholtz tinham desenvolvido suas próprias versões da eletrodinâmica, baseadas na ideia de ação à distância, e gozavam de muito prestígio. Porém, a atitude de Helmholtz com relação à abordagem de Maxwell era francamente mais positiva. Ele formulou a sua própria versão de uma eletrodinâmica baseada em forças instantâneas de ação à distância, demonstrando que uma equação de onda para a propagação da luz não era exclusiva da teoria maxwelliana. Apesar disso, a abordagem de Helmholtz permitiu a introdução e a compreensão das teorias de campo, no continente. Foi sob seu estímulo que a detecção experimental das ondas eletromagnéticas foi realizada por um pupilo seu, Rudolf Hertz (1857 – 1894), em 1888. Curiosamente, essa detecção foi saudada como a confirmação da teoria de Maxwell, muito embora o experimento não pudesse fazer distinção entre teorias de campo e teorias de ação à distância. Presumivelmente, o motivo era o fato de que o próprio Hertz já havia se convertido à eletrodinâmica

maxwelliana. A crença generalizada na existência de um éter mecânico não foi abandonada até o início do século XX. As sucessivas e infrutíferas tentativas de tentar detectá-lo pavimentaram um dos caminhos que conduziram ao advento da relatividade especial.

#### **4.6. A Relatividade Especial e a Superação da Visão de Mundo Mecanicista**

A teoria da relatividade especial de Albert Einstein (1879 – 1955) surgiu, em 1905, como a solução mais econômica para o problema da *eletrodinâmica dos corpos em movimento*. Parte disso se deveu a uma mudança conceitual profunda do entendimento das categorias de espaço e de tempo. Desde Newton, a maioria dos físicos ainda concebia espaço e tempo do modo como apareciam nos *Principia*. Na década de 1880, Ludwig Lange (1863 – 1936) inaugurou uma série de tentativas de eliminar a noção de espaço absoluto e prover uma base exclusivamente operacional para a física. Ele formalizou a noção de *sistema de referência inercial*, definindo-o como o *sistema de referência no qual as leis de Newton são válidas*. Com isso, a antiga noção de *relatividade galileana* – a ideia de que o estado de movimento inercial de um corpo com relação ao espaço absoluto não poderia ser jamais conhecido – passava à categoria de um *princípio*, segundo o qual *as leis da mecânica deviam ser invariantes por transformações entre sistemas inerciais*. Do ponto de vista empírico, a existência do espaço absoluto era irrelevante, pois a física podia ser completamente descrita a partir de *espaços relativos*. Embora essas formalizações não representassem avanços do ponto de vista do conteúdo empírico das leis da mecânica, elas constituíram avanços no sentido de sua *reinterpretação* em níveis mais fundamentais, chamando progressivamente a atenção para a *origem da validade das leis*. No século XX, essa origem se tornou explícita e foi elevada à categoria do *princípio* máximo que passou a guiar

as descobertas no âmbito de uma teoria unificada da natureza. Esse princípio se chama *simetria*.

Retornando à história da eletrodinâmica, Maxwell também negava qualquer sentido físico na noção de espaço absoluto. Porém, a sua teoria eletrodinâmica implicava uma consequência desconcertante. Dado que a luz era uma onda que se propagava em um éter *material*, era evidente que havia pelo menos um sistema de referência universal que supria parte das funções reservadas ao espaço absoluto: aquele no qual o próprio éter estaria em repouso. Em particular, a *velocidade da luz* dependia exclusivamente das propriedades *mecânicas* do éter. Desse modo, seu valor medido com relação ao referencial do éter estacionário era privilegiado. Esse fato implicou, progressivamente, uma tensão entre as leis da mecânica e as leis da ótica, já que estas pareciam ser estritamente *dependentes* de um sistema de referência específico. Ou seja, presumivelmente, *as leis da ótica não satisfariam ao princípio de relatividade*. Por um lado, era claro que esse problema poderia ser considerado espúrio. Afinal, outros tipos de onda que se propagavam em meios materiais – a exemplo do som – eram análogos à luz, nesse sentido. Assim como no caso das ondas sonoras – com relação ao qual se pode realizar experimentos que denunciam o estado de movimento do observador com relação ao meio material –, era evidente que experimentos realizados, digamos, no *sistema de referência da Terra*, seriam suficientes para determinar o estado de movimento de observadores terrestres com relação ao éter. Não tardou para que esse problema se tornasse um quebra-cabeça cuja solução conduziria ao advento da relatividade especial. Esse quebra-cabeça esteve intimamente associado com a história das medidas do valor da velocidade da luz.

Em 1725, o astrônomo James Bradley (1692 – 1762) descobriu o fenômeno da *aberração da luz* – o efeito que o movimento da Terra com relação à luz emitida pelas estrelas promovia nas suas posições celestes aparentes. No século

XIX, Arago se questionou sobre os efeitos que o movimento da Terra com relação ao éter produziria na refração da luz proveniente das estrelas, na suposição de que *diferentes estados de movimento correspondiam a diferentes valores para a sua velocidade relativa*. Evidentemente, isso deveria implicar diferentes desvios, em um mesmo meio refringente. O resultado do experimento que Arago realizou, em 1809, é da maior importância, pois *nenhuma diferença foi detectada*. Por outro lado, quando Fresnel propôs a sua hipótese do éter luminífero, ainda havia vários problemas que demandavam solução. Primeiramente, a exigência de que os movimentos dos corpos celestes não fossem perturbados pela presença do éter. Em segundo lugar, era necessário que sua teoria ondulatória fosse compatível com o fenômeno de aberração. Em terceiro lugar, era necessário explicar por que a velocidade da luz variava em meios refringentes (transparentes). Em quarto lugar, era necessário explicar o resultado negativo do experimento de Arago. Atacando os dois primeiros problemas, ele pensou ser necessário assumir que os corpos materiais comuns passavam através do éter estacionário sem arrastá-lo. Porém, para explicar os dois últimos, ele teve que elaborar uma sofisticada teoria de *arraste parcial* do éter pelos meios *transparentes*. Segundo essa teoria, a *densidade do éter*, no interior desses meios, era maior. Além disso, os meios transparentes eram capazes de arrastar consigo o *excesso* de éter que eles continham. Havia, contudo, quem discordasse da hipótese de que o éter fosse permeável à passagem de corpos opacos. Para Stokes, embora a Terra, em escala astronômica, se movesse sem ser muito perturbada pela sua presença, ela promovia um *arraste total* do éter, em sua superfície. O arraste total também explicava o resultado negativo do experimento de Arago e o fenômeno de aberração. Com base na concordância entre as previsões de sua própria teoria e a de Fresnel e nos resultados nulos – ou controversos – dos experimentos realizados a partir de então – por Jean Foucault (1819 – 1869), Armand

Fizeau (1819 – 1896) e Éleuthère Mascart (1837 – 1908), entre outros –, Stokes e outros físicos teóricos e experimentais acabaram se convencendo da validade do *princípio de relatividade para a ótica*. Assim, aparentemente, era um fato empírico que nenhum experimento seria capaz de estabelecer o estado de movimento de um observador com relação ao éter.

Essa situação era causa de muita perplexidade. A teoria ondulatória da luz, formulada no contexto do modelo *mecânico* de éter eletromagnético, implicava que o princípio de relatividade galileano para a ótica deveria ser *inválido*. Entretanto, todos os experimentos indicavam o contrário. De entremeio, as teorias de interação entre o éter mecânico e a matéria ordinária pareciam cada vez mais com teorias *ad hoc*. A atitude assumida pelos físicos, em geral, foi de descrença com relação ao caráter definitivo dos resultados dos experimentos. Desconfiava-se de que outros fenômenos óticos ainda não investigados pudessem escapar do resultado negativo e restabelecer a compatibilidade com a teoria ondulatória. Maxwell foi um deles. Porém, para tornar a situação ainda mais complicada, se, por fim, essa compatibilidade fosse restaurada – sobretudo no nível experimental – parecia abrir-se um fosso intransponível entre as leis do eletromagnetismo e as da mecânica. Esse era o espírito geral que vigia na década de 1880, quando, pelas mãos de físicos experimentais, como Albert Michelson (1852 – 1931) e Edward Morley (1838 – 1923), e de físicos teóricos, como George FitzGerald (1857 – 1901), Joseph Larmor (1857 – 1942), Emil Wiechert (1861 – 1928), Rudolf Hertz, Jules Poincaré (1854 – 1912) e, principalmente, Hendrik Lorentz (1853 – 1928), a solução do problema foi obtida.

Seguindo uma sugestão de Maxwell de que o movimento com relação ao éter poderia ser detectado pela medida da variação da velocidade da luz que se propagava em direções opostas, em um referencial fixado na Terra, Michelson formulou e executou, em 1881, o seu famoso experimento de

*interferometria*, cuja ideia de funcionamento era similar à já utilizada por Fizeau, em suas experiências envolvendo arraste parcial do éter. O que Michelson esperava encontrar era uma confirmação da hipótese do éter estacionário, de Fresnel. Contudo, os resultados foram, novamente, *negativos*: nenhum movimento da Terra em relação ao éter foi detectado, o que levou Michelson a se pronunciar contra a teoria de Fresnel e a favor da teoria de Stokes. Em 1886, Lorentz criticou a correção dos cálculos realizados por Michelson, o que levou este a realizar novos experimentos, em associação com Morley, mas o resultado do experimento com o interferômetro continuava negativo. Sua conclusão foi, portanto, que, *dentro do grau de precisão alcançado*, a teoria de Fresnel deveria ser refutada. O paradoxo parecia não ter solução à vista.

Em 1889, FitzGerald notou algo bastante interessante. Ele sabia que Oliver Heaviside (1850 – 1925) já havia demonstrado que, se uma esfera carregada se movesse com velocidade  $v$ , seu *campo elétrico* deveria apresentar uma *compressão*, na direção perpendicular ao movimento da esfera, proporcionalmente ao fator  $\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$ . Baseado nesse resultado, FitzGerald propôs uma arrojada hipótese para explicar o resultado nulo dos experimentos de Michelson e Morley. Se fosse verdade que, em nível molecular, todas as forças de ligação química se comportassem como o campo elétrico, então, corpos em movimento com relação ao éter deveriam apresentar uma *compressão física*, na direção do movimento. Essa hipótese foi encampada por Lorentz, em sua *teoria dos elétrons*, que, juntamente com as correções de Poincaré, representou o estado da arte da eletrodinâmica do século XIX.

### **A Descoberta do *Princípio de Relatividade***

Como defensor da hipótese atomística, Hendrik Lorentz estava preparado para elevar a teoria de Maxwell a um novo patamar. Ele levou seriamente em conta as perspectivas microscópicas de Weber e Helmholtz, assumiu a hipótese do éter estacionário de Fresnel, mas acrescentou a



hipótese da total independência entre éter e matéria ordinária, de modo que o éter não podia ser arrastado de forma alguma. Lorentz construiu toda a sua eletrodinâmica em torno da concepção weberiana de “partículas de eletricidade”: os *élétrons*. A ideia essencial da teoria de Lorentz era estender a explicação dos fenômenos eletromagnéticos para a *escala microscópica*, de modo que a eletrodinâmica em escala macroscópica fosse reobtida por meio de valores médios. Com isso, Lorentz solucionou o problema da eletrodinâmica dos corpos em movimento e, pela primeira vez, obteve matematicamente os coeficientes numéricos equivalentes ao arraste da teoria de Fresnel. Para realizar essa façanha, Lorentz – ainda não completamente consciente da simetria espaço-temporal implícita nas equações de Maxwell – empregou um procedimento puramente técnico, que consistia de duas partes. Primeiramente, uma transformação galileana para descrever as equações de campo no referencial em movimento inercial. Isso mudava a *forma* dessas equações. Em segundo lugar, impor *outra transformação nas coordenadas de espaço e de tempo* do referencial em movimento, para fazer com que *as equações de campo retornassem à sua forma original*. Isso implicava que as soluções para as equações de campo que valessem no referencial estacionário deveriam valer também para o referencial em movimento. As novas variáveis espaço-temporais foram interpretadas como um mero expediente, o que significa que nenhuma reinterpretação das categorias de espaço e de tempo estava envolvida. Foi Poincaré quem primeiro notou que o procedimento de Lorentz revelava a *invariância das equações de Maxwell* por um certo grupo de transformações – o *grupo de Lorentz*. Quando Lorentz aplicou essas ideias para tratar a *eletrostática* de corpos em movimento, ele descobriu que a *hipótese de contração física* de FitzGerald podia ser facilmente explicada se as forças moleculares se comportassem exatamente como forças eletrostáticas. Isso permitiu explicar os resultados dos experimentos de Michelson e Morley.

Todos os fenômenos eletromagnéticos até então conhecidos estavam, finalmente, elucidados. Porém, um último reparo precisou ser realizado.

Poincaré notou que a teoria original de Lorentz ainda tinha uma deficiência: ela violava o *princípio de relatividade*. Lorentz e Poincaré conseguiram corrigir essas deficiências e, finalmente, sua eletrodinâmica passou a ser uma *teoria completamente relativística*. Poincaré não acreditava que fosse realmente possível detectar o movimento da Terra com relação ao éter. Isso o convenceu de que a relatividade do movimento deveria ser elevada à categoria de *princípio*. Na sua forma mais geral, o princípio foi enunciado, pela primeira vez, em 1904, no trabalho *O Estado Atual e o Futuro da Física Matemática*: “[...] o princípio de relatividade, de acordo com o qual as leis dos fenômenos físicos devem ser as mesmas, seja para um observador fixo, ou para um observador em movimento de translação uniforme; tal que nós não temos, e nem poderíamos ter, quaisquer meios de descobrir se estamos ou não estamos em tal tipo de movimento”. Porém, embora Poincaré, diferentemente de Lorentz, tivesse adotado uma atitude crítica e reservada com relação à hipótese do éter estacionário, nenhum dos dois conseguiu dar o último passo, que coube, finalmente, ao jovem Einstein. Esse passo consistiu na *rejeição completa da noção de éter*.

### **O Espaço-Tempo de Einstein**

Consistentemente com a sua filosofia *convencionalista*, Poincaré considerava que as noções de simultaneidade absoluta e de tempo absoluto não possuíam nenhum significado físico – eram inacessíveis, empiricamente – e que o éter era uma mera hipótese conveniente que, no futuro, se tornaria dispensável. O chamado *tempo local* de Lorentz – o tempo observado em referenciais em movimento com relação ao éter – foi corretamente interpretado, por ele, como sendo equivalente a um certo procedimento, *convencional*, para a *sincronização de relógios* em movimento relativo. Como o próprio Poincaré já havia demonstrado, esse procedimento era

*equivalente à suposição conjunta da validade do princípio de relatividade e da constância do valor da velocidade da luz, em diferentes referenciais inerciais.* Essas duas suposições são os postulados a partir dos quais Einstein construiu a sua própria solução para o problema da eletrodinâmica dos corpos em movimento.

Poincaré, ao contrário de Einstein, escolheu assumir a posição mais conservadora. Muito embora tenha considerado o éter mera hipótese conveniente, ele continuou acreditando que ele era necessário para garantir a única *descrição verdadeira da realidade*. A originalidade de Einstein – no que concerne à relatividade especial – esteve ligada muito mais aos aspectos lógico, epistemológico e metodológico do que, propriamente, empírico. Ele foi muito mais ousado ao exigir que o requisito de simetria entre as descrições dos fenômenos eletrodinâmicos fosse levado às suas últimas consequências, de modo que *todos os observadores em movimento relativo fossem considerados perfeitamente equivalentes*. Quando o matemático Hermann Minkowski (1864 – 1909) criou um quadro geométrico unificado para a teoria de Einstein, ele forneceu uma estrutura matemática clara que permitiu entender melhor o que Einstein havia feito. Minkowski mostrou que *espaço e tempo podiam ser interpretados como coordenadas em um espaço pseudoeuclidiano de quatro dimensões*.

A teoria da relatividade especial operou, com relação à mecânica newtoniana, uma profunda modificação no entendimento das categorias de espaço e de tempo, tornando-as interdependentes. A nova concepção einsteiniana de espaço-tempo implicava naturalmente o abandono da noção de éter, pois era isso que a equivalência completa entre observadores inerciais exigia. No lugar da hipótese de um éter material, Einstein deixava o princípio de independência da velocidade da luz com relação ao estado de movimento de sua fonte. *Essa foi a grande contribuição de Einstein, para a epistemologia da física: construir um quadro geral que não fazia mais nenhuma referência à estrutura da matéria ou da radiação eletromagnética. A grande revolução*

*ontológica de Einstein foi expurgar da eletrodinâmica – e da física, em geral – a noção de éter como sustentáculo da matéria e da radiação. O século XX viu, na teoria de Einstein, a forma mais simples, elegante e definitiva de superar a visão mecanicista de mundo, oferecendo e revelando um papel realmente fundamental para a noção de simetria. A partir de então, a simetria tornou-se o princípio máximo que passou a guiar as especulações e a reger as construções de todas as teorias físicas futuras.*

# Termodinâmica, Energia, Entropia e o Advento da Física Quântica

**E**mbara os fenômenos térmicos tenham começado a ser investigados ainda no início do século XVIII, foi apenas no século XIX que essas investigações tomaram verdadeiro impulso. O desenvolvimento do princípio de energia e os trabalhos experimentais em torno da eficiência das máquinas térmicas pavimentaram o caminho para que, no início da segunda metade do século, a *termodinâmica* já estivesse construída. Até o final do século, a busca incessante pelo estabelecimento dos fundamentos microscópicos de suas leis conduziu à formulação da *mecânica estatística*. Não tardou para que esta evidenciasse os limites últimos da visão mecanicista e precipitasse a sua derrocada final, com o conseqüente advento da física quântica.

### 5.1. O Calórico e a *Potência Motriz do Fogo*

A história da termodinâmica teve seu verdadeiro início em 1824, com a publicação das *Reflexões sobre a Potência Motriz do*

Fogo, de Sadi Carnot (1796 – 1832). Antes mesmo que o *princípio de energia* estivesse estruturado para dar origem à *primeira lei da termodinâmica*, Carnot foi capaz de obter a formulação preliminar do que se tornaria, pelas mãos de William Thomson e Rudolf Clausius, a *segunda lei da termodinâmica*. O contexto no qual Carnot trabalhou era restrito ao estudo teórico da eficiência de máquinas térmicas. E, para Carnot, o calor ainda era o fluido imponderável conhecido como *calórico*. A partir da segunda metade do século XVIII, as máquinas térmicas já eram bem conhecidas e empregadas. Sua história, porém, havia começado muito antes, com a invenção das primeiras máquinas a vapor de uso prático – por Thomas Savery (1650 – 1715), em 1698, e por Thomas Newcomen (1664 – 1729), em 1712. Em 1765, James Watt (1736 – 1819) conseguiu transformar a máquina de Newcomen em um dispositivo realmente eficiente. Sua grande novidade foi redefinir o sistema de operação da máquina de modo que ela operasse entre dois reservatórios a diferentes temperaturas. Foi Carnot quem efetuou o primeiro estudo teórico dessa situação e descobriu o que veio a ser conhecido como o *princípio de Carnot: para que trabalho mecânico possa ser produzido, por qualquer que seja o sistema termodinâmico operando em um processo cíclico, o calor deve, necessariamente, fluir de um reservatório mais quente para um reservatório mais frio*. Observe que, além da diferença de temperaturas, a produção de trabalho implica uma *direcionalidade* bem definida para o fluxo de calor.

A história da construção da teoria dos fenômenos térmicos consistiu na disputa entre duas ideias completamente opostas sobre a natureza do calor: a *concepção materialista*, segundo a qual o *calor era uma substância*; e a *concepção dinâmica*, segundo a qual o *calor era movimento*. A concepção dinâmica era a mais antiga, tendo suas raízes no atomismo dos gregos antigos. Quando o atomismo foi reproposto, no século XVII, com ele foi também veiculada a noção de calor como movimento, defendida por Galileu, Gassendi, Huygens, Newton

e Leibniz. Leibniz parece ter sido o primeiro que percebeu, na dissipação do movimento macroscópico, o resultado da redistribuição de sua *vis viva* – o precursor do conceito de energia cinética – entre as partes microscópicas dos corpos. Embora o atomismo fornecesse uma base ainda pouco sólida, do ponto de vista empírico, para essas concepções, uma boa dose de confiança foi provida, ao longo dos séculos XVII e XVIII, a partir das primeiras investigações sobre o comportamento dos gases, realizadas por Henry Power (1623 – 1668), Richard Towneley (1629 – 1707), Edmé Mariotte (c. 1620 – 1684) e Robert Boyle – responsáveis por estabelecer a lei da constância do produto entre pressão e volume de um gás à temperatura constante.

No século XVIII, a teoria dos gases foi esparsamente investigada. Na passagem para o século XIX, Jacques Charles (1746 – 1823) e Joseph Gay-Lussac (1778 – 1850), com base em trabalho prévio de Guillaume Amontons (1663 – 1705), chegaram às descobertas das leis que regulam a expansão térmica à pressão constante e a relação entre pressão e temperatura à volume constante. O trabalho de Gay-Lussac já foi realizado no interior do programa laplaciano e de sua concepção materialista de calor: uma substância fluida, imponderável e elástica, cujas partículas se repeliam mutuamente, chamada *calórico*. Entre outros fenômenos, a expansão dos sólidos era facilmente explicada como resultado da atração do calórico pela matéria ordinária e pela ação repulsiva entre as partículas de calórico. As diferenças de temperatura eram imputadas a uma maior ou menor quantidade de calórico. O maior impulso para a concepção materialista veio através de Joseph Black (1728 – 1799), que realizou diversos experimentos envolvendo o processo de atingimento do equilíbrio térmico. Com base nesses experimentos, ele foi capaz de fazer uma clara distinção entre calor e temperatura, tendo introduzido, para isso, o conceito de *calor específico*. Da investigação dos processos de mudança de estado físico, ele constatou

que a transferência de calor também podia acontecer sem qualquer mudança de temperatura, levando-o a introduzir, em 1762, o conceito de *calor latente*. À época, mudanças de estado físico eram mais difíceis de acomodar em uma concepção dinâmica, pois esta parecia implicar que a mudança de estado deveria acontecer sempre de modo abrupto, sem a possibilidade de uma fase de coexistência entre distintos estados da matéria. Hoje, sabemos que o calor latente está relacionado com a variação de *entropia*. A energia gasta no processo de mudança de estado está envolvida com uma *mudança estrutural* da substância, e não com o aumento de sua agitação molecular. A teoria do calórico teve seu auge com Antoine Lavoisier (1743 – 1794), o fundador da química moderna, cuja colaboração com Laplace resultou no trabalho *Memória sobre o Calor* (1783), uma compilação do estado da arte da ciência térmica (experimental e teórica). Por essa época, o próprio Laplace ainda não havia se comprometido com a hipótese do calórico, porém, a partir da publicação do *Tratado Elementar de Química* (1789), de Lavoisier, sua adesão já era completa. Como sabemos, já pelo início do século XIX, os fluidos imponderáveis começaram a ser contestados. Em 1798–99, Benjamim Thompson (*Conde Rumford*, 1753 – 1814) e Humphry Davy mostraram que o princípio de conservação do calórico – herdado do universalmente aceito *princípio de conservação da massa* – era incompatível com o processo de geração de calor por fricção, uma vez que, a partir dessa fonte, as quantidades de calor produzidas podiam ser ilimitadas.

Porém, quando Carnot se debruçou sobre o problema das máquinas térmicas, ele aderiu à antiga ideia do calórico e ao seu princípio de conservação, de modo que nenhuma perda de calórico estaria envolvida na produção de trabalho. Para Carnot, a condição suficiente para a produção de trabalho era apenas o *fluxo de calórico* entre fontes a diferentes temperaturas. A quantidade de trabalho obtida era função exclusiva da *diferença de temperaturas* entre as fontes. Para



dar inteligibilidade a esses enunciados, ele empregou uma analogia exclusivamente mecânica com a obtenção de trabalho a partir da energia potencial gravitacional, situação na qual não estava envolvida perda de matéria. Para estabelecer o princípio geral para máquinas térmicas, Carnot descreveu um ciclo específico de operações em uma máquina ideal. O *ciclo de Carnot* é um processo *reversível*, constituído por quatro processos – dois isotérmicos e dois adiabáticos, alternadamente. Reversibilidade significa que, consumindo-se a mesma quantidade de trabalho mecânico gerado, seria possível fazer o calórico fluir na direção contrária, da fonte fria para a fonte quente. O *teorema de Carnot* estabeleceu que a *eficiência de qualquer máquina térmica é limitada pela eficiência da sua máquina reversível, a qual dependia, exclusivamente, da razão entre as temperaturas das fontes quente e fria*. Em 1834, Émile Clapeyron (1799 – 1864) elaborou uma formulação matemática da teoria de Carnot, lançando mão do diagrama que representa a variação da pressão em função da variação do volume da substância operante ( $p$ - $V$ ). Isso tornava explícito o retorno do sistema ao seu estado inicial. A formalização matemática foi importante para que ficasse claro o que de fato era essencial, no que se referia ao conteúdo do princípio de Carnot.

## 5.2. A Conciliação entre Mecânica e Termodinâmica

O estudo das relações entre calor e trabalho mecânico foi de importância central para a construção da termodinâmica. Enquanto a física do século XVIII havia considerado processos mecânicos e não mecânicos como essencialmente distintos, a *demonstração da equivalência numérica entre calor e trabalho mecânico* – através de dezenas de experimentos realizados na década de 1840 por Julius Robert von Mayer (1814 – 1878), Ludwig Colding (1815 – 1888) e James Joule (1818 – 1889) – permitiu alcançar uma descrição conjunta dos processos térmicos e mecânicos. A esse respeito, o trabalho de Joule se destacou não apenas pela variedade e precisão

de seus experimentos, mas também pelo seu compromisso explícito com a concepção dinâmica e com a tese de conversibilidade mútua. Contudo, alguns cientistas, tais como William Macquorn Rankine (1820 – 1872), William Thomson e Rudolf Clausius (1822 – 1888) identificaram uma contradição entre os trabalhos de Carnot e de Joule. A fundação da termodinâmica foi o resultado final do processo de resolução dessa contradição. Essa história pode ser sintetizada por duas conquistas fundamentais: a descoberta de Thomson da *escala absoluta de temperatura* e a criação do conceito de *entropia*, por Rudolf Clausius. À medida que a termodinâmica se desenvolvia, foi ficando claro que temperatura e entropia eram conceitos complementares, cuja articulação conjunta era indispensável para reduzir conceitualmente todos os processos térmicos a um mesmo denominador comum: a noção de *irreversibilidade*.

Em 1847, William Thomson travou seu primeiro contato com o trabalho de Joule. Apesar de sua viva impressão, Thomson levaria ainda alguns anos para aceitar o chamado *princípio de Joule – a noção de conversibilidade entre trabalho e energia térmica –*, cujo fundamento ontológico era a concepção dinâmica. De fato, para Thomson, o princípio de Carnot – e a tese de conservação do calórico associada – era fundamento indispensável da teoria das máquinas térmicas. Porém, paulatinamente, *Thomson começou a duvidar da concepção materialista de calórico, em virtude de sua franca contradição com a exigência do princípio de Joule – de acordo com o qual parte do calor deveria ser consumido, durante a produção de trabalho*. Curiosamente, a teoria matemática do calor de Fourier o conduziu a duas linhas de pensamento antagônicas, mas que acabavam por depor contra ambos os princípios. Contra os fundamentos da teoria de Carnot, havia a ideia de Fourier de que representações matemáticas de fenômenos não implicavam compromissos com realidades físicas. Contra a teoria de Joule, Thomson observou que *nenhum trabalho mecânico era produzido no processo de condução*

(e dissipação) do calor através de um sólido. Isso parecia invalidar a alegação de Joule de que o calor não poderia ser destruído. Esse importante questionamento a respeito dos processos térmicos irreversíveis continha, pela primeira vez, o uso do termo *energia* como um conceito fundamental, no contexto da termodinâmica. Evidentemente, os questionamentos de Thomson colocavam em cheque duas teorias que produziam resultados experimentais corretos. O próprio Thomson havia constatado a validade empírica de uma previsão da teoria de Carnot, obtida por seu irmão, James Thomson: o rebaixamento do ponto de congelamento da água submetida à pressão. Por outro lado, o trabalho experimental de Joule não deixava dúvidas a respeito – senão da conversibilidade – da equivalência numérica entre calor e trabalho mecânico.

### **As Leis da Termodinâmica: Conservação e Direcionalidade**

Rudolf Clausius, no trabalho *Sobre a Força Motriz do Calor* (1850), foi o primeiro a encontrar uma solução completa para o problema. O princípio de conversibilidade e a concepção dinâmica de Joule foram assumidos de forma completa: *calor era uma medida da vis viva que agitava as partes microscópicas dos corpos*. A chave para a solução da contradição foi ele ter percebido que a essência da teoria de Carnot não estava no seu compromisso com o calórico ou com a sua conservação, mas na direcionalidade do fluxo de calor. Isso permitiu que Clausius identificasse os fundamentos conceituais da termodinâmica, que ele estabeleceu em dois postulados.

O primeiro postulado envolvia uma *generalização da equivalência entre trabalho mecânico e calor*. Para obtê-la, Clausius resolveu trabalhar diretamente sobre um ciclo de Carnot *infinitesimal*. Primeiramente, ele assumiu que o *estado* de um gás era univocamente determinado pela sua *pressão*, seu *volume* e sua *temperatura*. Em seguida, partiu do que hoje conhecemos como a *equação do gás ideal* – derivada diretamente das leis de Boyle-Mariotte e de Gay-Lussac – para chegar a expressões matemáticas específicas para os processos isotérmicos

e adiabáticos envolvidos no ciclo de Carnot. Desse modo, ele obteve a expressão da *primeira lei da termodinâmica*:  $\bar{d}Q = dU(V, T) + pdV$ . Nessa expressão, a diferencial inexata  $\bar{d}Q$  é a quantidade de calor *consumida* na produção de trabalho mecânico  $pdV$ , enquanto U é uma *função de estado* arbitrária – uma função exclusivamente dependente do volume V e da temperatura T do gás. Clausius mostrou que Q não podia ser uma função exclusiva de V e T e que, portanto, não era uma função de estado. Por outro lado, a função U – a *energia interna* – finalmente permitia entender como o princípio de conservação da energia podia ser explicitamente satisfeito, uma vez que a diferença entre a quantidade de calor consumida e o trabalho mecânico executado era perfeitamente identificada como *mudança de energia interna* – que Clausius interpretou como o resultado do *trabalho interno* realizado sobre as partes microscópicas do gás. O trabalho interno tinha como efeito o aumento do *calor sensível* – conceito extensamente empregado, em contraposição ao de calor latente –, interpretado como aumento da *temperatura* do gás.

O segundo postulado consistia em uma modificação do princípio de Carnot que preservava a parte essencial de sua teoria. O enunciado de Clausius é a primeira de várias versões que ele forneceria para a *segunda lei da termodinâmica*. Essa primeira versão estabelecia que, *ao passar de uma fonte quente para uma fonte fria, em um processo cíclico, uma parte do calor é consumida na produção de trabalho, enquanto a outra parte é liberada para a fonte fria*. Clausius justificou esse princípio como sendo resultado de uma generalização empírica. Ele enfatizou sua estreita relação com a direcionalidade dos processos termodinâmicos ao afirmar que, *na natureza, o fluxo de calor sempre procura equalizar as temperaturas*. No ano seguinte ao trabalho de Clausius, William Thomson elaborou o enunciado atualmente mais conhecido da chamada *versão de Clausius da segunda lei da termodinâmica*, cuja vantagem era exhibir a essência de sua ideia: *“é impossível, para uma máquina que atua sobre si*

*mesma, sem o auxílio de qualquer agente mecânico externo, fazer o calor fluir de um corpo para outro que esteja à temperatura mais elevada".* Ou seja, o calor não flui espontaneamente de um corpo mais frio para um corpo mais quente. A formulação de Clausius dá, portanto, significado físico explícito à escala absoluta de temperatura, cuja interpretação passa a ser a de um *potencial para o atingimento do equilíbrio térmico*.

A solução de Clausius dava suporte não apenas à concepção dinâmica de calor, mas, também, à noção de conversibilidade mútua. Se o calor era apenas o movimento das “partes menores” no interior dos corpos, era razoável supor que a *vis viva* associada a esses movimentos pudesse ser convertida em trabalho mecânico. O contexto adequado para a defesa desse ponto de vista era o *atomismo*, articuladamente com o qual a visão mecanicista de mundo finalmente alcançaria domínio sobre a teoria dos fenômenos térmicos, renunciando sua extensão na direção de uma teoria consistente para a estrutura da matéria. Clausius, entretanto, foi extremamente prudente a esse respeito. Ele teve o cuidado de não fundamentar suas leis da termodinâmica em qualquer hipótese sobre a estrutura da matéria, fazendo uma explícita distinção entre *princípios gerais* – mais conformes à categoria de explicação dinamicista – e *hipóteses* sobre os *mecanismos invisíveis* subjacentes à matéria e aos fenômenos térmicos.

### **As Leis da Termodinâmica: Conservação e Dissipação**

No ano seguinte ao trabalho de Clausius, Thomson publicou sua própria solução do impasse entre as teorias de Carnot e de Joule, no trabalho *Sobre a Teoria Dinâmica do Calor* (1851). Nesse momento, Thomson estruturou a termodinâmica de acordo com uma visão ainda mais profunda que a de Clausius, ao propor que a essência da reinterpretação do princípio de Carnot consistia na noção de *dissipação irreversível da energia*. De grande importância para Thomson foram as investigações de William Rankine, que também tentava reconciliar as teorias de Carnot e de Joule. Trabalhando na

teoria das máquinas a vapor, Rankine havia publicado o trabalho *Sobre a Ação Mecânica do Calor* (1850), no qual relatara a descoberta experimental de que o trabalho realizado na expansão isotérmica do vapor – na passagem por um orifício que comunicava a parte interna de uma câmara, cheia com vapor d'água saturado, com o ambiente externo – devia, necessariamente, consumir calor de alguma fonte externa. Se esse não fosse o caso, a expansão isotérmica seria acompanhada de condensação, às expensas do calor latente. Parte do processo de aceitação da concepção dinâmica de calor, por parte de Thomson, proveio de sua explicação para essa fonte externa de calor: a fricção contra as paredes do orifício de escape do reservatório. Isso abriu caminho para que Thomson percebesse a solução do enigma da condução do calor em sólidos – o fluxo de calor sem produção de trabalho mecânico: *o calor era convertido em movimento microscópico, em um processo dissipativo*. A diferença entre o calor provido e o (eventualmente) recuperado correspondia exatamente ao aumento da agitação molecular, o que estava de acordo com a primeira lei da termodinâmica de Clausius.

A principal descoberta de Thomson foi perceber que *a noção de direcionalidade, intrinsecamente associada com o fluxo de calor, no processo de dissipação, era equivalente à afirmação de que o processo, uma vez acontecido, era irreversível*. Thomson generalizou esse resultado para construir a sua própria versão da segunda lei da termodinâmica: *“é impossível, por meio de um agente material inanimado, produzir efeito mecânico, a partir de qualquer porção de matéria, pelo seu resfriamento à uma temperatura mais baixa do que a temperatura do mais frio entre os objetos circunvizinhos”*. Ou seja, calor não pode se converter espontaneamente em trabalho. Por fim, Thomson demonstrou que sua versão era equivalente à de Clausius.

### 5.3. O Princípio de Conservação da Energia

No que se refere aos princípios de conservação, em geral, e à ideia de conversibilidade entre “forças” ou “poderes”, a história é bastante antiga. Já nos primórdios da filosofia natural, os filósofos pré-socráticos (séculos V – IV a.C.) acreditavam na indestrutibilidade da matéria e na impossibilidade de sua criação a partir do nada, em conformidade com a asserção de Demócrito: “*do nada, nada provém, e nada se torna nada*”. Aristóteles e os filósofos medievais assumiram essa ideia como um princípio metafísico, um *princípio de causalidade*, segundo o qual *há tanto “poder” ou “força” nas causas quanto nos efeitos*. Das quantidades que se tornaram objeto de princípios de conservação, sem dúvida a massa – aliás, matéria – foi a primeira. Desde os antigos acreditava-se que a matéria poderia sofrer transformações, mas não acréscimo ou diminuição. Essa crença jamais foi abalada até o advento da relatividade especial, quando a conversibilidade entre massa e energia foi demonstrada. Em seguida à conservação da massa, surgiu o princípio de conservação da quantidade de movimento – originalmente, com Descartes, cujas concepções foram corrigidas, ao longo dos desenvolvimentos da mecânica, os quais estabeleceram sua definição correta e as condições exatas para a sua conservação. No século XVIII, também foi possível definir e descobrir as condições para a conservação do momento angular.

O conceito de energia e o seu princípio de conservação são os pontos máximos da física do século XIX. Suas origens repousam, contudo, no século XVII. Huygens e Leibniz já haviam descoberto que a *vis viva* era conservada em colisões elásticas. Leibniz, motivado a estabelecer um conceito de “força” que satisfizesse a um princípio de conservação, demonstrou que a *vis viva* era completamente regenerada nos movimentos sob ação da gravidade cujas alturas final e inicial fossem as mesmas (desprezados os efeitos do atrito). Porém, ele sabia que isso não significava sua conservação em todas

as fases de um processo mecânico geral. Pensando sobre o caso específico das colisões inelásticas, Leibniz introduziu também a noção de *vis mortua* – *força morta*, um precursor do conceito de *energia potencial*. Por um lado, a *vis mortua* era uma fonte para o surgimento da *vis viva*. Por outro lado, a *vis mortua* era análoga à força responsável pelo que hoje conhecemos como *trabalho*, uma vez que sua ação constante gerava variação de *vis viva* – um precursor do *teorema do trabalho-energia*. Ulteriormente, Leibniz estendeu o conceito de conservação da *vis viva* para todos os processos da natureza, tendo percebido que a *vis viva* aparentemente perdida nas colisões inelásticas entre corpos continuava, *indestrutível*, subdividida nas suas “partes menores”, o que antecipava o moderno conceito dinâmico de calor.

Durante o século XVIII, o *princípio do trabalho virtual*, de Jean Bernoulli, e o *princípio de mínima ação*, de Pierre Maupertuis (1698 – 1759), conduziram ao estabelecimento – pelas mãos de Jean e Daniel Bernoulli, d’Alembert, Euler, Lagrange e Laplace – de versões cada vez mais gerais e matematicamente sólidas do chamado *princípio de conservação da vis viva*. Em sua obra máxima, *Mecânica Analítica* (1788), Lagrange demonstrou que esse princípio era uma consequência de suas equações dinâmicas, no caso em que os vínculos mecânicos de um sistema dinâmico não apresentassem forças de atrito ou dependência temporal explícita. Mais especificamente, o que Lagrange estabeleceu foi que, *se as forças envolvidas puderem ser obtidas como gradiente de uma função escalar, então a energia mecânica total do sistema – a soma da energia cinética e da energia potencial – permanece constante*.

No século XIX, ficou claro que o princípio de conservação da energia tinha que ser ampliado para além dos limites da mecânica. Por um lado, a concepção dinamicista da teoria eletromagnética mostrava que sistemas “não mecânicos” também podiam ser repositórios de energia. Por outro lado, a teoria cinética dos gases e a mecânica estatística mostraram



que os modos microscópicos de estocagem e transmissão da energia eram fundamentais para fundamentar a termodinâmica. A descoberta do princípio geral de conservação da energia compreendeu três aspectos inter-relacionados: o reconhecimento da energia como propriedade universal; o reconhecimento de sua manifestação em múltiplas formas conversíveis entre si; e o reconhecimento de sua indestrutibilidade. Nenhum dos fenômenos físicos profusamente investigados, no início do século XIX – envolvendo geração de calor por eletricidade ou fricção, ou produção de trabalho mecânico a partir de máquinas térmicas – parecia sustentar inequivocamente a ideia de conservação, pois conversibilidade e indestrutibilidade não são ideias equivalentes. Porém, a ideia de conservação é estritamente dependente da ideia de conversibilidade. Daí a importância dos trabalhos de pioneiros como Benjamim Thompson, Humphry Davy e Michael Faraday.

Os descobridores das primeiras versões do princípio geral de conservação da energia foram muitos, todos eles chegando a ideias muito similares entre 1837 e 1843. Na metade da década de 1830, Faraday já havia trabalhado em quase todos os processos envolvendo a conversibilidade da energia (mecânica, elétrica, química etc.). Em 1840, ele já estava convencido da ideia de conservação da “força”. Em 1837, o químico alemão Friedrich Mohr (1804 – 79) expressou sua crença na existência de uma força única na natureza que, sob condições adequadas, podia se manifestar como luz, calor, eletricidade, magnetismo ou movimento. Em 1839, o engenheiro francês Marc Seguin (1786 – 1875) concluía que calor e movimento eram mutuamente conversíveis em máquinas a vapor. O físico inglês William Grove (1811 – 1896) chegou à crença na conversibilidade mútua de todas as formas de “força” por volta de 1842. Trabalhando sob influência da *Naturphilosophie*, o físico e engenheiro dinamarquês Ludwig Colding (1815 – 88) e o médico e físico alemão Julius Robert

Mayer (1814 – 1878) chegaram ao princípio de conservação, respectivamente, em 1840 e 1842. Mayer, Colding e Joule estavam, exatamente por volta de 1842-43, realizando, independentemente, suas medidas do equivalente mecânico do calor. Colding trabalhou com problemas envolvendo fricção e Mayer, com produção de calor em animais. O trabalho de Joule, contudo, foi mais sistemático e amplo. Entre 1843 e 1850, ele realizou dez experimentos que forneciam valores independentes para o equivalente mecânico do calor. Em abril de 1847, ele forneceu a sua mais clara proposição do princípio da conservação da energia: *“onde quer que a força viva seja aparentemente destruída, seja por percussão, fricção ou quaisquer meios similares, um exato equivalente de calor é restaurado. A proposição recíproca é também verdadeira, a saber, que calor não pode ser perdido ou absorvido sem a produção de força viva ou sua equivalente atração através do espaço... todas as três, portanto – a saber, calor, força viva e atração através do espaço (aos quais eu poderia também adicionar luz, fosse ela compatível com o escopo da presente conferência) – são mutuamente conversíveis umas nas outras”*.

Apesar da clareza e da profundidade das concepções de Joule e do fato de muitos de seus contemporâneos, tais como Mayer e Colding, terem chegado, quase simultaneamente, aos resultados experimentais que davam suporte ao princípio de conservação da energia, coube a Hermann von Helmholtz, no trabalho *Sobre a Conservação da Força* (1847), seu estabelecimento definitivo, em bases teóricas e matemáticas precisas, com um grau de generalidade muito superior ao dos seus antecessores e contemporâneos. Graças à coincidência com relação ao período em que foram divulgados e ao fato de terem apresentado, respectivamente, o estado da arte nos campos experimental e teórico, os trabalhos de Joule e de Helmholtz foram decisivos para que o princípio de conservação da energia tivesse rápida aceitação entre os físicos, a partir de 1847. Por volta de 1850, o consenso já estava estabelecido. A partir desse ponto, o conceito newtoniano

de força começou a passar, paulatinamente, para segundo plano, sendo definido a partir do conceito de trabalho. Esse fato tem um caráter peculiar e sintomático. A ascensão do princípio de energia representou, a uma só vez, o ápice da visão mecanicista de mundo e o início de sua queda. De fato, o conceito de energia – que era essencialmente de origem *mecânica* – permitiu o estabelecimento de um programa de pesquisa – a *física energética*, nos termos de William Rankine – que propugnava a redução de *todos* os fenômenos físicos ao mesmo denominador conceitual comum. Porém, o conceito de energia era suficientemente abstrato e geral para dispensar compromissos ontológicos específicos. O programa da física energética consistia em propor a construção de uma teoria geral e abstrata, fundada em uma estrutura de axiomas livres de hipóteses sobre a natureza da matéria ou, ainda mais radicalmente, até de compromissos com a *materialidade* dos sistemas físicos. No início do século XX, isso acabou por fazer emergir a noção de campo eletromagnético independente de uma substância etérea. No que se refere às concepções de massa e de matéria, propriamente ditas, o final do século XIX e o início do século XX também reservariam algumas surpresas espetaculares. Uma delas, por meio da descoberta da equivalência entre massa e energia, já obtida por Poincaré, em exemplos específicos, e solidamente generalizada por Einstein, em 1905. De qualquer modo, desde o início da segunda metade do século XIX, nunca mais o princípio de energia deixou de ser visto como uma das leis mais fundamentais da natureza.

#### 5.4. Irreversibilidade e Entropia

Em 1848, William Thomson havia chegado, através do teorema de Carnot, à escala absoluta de temperatura, cujo fundamento era sua definição de *temperatura termodinâmica*. Ela pode ser definida a partir da igualdade entre a razão das temperaturas das fontes quente ( $T_1$ ) e fria ( $T_2$ ) – entre as quais

uma máquina térmica reversível opera – e a razão entre as quantidades de calor absorvido ( $Q_1 > 0$ ) e cedido ( $Q_2 > 0$ ). O próximo passo, contudo, seria de Clausius. Em trabalhos publicados em 1854 e 1856, ele partiu da constatação de que, em um ciclo de Carnot, o mesmo raciocínio que fundamentava a escala absoluta de temperatura também implicava que  $\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$ . A partir desse fato, ele estabeleceu uma nova forma para a segunda lei da termodinâmica, baseada no conceito de *valor de equivalência de uma transformação*.

Em termos modernos, o argumento é como se segue. Em um diagrama  $p$ - $V$ , um ciclo de Carnot pode ser decomposto em duas partes, uma conectando os estados A e B, por um caminho C – por uma transformação isotérmica, seguida de uma adiabática, consumindo calor  $Q_1$  – e outra conectando B e A, por um caminho D – por uma transformação isotérmica, seguida de uma adiabática, cedendo calor  $Q_2$ , ou equivalentemente, consumindo calor ( $-Q_2$ ). Portanto:

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \Rightarrow \int_A^B \frac{\bar{d}Q}{T} = \int_B^A \frac{\bar{d}(-Q)}{T} \Rightarrow \int_{A \rightarrow B, \text{via } C} \frac{\bar{d}Q}{T} = \int_{A \rightarrow B, \text{via } D} \frac{\bar{d}Q}{T}.$$

A independência com relação aos caminhos mostrava que Clausius havia descoberto uma nova *função de estado*, cuja integração fornecia o que ele definiu como o *valor de equivalência de uma transformação*. Utilizando ciclos de Carnot infinitesimais, ele demonstrou que essa ideia podia ser estendida para o caso de quaisquer *processos reversíveis* e, nesse caso, concluiu que a soma total dos valores de equivalência devia ser *nula*,  $\sum_A^B \frac{\bar{d}Q}{T} = 0$ . Porém, se esse mesmo procedimento fosse aplicado para o caso de quaisquer *processos irreversíveis*, necessariamente a soma total deveria ser negativa,  $\sum_A^B \frac{\bar{d}Q}{T} < 0$ . Esses resultados foram compilados no chamado “teorema com respeito aos valores de equivalência das transformações” ou *teorema de Clausius: a soma algébrica dos valores de equivalência das transformações ocorrendo em um processo cíclico é, necessariamente, negativa, ou, no caso extremo, igual a zero:  $\oint \frac{\bar{d}Q}{T} \leq 0$* . (Observe a convenção de

sinais assumida.) O termo *entropia* – do grego *tropé*, que significa transformação – surgiu apenas em 1865, para substituir o termo “valor de equivalência”. De seu teorema, Clausius deduziu o resultado fundamental da segunda lei, tanto para *sistemas isolados* quanto para *sistemas em contato térmico* com um reservatório. Em qualquer caso, *a entropia total jamais poderia decrescer*. As duas fórmulas que sintetizaram a última versão de Clausius para as leis da termodinâmica apareceram nesse mesmo trabalho: “*a energia do universo é constante*” (primeira lei da termodinâmica) e “*a entropia do universo tende a um máximo*” (segunda lei da termodinâmica).

A conquista do conceito de entropia foi o resultado da busca de Clausius pela quantificação da direcionalidade dos processos termodinâmicos e pelo estabelecimento da irreversibilidade como uma lei fundamental da natureza. Porém, apesar de continuar enfatizando que as leis da termodinâmica eram independentes de hipóteses sobre a constituição da matéria, Clausius – em consonância com o seu atomismo – acabou por enveredar na busca por uma explicação mecânica para a segunda lei que estivesse fundada em uma teoria de movimentos moleculares. Foi com esse objetivo que, em 1862, ele introduziu o conceito de *desagregação* – uma medida do estado de agregação estrutural, a ser obtida por meio do cômputo das distâncias médias entre as moléculas de um corpo em estado de equilíbrio. Ele imaginou que o significado físico do valor de equivalência (entropia) estivesse associado aos efeitos de desagregação resultantes da absorção de calor pelo corpo. Ou seja, Clausius acreditava que a absorção de calor não apenas contribuía para o aumento da energia interna, mas também implicava maior desagregação estrutural, ambos proporcionais à elevação da temperatura. Essa ideia foi fortemente atacada por muitos físicos, em particular, por Maxwell, um dos primeiros a perceber, com toda a clareza, que a segunda lei da termodinâmica era uma *lei estatística* e que, portanto, jamais poderia ser explicada nesses termos.

## 5.5. A Conexão entre os Mundos Macroscópico e Microscópico

### A Teoria Cinética dos Gases

A termodinâmica se estabeleceu em bases estritamente dinamicistas e constituiu um dos melhores exemplos de uma teoria puramente *fenomenológica*, ou seja, fundada em axiomas cujos compromissos com modelos microscópicos eram totalmente dispensáveis. Desse modo, ela supria as exigências positivistas mais extremas, depositadas em teorias que consistissem apenas em um formalismo que só continha elementos teóricos diretamente interpretáveis em termos observacionais. Contudo, isso jamais inviabilizou o programa de pesquisa mecanicista fundado na investigação das estruturas microscópicas, cujo primeiro caso bem-sucedido foi o da *teoria cinética dos gases*. John Herapath (1790 – 1868), James Waterston (1811 – 1883) e August Krönig (1822 – 1879) estão entre os pioneiros da área, mas, com a possível exceção de Krönig, seus trabalhos tiveram pouco reconhecimento, em suas próprias épocas. Coube a Clausius e a Maxwell retomarem essas investigações.

Foi Clausius que, em 1857, obteve o primeiro sucesso, ao estabelecer a conexão entre os fenômenos macroscópicos da termodinâmica dos gases ideais e o mundo microscópico de sua estrutura atômica. Sua hipótese foi a de que os gases eram formados por átomos esféricos que interagiam por colisões elásticas. Porém, sua principal inovação foi de caráter metodológico, pois, para tratar o problema, ele empregou um *tratamento estatístico*. Ele partiu da ideia de que as velocidades dos átomos se distribuíam aleatoriamente, de acordo com alguma função desconhecida, mas cuja *média* deveria representar a principal característica associada ao conjunto. Com isso, ele reobteve as definições associadas com o *conceito cinético de pressão* – a taxa total de variação de momento nas colisões dos átomos com as paredes do recipiente – e com

o conceito cinético de temperatura – sua proporcionalidade com a velocidade quadrática média dos átomos. A *energia interna* do gás foi interpretada como a *média da energia cinética* dos seus átomos. Apesar desses sucessos, ele não conseguiu obter o valor correto da *razão entre os calores específicos, a pressão e a volume constantes*,  $\gamma = C_p / C_v$  – que, para gases diatômicos à temperatura ambiente, correspondia a  $\gamma \approx 1,4$ . Clausius intuiu corretamente o motivo da discrepância. Embora tivesse suposto que o gás estocava energia interna apenas através de energia cinética *translacional*, ele especulou sobre a existência de outros modos ainda desconhecidos.

Em 1860, Maxwell partiu de onde Clausius havia parado. Partindo exclusivamente da suposição da *independência estatística* entre as componentes das velocidades dos átomos do gás, ele derivou a sua *distribuição de velocidades*. Metodologicamente, Maxwell enfatizou a virtual equivalência entre os modos como se distribuía as velocidades dos átomos e os *erros aleatórios*, na teoria de inferência estatística. Mas, o conceito mais importante que ele introduziu foi o de *equipartição da energia*. Maxwell supôs, corretamente, que havia um segundo modo de estocar energia interna: a energia cinética associada à *rotação das moléculas*. Desse modo, cada molécula do gás devia possuir seis graus de liberdade (três translacionais e três rotacionais). Sua hipótese foi a de que *cada grau de liberdade compartilhava a mesma quantidade média de energia*. Essa é a essência do chamado *teorema de equipartição*, cuja demonstração definitiva foi realizada por Boltzmann, em 1876. Porém, a hipótese de Maxwell implicava o valor  $\gamma \approx 1,3$ , ainda distante do valor procurado (para os gases diatômicos).

O fato é que a teoria cinética dos gases – juntamente com os primeiros estudos em espectroscopia dos gases e a descoberta de suas raias espectrais de absorção e de emissão, a partir de 1860 –, mostravam que a física clássica e a visão mecanicista estavam atingindo o seu limite. A solução correta do problema da razão dos calores específicos exigiria

um *tratamento quântico* – o que só foi possível em 1907, pelas mãos de Einstein. Embora esses insucessos tenham lançado as primeiras dúvidas com respeito à validade do teorema de equipartição, Maxwell prosseguiu aplicando sua metodologia estatística e, em 1867, reobteve a distribuição de velocidades do gás ideal a partir da exigência de *invariância* de seu estado de equilíbrio com respeito à dinâmica de colisões moleculares. Ainda em 1867, ele utilizou um poderoso argumento para demonstrar que *a segunda lei da termodinâmica não podia ser uma lei exata, pois, ainda que de forma extremamente improvável, ela poderia ser violada*. Ele mostrou, ainda, que os princípios da mecânica não podiam ser fundamento para a segunda lei, pois a noção de irreversibilidade nela contida era explicitamente contraditória com *a reversibilidade temporal das equações de movimento microscópicas*. Esses resultados podem ser considerados os marcos fundamentais do nascimento da mecânica estatística.

### **O Advento da Mecânica Estatística**

Diferentemente de Clausius, Maxwell estava seguro de que a segunda lei da termodinâmica tinha seu fundamento na estatística daquela enorme quantidade de graus de liberdade microscópicos que os sistemas físicos macroscópicos possuíam. Ele sabia que era fundamental entender como a conexão entre a *realidade física microscópica* e a sua *expressão fenomenológica macroscópica* podia ser obtida como resultado exclusivo da aplicação das *leis da probabilidade*. A realização dessa tarefa coube a Ludwig Boltzmann (1844 – 1906). Entre 1868 e 1871, Boltzmann obteve a generalização da distribuição de Maxwell para gases (poliatômicos) submetidos a *potenciais externos*. Esses resultados formaram o núcleo original das ideias que conduziram à chamada *lei de distribuição de Maxwell-Boltzmann*,  $\rho = \exp(-E/kT)$ , que representa o cerne da mecânica estatística clássica. Para obter essa generalização, Boltzmann partiu de uma técnica matemática original, independente do problema dinâmico propriamente dito: uma *análise combinatória*



da distribuição dos átomos em *células discretas de energia*, vinculadas pela energia total do sistema ( $E$ ). A distribuição de equilíbrio foi identificada com o estado combinatorial mais provável – levada em conta a invariância por permutações de partículas idênticas. A estratégia de discretização da energia no procedimento de Boltzmann não passava de mera conveniência, pois, ao final, o limite do contínuo era tomado. Ela pode, contudo, ter influenciado Planck e Einstein a introduzir a ideia de quantização para resolver, respectivamente, os problemas do espectro do corpo negro e do calor específico dos gases e dos sólidos.

Em 1872, Boltzmann chegou ao chamado *teorema H*, que fornecia o primeiro fundamento sólido para a compreensão estatística da segunda lei da termodinâmica, estendendo o conceito termodinâmico de entropia para estados fora do equilíbrio. A *equação de difusão de Boltzmann* – que dava suporte ao teorema H – implicava que qualquer distribuição inicial de velocidades evoluiria, sob dinâmica colisional, para uma distribuição *maxwelliana* – a única que permanecia *invariante*, nessas condições. Apesar disso, o teorema H foi atacado em várias frentes. Os partidários da *física energética* criticavam o compromisso metafísico com o atomismo, em alinhamento com o positivismo radical defendido por Ernst Mach (1838 – 1916). Mais sérias foram as objeções de William Thomson e Johann Loschmidt (1821 – 1895) que, respectivamente, em 1874 e em 1876, consideraram que o teorema H encerrava uma contradição insolúvel entre a noção de *irreversibilidade macroscópica* – na sua descrição da rota para o equilíbrio – e a noção de *reversibilidade microscópica* das leis da mecânica. Apesar dos resultados alcançados, Boltzmann ainda acreditava, nessa época, que seria possível derivar a segunda lei da termodinâmica a partir das leis da mecânica, razão pela qual a resposta aos ataques – e a sua conversão final à tese estatística – só apareceram em 1877. A chamada *definição estatística de entropia*,  $S = k \log \Omega$  – entropia como um modo de contar o

número  $\Omega$  de microestados acessíveis a um sistema físico isolado e em equilíbrio –, representou a elucidação completa da relação entre o conteúdo fenomenológico da segunda lei e o fundamento estatístico oriundo da análise dos graus de liberdade microscópicos. Segundo Boltzmann, a aparente contradição envolvida no teorema H poderia ser solucionada se se compreendesse que todo o conteúdo da irreversibilidade estava contido nas condições iniciais altamente improváveis estipuladas para o sistema físico, e não nas equações de movimento.

Muito embora, na década de 1890, a interpretação estatística para a entropia tenha sido fortemente criticada até mesmo por Planck – que, à época, estava filosoficamente alinhado com o positivismo de Mach e assumia uma atitude hostil com respeito ao atomismo –, os múltiplos desenvolvimentos da termodinâmica na direção de problemas em físico-química, no eletromagnetismo e nas reações químicas, permitiram que a mecânica estatística se estabelecesse de modo sólido. A esse respeito, foi fundamental a contribuição de Josiah Willard Gibbs (1839 – 1903). Gibbs iniciou suas investigações em termodinâmica em 1871. Porém, sua mais importante invenção, a *teoria de ensembles*, surgiu apenas em 1893. Com ela, o fundamento estatístico da termodinâmica se tornou claro e definitivo. Fundamentalmente alicerçada sobre o *princípio de energia*, a mecânica estatística de Boltzmann e de Gibbs representou uma renovação – em bases novas e insuspeitadas – do programa de explicação mecanicista, na medida em que, claramente, voltava a professar o compromisso metafísico com a redução dos fenômenos macroscópicos à realidade física mais fundamental de mecanismos microscópicos invisíveis. Contudo, o legado maior da mecânica estatística para o novo mundo da física quântica estaria em seus métodos, não em seus compromissos metafísicos.

## 5.6. Radiação de Corpo Negro e os Primórdios da Física Quântica

O teorema de equipartição havia se tornado uma pedra angular para a aplicação dos princípios da mecânica estatística aos problemas termodinâmicos da matéria e da radiação. Contudo, os sucessivos fracassos na obtenção da razão dos calores específicos dos gases começaram a criar uma fratura na compreensão da recém-descoberta conexão entre os mundos microscópico e macroscópico. Mesmo após Boltzmann ter formulado um argumento para mostrar como *cinco graus de liberdade* (por átomo) conduziriam a uma resposta realmente próxima do valor experimental esperado para gases diatômicos,  $\gamma \approx 1,4$ , a verdade é que apenas no contexto da *física quântica* foi possível explicar por que alguns graus de liberdade não eram excitados a baixas temperaturas, *violando o teorema de equipartição*. A esses fracassos sucederam outros – em problemas que não eram, necessariamente, mutuamente interconectados, nem eram centrais aos desenvolvimentos nas décadas finais do século XIX, mas que, à medida que resistiam às tentativas de solução, foram ganhando progressivamente importância. De fato, o que ocorria era que os limites da capacidade da física clássica e da adequação da visão mecanicista estavam sendo alcançados em várias outras frentes de investigação da estrutura da matéria – espectroscopia de átomos e de moléculas, efeito fotoelétrico, espalhamento de raios-X, radioatividade, etc. Além do problema dos calores específicos, também diretamente relacionado com o problema da validade do teorema de equipartição era o do *equilíbrio entre a radiação e a matéria*, mais especificamente, o problema de explicar *o espectro da radiação térmica em equilíbrio com as paredes da cavidade de um corpo negro*.

A primeira peça do quebra-cabeça foi fornecida por Boltzmann, ao derivar a chamada *lei de Stefan-Boltzmann*, segundo a qual a energia total irradiada por um corpo negro, por unidade de área, por unidade de tempo, em todo o

intervalo de frequências, é proporcional à quarta potência da temperatura  $T$ . A peça seguinte foi fornecida por Wilhelm Wien (1864 – 1928), ao demonstrar, em 1894, que a distribuição de energia eletromagnética, em função do comprimento de onda  $\lambda$ , deveria ser da forma  $\rho(\lambda, T) = \lambda^{-5}\phi(\lambda T)$ . A função  $\phi(\lambda T)$  só podia ser obtida experimentalmente. Em 1896, Wien propôs que ela deveria ser da forma  $\phi(\lambda T) = A \exp(-B/\lambda T)$ , com  $A$  e  $B$  constantes positivas (*lei de Wien*). Entretanto, os sucessivos experimentos realizados na região visível do espectro (1899) e na região infravermelha (1900) – limite de baixas frequências e altas temperaturas – evidenciaram que a lei de Wien estava errada. Também por volta de 1900, William Strutt (*Lord Rayleigh*, 1842 – 1919) descobriu, teoricamente, um problema igualmente grave na região ultravioleta – a divergência de  $\rho(\lambda)$ , no limite  $\lambda \rightarrow 0$ . Considerando que a radiação no interior da cavidade podia ser modelada como um conjunto (infinito) de ondas estacionárias (modos normais de um oscilador harmônico), Rayleigh demonstrou que a distribuição da energia deveria ser tal que, no limite de altas temperaturas,  $\rho(\lambda, T) = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$  (fórmula de Rayleigh–Jeans). A chamada *catástrofe ultravioleta* colocava o teorema da equipartição em cheque, pois era resultado direto de sua aplicação.

A peça final do quebra-cabeça foi obra de Max Planck (1858 – 1947), que havia se dedicado ao problema do corpo negro no período entre 1897 e 1899, na sequência de suas preocupações envolvendo a conexão entre a termodinâmica fora do equilíbrio e a teoria eletromagnética. Em 1900, o acúmulo de evidências experimentais contrárias à lei de Wien levaram-no a propor a primeira fórmula bem-sucedida para a distribuição de energia,  $\rho(\nu, T) = \frac{C\nu^3}{\exp(B\nu/T) - 1}$ , cujas duas constantes livres,  $C$  e  $B$ , permitiram ajustar perfeitamente os resultados experimentais. Porém, a fórmula de Planck era apenas *empírica*. Isso significa que, além de não ter sido proposta com base nos princípios de uma teoria, ela *nada tinha a ver com a ideia de quantização*, embora já apresentasse a forma correta

do que passaria a ser conhecido por *lei de Planck*. Na ocasião da proposição de sua fórmula empírica, Planck utilizou um argumento *ad hoc*, exclusivamente termodinâmico, mostrando como uma *interpolação matemática* entre a lei de Wien – válida no limite de altas frequências e baixas temperaturas – e a fórmula de Rayleigh–Jeans – válida no limite de baixas frequências e altas temperaturas – reproduzia os espectros observados. Já nessa ocasião, *ele obteve a expressão da entropia termodinâmica correspondente*, ainda dependente das constantes livres C e B. Porém, em seguida, procurou por uma justificção mais sólida.

Planck já havia reconhecido a necessidade de modelar a *interação* da radiação com os átomos das paredes da cavidade. Em 1859, Kirchhoff havia demonstrado que o espectro de corpo negro não dependia da natureza específica das paredes. Essa característica de *universalidade* era particularmente intrigante e impressionou Planck profundamente. Convencido da existência de uma lei fundamental por detrás desse fenômeno, ele não teve dificuldades em assumir que as paredes da cavidade consistiam de osciladores harmônicos carregados amortecidos, de modo que cada dipolo oscilante absorvia e emitia radiação eletromagnética – um problema que, desde Hertz, havia sido bastante estudado. Também em 1899, Planck conseguiu demonstrar um resultado importantíssimo: que a distribuição de energia da radiação na cavidade devia estar relacionada com a *energia média*  $E_\nu(T)$  de um oscilador harmônico de frequência  $\nu$ , através da expressão  $\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} E_\nu(T)$ . Estatisticamente, a energia média deve ser obtida a partir da *lei de distribuição* – ou, equivalentemente, no caso clássico, do teorema de equipartição – e, se essa lei for a de Maxwell-Boltzmann, a lei de Rayleigh segue-se, necessariamente. Portanto, era necessário um caminho diferente.

Planck julgou tê-lo encontrado ao abandonar sua abordagem exclusivamente termodinâmica e se voltar para o modo como Boltzmann tratou o problema de contagem

na definição da entropia estatística. Primeiramente, ele calculou o número total de modos de distribuir a energia total  $E_N = P\varepsilon$  entre  $N$  osciladores de tal modo que a energia total fosse um múltiplo inteiro ( $P$ ) de uma quantidade finita  $\varepsilon$ . Em seguida, *ele realizou um passo completamente arbitrário: postulou que esse número total de modos deveria ser a probabilidade  $\Omega$  a ser considerada na expressão da entropia estatística  $S = k \log \Omega$* . O fato é que *esse passo carecia completamente de qualquer justificativa e sentido*. Uma das interpretações em voga sugere que Planck o realizou tendo em vista exclusivamente a recuperação da sua já previamente alcançada *entropia termodinâmica*. De fato, com isso, bastou que ele utilizasse a segunda lei da termodinâmica, na forma da relação entre energia e entropia,  $(\partial S / \partial E)_V = T^{-1}$ , para deduzir a forma correta que deveria ser imposta para a energia média  $E_V(T)$  e, desse modo, recuperar a sua fórmula empírica. A essência da demonstração estava no modo como ele chegou à entropia estatística  $S$ . Em última instância, o que Planck fez era equivalente a impor que *a energia trocada entre os osciladores e a própria radiação fosse discretizada*. Isso significava que, para cada frequência  $\nu$ , a energia de cada oscilador só podia ser trocada com a radiação em *quantidades discretas*, de valor  $\varepsilon = h\nu = hc / \lambda$  – em que  $h$  era uma constante que se tornaria, juntamente com a velocidade da luz  $c$  e a constante gravitacional  $G$ , uma das três *constantes fundamentais da natureza*: a *constante de Planck*. O procedimento de Planck era uma variação do procedimento de Boltzmann que, se fosse estritamente seguido, deveria exigir o limite  $\varepsilon \rightarrow 0$ . Apesar da nova demonstração, sua natureza extravagante e, principalmente, a ausência de justificativa com respeito ao último passo mostram que o argumento de Planck ainda tinha natureza *ad hoc*.

A propósito, observe-se que Planck também não realizou a quantização do campo eletromagnético – feito realizado por Einstein, com o conceito de *fóton*, no contexto de sua solução para o problema do *efeito fotoelétrico*. Isso, entretanto, representava uma clara contradição: enquanto a energia

irradiada pelos osciladores se distribuía *continuamente* através do campo, ela não era emitida continuamente ao longo da oscilação, mas descontinuamente, e apenas quando ocorria uma abrupta variação na amplitude de cada oscilador. Esse fato, entre outros, esteve na base do motivo pelo qual a nova *hipótese quântica* seria encarada com muita desconfiança, até mesmo pelo próprio Planck. Os trabalhos de Einstein, nesse sentido, foram fundamentais para que a hipótese passasse a ser, paulatinamente, assimilada no seio da comunidade científica. Contudo, algum tempo ainda seria necessário para que uma verdadeira *mecânica quântica* viesse a ser construída.





## Epílogo

**D**e acordo com William Thomson, duas nuvens obs-  
cureciam os horizontes da física, ao final do século  
XIX, ameaçando a clareza e a beleza das teorias  
dinâmicas do calor e da luz: a hipótese do *éter luminífero* –  
fundamento da ótica e do eletromagnetismo clássicos – e o  
teorema de *equipartição de energia* – que estabelecia a conexão  
entre a mecânica estatística e a termodinâmica clássicas.  
Essas duas nuvens prenunciavam as duas revoluções que,  
no início do século XX, puseram fim ao império da visão de  
mundo mecanicista. É altamente emblemático que os nasci-  
mentos da relatividade especial e da física quântica tenham  
sido ambos marcados pela interação conflituosa entre a ótica  
e o eletromagnetismo, por um lado, e a mecânica e a ter-  
modinâmica, por outro. No caso da relatividade especial,  
a mecânica teve que ceder, e o resultado foi que a *metafísica  
do contínuo*, veiculada e articulada pelo conceito de campo,  
adentrou definitivamente o seu reino. No caso da física quân-  
tica, é possível dizer que ocorreu exatamente o oposto. Dessa  
vez, foi o eletromagnetismo que teve que ceder, e o resultado  
foi sua invasão por parte da *metafísica do discreto*, veiculada e  
articulada pelo atomismo. Como resultados colaterais des-  
ses processos, as categorias clássicas de *espaço*, de *tempo* e de  
*matéria* passaram por transformações drásticas. Essas trans-  
formações foram resultado da identificação e da crescente

importância adquirida pela noção dual *metateórica* de *simetria/conservação*, mas também da redução *interteórica* operada entre *matéria e energia* e da definitiva assimilação, no interior da física, da noção de *probabilidade* como um elemento não apenas epistemológico, mas – ainda que controversamente – *ontológico*.

Essas considerações são esquemáticas. Não se deve ver nelas muito mais do que chaves de leitura e de interpretação, entre outras possíveis. Do mesmo modo, é uma chave de leitura esquemática a visão de que a história da física clássica tenha sido o processo de ascensão e consecução, até as últimas consequências, de uma visão de mundo – *a visão mecanicista* – e, subsequentemente, o processo de sua exaustão e derrocada, que culminaram em sua superação definitiva. Os adventos da relatividade especial e da física quântica são os resultados das etapas finais desse processo. Uma leitura kuhiana – a despeito de todas as suas limitações – permite falar, nesse caso, de quebras de paradigma. O que não constitui, de fato, uma má leitura, contanto que não percamos de vista o fato de tratar-se de um esquema de interpretação. Nesse sentido, a visão mecanicista foi dominante enquanto ainda era possível explicar o conjunto dos fenômenos físicos pela postulação de mecanismos invisíveis – pelo menos, por parte daqueles que viam nas hipóteses metafísicas uma parte indispensável das próprias teorias científicas. Por um lado, as hipóteses metafísicas, gestadas no seio da visão mecanicista, frequentemente representaram os motores heurísticos sem os quais dificilmente ela teria atingido os seus mais altos cumes. Por outro lado, à medida que uma crescente quantidade de fenômenos começou a resistir às suas metodologias de investigação e a desafiar sua ontologia e suas categorias de explicação, os motores heurísticos passaram de funcionar e as posturas mais antimetafísicas passaram a contribuir com uma atitude de moderação e prudência, preconizando uma suspensão das crenças, pelo menos até

que a situação pudesse se tornar novamente clara e controlável. Isso, evidentemente, não podia ser feito sem que novos padrões metodológicos e epistemológicos fossem criados e, principalmente, sem que mudanças radicais nas ontologias fossem realizadas. Felizmente, a própria visão mecanicista foi capaz de produzir a nova categoria de explicação que permitia essa transformação. Movimentos pendulares entre realismo e antirrealismo, na história do pensamento, das ideias e da cultura, são antes a regra do que a exceção.

Tanto no aspecto ontológico quanto no epistemológico, não há dúvidas de que a nova mecânica quântica assomou como a grande revolução. Foi em seu seio que as reverberações das ultrapassadas metafísicas do contínuo e do discreto puderam encontrar eco e se consubstanciar em uma nova categoria de entendimento que – na falta de um termo mais adequado – passou a ser iconicamente representada pela noção de *dualidade onda-partícula*. Contudo, a síntese operada entre o discreto e o contínuo ainda estava incompleta. Para colocar, de modo definitivo, os conceitos de campo e de energia (e demais *quantidades conservadas*) na base de todos os desenvolvimentos posteriores da física, foi necessário realizar o casamento entre a relatividade especial e a mecânica quântica. Desse casamento, surgiu a moderna *teoria de campos e partículas*, até o presente momento, a nossa melhor e mais bem-sucedida teoria da realidade. Infelizmente – ou felizmente – novas nuvens obscureceram os céus nunca completamente limpos da física do século XX. Entre elas, a virtual impossibilidade de reduzir a gravitação a uma teoria de campos quântica e a descoberta de que, em escala cosmológica, tudo o que conhecíamos até poucas décadas atrás e julgávamos esgotar completamente a realidade não passa de uma reduzida porção. Juntos, *gravidade, matéria escura e energia escura* representam o que há de mais enigmático no horizonte da física do século XXI.



# Referências

- Abrantes, P. *Imagens de Natureza, Imagens de Ciência*. Papyrus, Campinas-SP, 1998.
- Aristóteles. *Physics*. Waterfield, R. (trad.). Oxford University Press, 2008.
- Aristóteles. *Metaphysics*. Sachs, J. (trad.). Oxford University Press, 2008.
- Batterman, R. (ed.) *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics*. Oxford University Press, 2013.
- Boyer, C. B. *História da Matemática*. Edgar Blücher LTDA, São Paulo, 1974.
- Buchwald, J. Z., Fox, R. (eds.) *The Oxford Handbook of The History of Physics*. Oxford University Press, 2013
- Bunge, M. *Física e Filosofia*. Editora Perspectiva, São Paulo, 2000.
- Burt, E. A. *As Bases Metafísicas da Ciência Moderna*. Editora UnB, Brasília, 1984.
- Cushing, J. T. *Philosophical Concepts in Physics*. Cambridge University Press, 1998.
- Darrigol, O. *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford University Press, 2000.
- Descartes, R. *Principles of Philosophy*. Miller, V. R. e Miller, R. P. (trads.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1983.

- DeWitt, R. *Worldviews: an introduction to the history and philosophy of science*. Wiley-Blackwell, USA, 2010.
- Dugas, R. *A History of Mechanics*. Dover Publications, New York, 1988.
- Dutra, L. H. A. *Introdução à Teoria da Ciência*. Editora da UFSC, Florianópolis, 1998.
- Feldman, R. *Epistemology*. Prentice Hall, New Jersey, 2003.
- Galilei, G. *Dialogues Concerning the Two Chief World Systems*. Drake, S. (trad.), University of California Press, USA, 1967.
- Galilei, G. *Dialogues Concerning Two New Sciences*. Prometheus Book, New York, 1991.
- Giere, R. N. *Explaining Science: a cognitive approach*. University of Chicago Press, 1988.
- Godfrey-Smith, P. *Theory and Reality: an introduction to the philosophy of science*. University of Chicago Press, 2003.
- Grant, E. *Physical Science in the Middle Ages*. Cambridge University Press, 1977.
- Hall, M. B. *The Scientific Renaissance 1450-1630*. Dover Publications, New York, 1994.
- Hankins, T. L. *Science and Enlightenment*. Cambridge University Press, 1985.
- Harman, P. M. *Energy, Force and Matter, the Conceptual Development of Nineteenth-Century*. Cambridge University Press, 1982.
- Heilbron, J. L. *Was There a Scientific Revolution?* em *The Oxford Handbook of The History of Physics*. Buchwald, J. Z., Fox, R. (eds.). Oxford University Press, 2013.
- Holton, G., Brush, S. G. *Physics, The Human Adventure: From Copernicus to Einstein and Beyond*. Rutgers University Press, New Brunswick, 2001.
- Hume, D. *Investigação Acerca do Entendimento Humano*. Editora Universidade de São Paulo, 1972.

- Jammer, M. *Concepts of Space: The History of Theory of Spaces in Physics*. Dover, New York, 1993.
- Jammer, M. *Concepts of Force: A Study in the Foundations of Dynamics*. Dover, New York, 1999.
- Jammer, M. *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*. Dover, New York, 1997.
- Jaynes, E. T. *The Evolution of Carnot's Principle, em Maximum-Entropy and Bayesian Methods in Science and Engineering*. Erickson, G. J., Smith, C. R. (eds.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988.
- Kalkavage, P. *Plato's Timaeus*. Focus Publishing, Newburyport, 2001.
- Koyré, A. *Études Galiléennes*. Hermann, Paris, 1966.
- Koyré, A. *Newtonian Studies*. Chapman & Hall, Londres, 1965.
- Kuhn, T. *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press, 1962.
- Kuhn, T. *Blackbody Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*, Clarendon Press, Oxford, 1978.
- Lindberg, D. C. *The Beginnings of Western Science*. University of Chicago Press, 2007.
- Lloyd, G. E. R. *Early Greek Science: Thales to Aristotle*. W.W. Norton & Company, New York, 1970.
- Lloyd, G. E. R. *Greek Science: after Aristotle*. W.W. Norton & Company, New York, 1973.
- Longair, M. S. *Theoretical Concepts in Physics*. Cambridge University Press, 1984.
- Longair, M. S. *Quantum Concepts in Physics*. Cambridge University Press, 2013.
- Lowe, E. J. *A Survey of Metaphysics*. Oxford University Press, 2002.
- Loux, M. J. *Metaphysics, a contemporary introduction*. Routledge, Nova York, 2002.
- Maudlin, T. *Philosophy of Physics: Space and Time*. Princeton University Press, 2012.

- Newton, I., Cohen, I. B., Whitman, A. *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*. University of California Press, Berkeley, 1999.
- Olavo, L. S. F. *Panorama do Desenvolvimento Histórico dos Conceitos da Física*, vols. 1 e 2. Não publicado.
- R. K. Pathria. *Statistical Mechanics*. Elsevier, UK, 1972.
- Pav, P. A. *Gassendi's Statement of the Principle of Inertia*, *Isis*, v. 57, nº 1, 1966, p. 24.
- Polito, A. M. M., Olavo, L. S. F. *A Filosofia da Natureza dos Pré-Socráticos*. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v. 30, n. 2: p. 323-361, 2013.
- Polito, A. M. M. *Galileu, Descartes e uma Breve História do Princípio de Inércia*. *Physicae Organum*, v. 1, n. 1, pag. 1, 2015.
- Polito, A. M. M. *A Metafísica e a Física de Aristóteles*. *Physicae Organum*, v. 1, n. 2, pag. 1 (2015).
- Popper, K. *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. Routledge, London, 1963.
- Popper, K. R. *A Lógica da Pesquisa Científica*. São Paulo: Cultrix, 1993.
- Purrington, R. D. *Physics in the Nineteenth Century*. Rutgers University Press, New Jersey, 1997.
- Reale, G., Antiseri, D. *História da Filosofia*, vols. 1, 2 e 3. Ed. Paulus, São Paulo, 1990.
- Schurtz, G. *Philosophy of Science – A Unified Approach*. Routledge, New York, 2013.
- Schuster, J. *Cartesian Physics*, em *The Oxford Handbook of The History of Physics*. Buchwald, J. Z., Fox, R. (eds.). Oxford University Press, 2013.
- Sklar, L. *Philosophy of Physics*. Westview Press, Colorado (USA), 1992.
- Sklar, L. *Philosophy and the Foundations of Dynamics*. Cambridge University Press, 2013.



- Swerdlow, N. M. *Galileo's Mechanics of Natural Motion and Projectiles*, em *The Oxford Handbook of The History of Physics*. Buchwald, J. Z., Fox, R. (eds.). Oxford University Press, 2013.
- Torretti, R. *The Philosophy of Physics*. Cambridge University Press, 1999.
- Westfall, R. S. *The Construction of Modern Science, Mechanisms and Mechanics*. Cambridge University Press, 1977.
- Whittaker, E. T. *A History of the Theories of Aether and Electricity: from the Age of Descartes to the Close of the Nineteenth Century*. BiblioLife Reproduction Series, 2009.







## Livros da Série MNPEF

SIMULAÇÃO E MODELAGEM  
COMPUTACIONAL COM  
O SOFTWARE MODELLUS:

Aplicações práticas para o ensino  
de física

*Marcelo Esteves de Andrade*

A CONSTRUÇÃO DA  
ESTRUTURA CONCEITUAL DA  
FÍSICA CLÁSSICA

*Antony M. M. Polito*

MECÂNICA QUÂNTICA:

Um curso para professores da  
Educação Básica

*Silvana Perez*

FÍSICA E MÚSICA

*Maria Lúcia Grillo*

*Luiz Roberto Perez*

*(Organizadores)*

MECÂNICA QUÂNTICA BÁSICA

*Marcel Novaes*

*Nelson Studart Filho*



**A** *Construção da Estrutura Conceitual da Física Clássica* é o resultado da compilação de notas de aula escritas para meus cursos de história da física da Universidade de Brasília. Trata-se de um texto compacto e denso, mas direto. Procurei selecionar temas que permitissem narrar o processo de ascensão e de queda da chamada visão de mundo mecanicista, cujos marcos históricos inicial e final são, respectivamente, a Revolução Científica do século XVII e o advento da relatividade especial e da física quântica, ao final do século XIX. Há, nesse texto, duas preocupações básicas. A primeira, a de que fosse perpassado por e interpretado à luz de alguns conceitos básicos da filosofia da ciência. A meu ver, esse é o único modo significativo de narrar a sua história. Em segundo lugar, a de que ele consista em uma narrativa que possua um fio condutor ininterrupto e que seja capaz de dar sentido e unidade ao conjunto dos episódios narrados. Embora isso pareça implicar o risco de anacronismo, é importante observar que não há história que não seja uma reconstrução racional. E, muito embora seja falso que a história da ciência seja um processo de acumulação contínua, dirigido para fins pré-determinados, é verdade que nenhum período histórico ignora o seu próprio passado. A história da ciência possui uma racionalidade e, desse ponto de vista, não é, jamais, um eterno reconstruir-se a partir do nada.



**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física

