

5.2. *Tempo, Matéria, Espaço: a Teoria da Relatividade Especial* 85

espaço. É uma simetria igualmente importante e está relacionada com o princípio de inércia, já que este princípio também nos diz que, se um conjunto de objetos interagentes está livre de forças externas, então seu momento linear total se conserva. Ademais, há um ponto, o *Centro de Massa* do sistema, que se move com velocidade constante. A ausência de forças externas nos diz que o espaço é uniforme, havendo uma simetria conforme andamos em uma determinada direção. Para a Teoria da Relatividade será importante notarmos que o quarteto tempo-espaço está relacionado com o quarteto energia-momento.

5.2 **Tempo, Matéria, Espaço: a Teoria da Relatividade Especial**

A Teoria Eletromagnética trouxe-nos a grande revolução de idéias no final do século XIX. Conhecimentos de eletricidade e de magnetismo remontam a vários séculos. Já os antigos conheciam as *pedras magnéticas* e sua ação sobre o ferro. Pierre de Maricourt experimentou sobre agulhas e pólos por volta de 1269. Gilbert, por volta de 1600, conhecia rudimentos de eletricidade. No entanto, foi com a conceituação de campos, no século XIX, que houve uma grande revolução em direção ao que não era visto mas existia. Campos existem e agem sem que pareçam ter realidade objetiva no sentido humano. Têm, na verdade, realidade objetiva dentro da ciência. É o início da ciência do invisível, do microscópico ou do que na época parecia irreal, mágico. Os campos serão agentes que levam a ação das fontes a grandes distâncias.

O movimento unificador da física foi ganhando força, e o eletromagnetismo viria a ter um papel fundamental dentro da fundamentação dos conceitos. Foi uma época da maior importância histórica, concomitante a Napoleão, ao Congresso de Viena, às revoluções de 1830 e 1848 e às unificações da Alemanha e da Itália. O eletromagnetismo mudaria o conhecimento técnico do ser humano a pontos jamais igualados até aquele momento. Foram inventados os motores que trabalham para o homem, o

telégrafo, precursor do telefone, e a lâmpada. Bem posteriormente, veríamos desenvolvimentos tais como aqueles utilizados nos meios de comunicação, a internet e a teia universal, a conhecida *world wide web*, sempre como consequência da Teoria Eletromagnética.

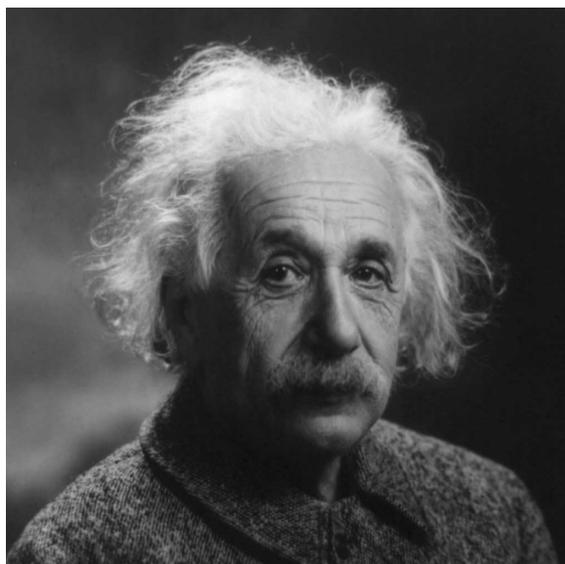


Figura 5.3. *Albert Einstein, (* Ulm, Alemanha, 1879; † Princeton, EUA, 1955). Físico alemão, um dos cientistas mais importantes da história, foi pioneiro em todos os novos campos da Física do início do século XX.*

No início, havia a eletricidade e o magnetismo como fenômenos separados. A descoberta da lei de indução de Faraday, segundo a qual um campo magnético variável induz um fenômeno elétrico, juntou os dois fenômenos em uma estrutura comum. No final do século XIX, Maxwell propôs um novo termo na quarta e última das equações que levam seu nome. Tal proposta foi um salto puramente teórico, baseada em argumentos de simetria e consistência com a hipótese de conservação da carga elétrica. O conjunto das quatro equações de Maxwell levou a uma total reinterpretação do mundo, por conta de uma aparentemente pequena, mas na realidade profunda, diferença em relação à teoria de Galileo-Newton. A ciência de Galileo-Newton era mecânica, direta, diríamos exageradamente real. Longe de ser uma crítica,

5.2. Tempo, Matéria, Espaço: a Teoria da Relatividade Especial⁸⁷

esta é uma situação real de evolução de conceitos. O primeiro conhecimento é próximo, empírico. Corre em certo sentido, contrariamente ao que se fazia entre os gregos, onde os conhecimentos eram primeiramente teóricos, provenientes do fundo do eu, místicos, sendo agora baseados em fatos empíricos associados a uma estrutura matemática poderosa.

Foi portanto no século XIX que os experimentos mostraram uma teoria eletromagnética extremamente sofisticada que terminou por unificar os conceitos de eletricidade e magnetismo, mostrando que a física clássica de Galileo e Newton chegava a seus limites. De fato, no contexto do eletromagnetismo, como consequência das equações de Maxwell, não se pode ter uma geometria euclidiana e um tempo absoluto, tal como preconizado pela física clássica. A luz tinha a mesma velocidade tal como vista por observadores parados ou em movimento. Isto é uma grande mudança de conceitos. Se correremos atrás de um carro em movimento, podemos alcançá-lo. Se andarmos em direção a alguém vindo em nossa direção, nós nos encontraremos mais rápido. No entanto, se correremos atrás da luz, jamais a alcançaremos, e se formos ao seu encontro, ela não chegará mais rápido. Portanto, as regras usuais da geometria, tais como formuladas por Euclides, não se aplicam à física e outra geometria teve que ser encontrada. Em outras palavras mais simples, por mais que nos esforcemos em correr atrás de um feixe luminoso, ele sempre se distanciará de nós com a mesma e universal velocidade, *a velocidade da luz*, equivalente a cerca de 300 000 km/s.

A consequência deste novo tipo de conceituação foi o advento da Teoria da Relatividade, que preconiza um contínuo quadridimensional espaço-tempo, ou seja, tempo e espaço passam a ser facetas diferentes de uma mesma descrição do mundo. Renova-se a posição do observador, cuja importância fica cada vez maior para que se faça a descrição do mundo exterior: toda a base da Teoria da Relatividade é gerada argumentando-se com a equivalência de diferentes sistemas de observação.

A Mecânica Clássica de Galileo-Newton tem uma série de pressupostos, tácitos para os menos avisados. Em primeiro lu-

gar, há uma escala de tempo universal. A descrição do tempo é uma das tarefas mais difíceis da física. Uma descrição cosmológica na época de Galileo não só teria sido impossível em termos práticos, como também levaria a conclusões incompatíveis com o conhecimento da época. Em termos filosóficos, Santo Agostinho compreendeu que o tempo poderia ter um início, antes do qual o próprio tempo não teria existido. Tal colocação é semelhante à proposta mitológica grega, onde Cronos (Tempo) teria trazido o mundo à sua existência.

Como aplicação do método científico de análise dos fatos, é perfeita a colocação de Galileo-Newton de um tempo absoluto, sem início ou fim, descrito através de qualquer mecanismo repetitivo. A descrição do espaço é análoga. Sua característica é aquela da geometria de Euclides, o chamado espaço plano. Tais descrições envolvem várias simplificações. Em primeiro lugar, há uma simetria ligada ao correr do tempo. Se este não tem início ou fim, há alguma entidade que se conserva com o seu decorrer, descrevendo a infinitude da espera. Este fato é conteúdo de um teorema matemático no âmbito da mecânica. A quantidade conservada associada ao passar do tempo é a energia, a pedra dourada da física. De forma análoga, a infinitude do espaço, e o fato de qualquer ponto do espaço ser semelhante a um outro ponto aleatório, está associada à conservação da quantidade de movimento.⁹

O caráter universal do tempo juntamente com a descrição euclidiana do espaço levam a regras de cálculo de velocidade para diferentes observadores na mecânica clássica. Não importa de onde observamos um fato, se estivermos parados, correndo, num trem, avião ou navio, há regras específicas que traduzem as leis de movimento de um observador a outro: basta que das velocidades dos corpos subtraímos nossa própria velocidade! Deste modo algebricamente simples chegamos a um dicionário que traduz um fato visto por um observador parado, em outro visto por um observador em movimento.¹⁰ Em resumo, em um trem com certa

⁹Numericamente, igual à massa vezes a velocidade, na mecânica clássica.

¹⁰No caso consideramos um movimento com velocidade constante. Outros

5.2. Tempo, Matéria, Espaço: a Teoria da Relatividade Especial⁸⁹

velocidade, onde há uma bola em movimento, um observador da plataforma verá a bola mover-se com uma velocidade que é a soma das velocidades do trem em relação à plataforma e da bola em relação ao trem, um resultado intuitivo.

O que acontece no eletromagnetismo? As equações de Maxwell, integrando a eletricidade e o magnetismo, têm soluções que descrevem ondas ditas eletromagnéticas, em cujo interior os campos elétricos e magnéticos se alternam em geração mútua constante. Na época, as chamadas ondas Herzianas foram descobertas experimentalmente por Herz. Mais que isto, o ponto mais intrigante de toda esta história é que a velocidade da onda eletromagnética é uma constante universal! Ela não depende do observador, esteja ele no trem, no avião, no chão, em um navio, ele sempre observa a mesma velocidade, em flagrante contradição com a mecânica clássica descrita em termos da geometria euclidiana e do tempo universal!

Tentou-se na época uma explicação plausível para o fenômeno, que mantivesse a estrutura da mecânica clássica. Para isto pensou-se que, sendo a luz uma onda, ela deveria se mover em um meio físico, como as ondas que se formam no mar. Decidiu-se procurar este meio, chamado éter, no qual o eletromagnetismo percorreria de forma parecida com o caminhar de uma onda de perturbações sobre as águas planas de um lago ou das próprias ondas do mar.

Houve uma famosa experiência, feita no final do século XIX, por Michelson e por Morley. Eles enviaram uma mesma onda por caminhos ligeiramente diferentes. Esperava-se com isto, levando-se em conta o movimento da terra em relação ao éter universal, perceber-se uma pequena diferença entre as velocidades das duas partes da mesma onda. Portanto esperava-se um retardamento de uma das partes. O resultado foi nulo, isto é, não havia qualquer retardo da onda ao percorrer caminhos diferentes! Tínhamos o início de uma revolução do pensamento, parte de uma revolução ainda maior das idéias, que se daria no início do século XX.

movimentos são possíveis, mas mais complicadas são as regras de transformação.

A experiência brevemente descrita acima levou os físicos a um grande número de hipóteses relativas às ondas eletromagnéticas. Não existindo o éter universal, e sendo a velocidade da luz uma constante universal, uma grande reinterpretação da física seria necessária. Vários trabalhos importantes foram feitos na época. Devemos destacar as hipóteses de contração do espaço na direção do movimento e os trabalhos de Lorentz e de Poincaré, culminando com a reinterpretação de Einstein, que é a Teoria da Relatividade Especial, de 1905.

Como hipóteses, a Teoria da Relatividade supõe a independência da forma das leis físicas em relação ao observador, e a constância universal da velocidade da luz. As conseqüências são enormes. O que nos interessa no momento é a reinterpretação dos conceitos de espaço e tempo, principalmente o último, que passa a ter uma posição muito similar à do espaço: termina assim o conceito de tempo absoluto. Foi a queda de um gigante do mundo das idéias: a nova interpretação do tempo é algo mais próximo à de um coadjuvante, um rótulo de acontecimentos que deixa de conter a idéia do absoluto, vinda anteriormente através da física de Galileu e de Newton.

Agora, cada observador conserva uma idéia mais própria do passar do tempo. Para um viajante espacial com grandes velocidades, segundo a Teoria da Relatividade, o tempo passa de modo bastante mais vagaroso. Ao final de sua viagem, quando de retorno à Terra, ele estará mais jovem que seus contemporâneos!

Tal reinterpretação da variável temporal é uma das entradas para a revolução científica que se processou no século XX. Foi a primeira grande mudança ocorrida no âmbito da física clássica. O ideário clássico romântico, já tornado realista na literatura, tem nova faceta, desta vez científica, em direção ao modernismo. Todavia esta não é a única mudança, apesar da nova interpretação ser de grande impacto.

As mudanças tiveram que se estender para outros âmbitos dentro da própria mecânica. A famosa equivalência entre massa e energia originou-se nestas mudanças, levando a objetos mais sombrios, como a bomba atômica. O espaço-tempo e a matéria

passaram a descrever o mundo de modo mais fundamental. As próximas mudanças dentro do edifício da física iriam aprofundar ainda mais todas estas mudanças.

Todavia, a descrição de Pitágoras ou Kepler, segundo a qual a geometria é o arquétipo da beleza do mundo, continua válida na Teoria da Relatividade, e certamente esteve dentro dos caminhos mentais de Einstein, cujos arquétipos eram clássicos e matemáticos. Assim, o paradigma de Kepler se repetiria, agora em condições diferentes. O mesmo paradigma será uma das mo-las mestras de novas teorias.

5.3 A Ordem Temporal

Dentro do pensamento clássico, não parece haver possibilidade de pensamento sem a ordem temporal. Toda a lógica parece estar baseada numa existência, no mínimo implícita, do tempo e de sua evolução. A lógica necessita de implicações que indicam que um elemento *antecede* outro, e que portanto há uma ordem subjacente. Parece haver uma ordem natural. Apesar deste argumento não ter sido explicitamente formulado, ele descreve bem o tipo de compreensão que os clássicos têm do tempo.

Assim, não parece haver lógica num ambiente desprovido de tempo, isto é, deve haver uma indicação de direção e sentido no caminhar do tempo, e certamente um conceito de causalidade subjacente deve imperar.

É assim que se torna natural o tempo absoluto de Newton. Difícil de ser definido, todavia aceito por qualquer ser pensante, porquanto intrínseco ao pensamento. O tempo relativo, característico da teoria da relatividade, assim como o tempo da teoria quântica, com aspectos não mensuráveis, colocam-se em um patamar de idéias pouco acessível.

Por outro lado, temos o espírito da Igreja, cujo paradigma pós-medieval foi a grandiosidade de sua própria presença, objetivada na imensidão da catedral de *San Pietro*. Qual não teria sido a admiração da mesma nos idos mil e quinhentos! Neste

caso, a sociedade tentava ser atemporal. O inferno e o paraíso tomavam aspectos eternos, e a estupefação jamais se dissipava. O universo deveria ser perfeito, estático, finito. Não havia lugar para evolução ou progresso. A imagem do inferno de Dante era estática, os próprios atores tinham uma imagem estática do mundo, enquanto o mundo físico tinha uma corrida temporal.

A modernidade, permeada de idéias de evolução permanente, dentro do iluminismo, volta ao classicismo, à realidade renascentista de procura de ideais humanos e belos. Era natural a existência de um tempo universal e absoluto que contivesse a idéia evolutiva, base da Revolução Francesa.

Qual é a relação entre tal realidade pré-moderna e a filosofia Agostiniana? O fato de Agostinho ter sido o paradigma da reforma, fazendo-se espelhar em Calvino, teria sido um ponto de cisão na linha de pensamento vigente no Ocidente. As idéias de Agostinho relativas ao tempo e seu início mostram sinais de modernidade.

A visão moderna de tempo é baseada na Teoria da Relatividade Geral. Neste caso, se por um lado o tempo não passa de um parâmetro com o qual se mede o evoluir dos fatos colocando-os em ordem de acontecimento, e portanto uma simples variável de descrição do mundo, seu significado intrínseco passa a colocar problemas seríssimos para se chegar a uma compreensão de fato. Em primeiro lugar, o problema mais importante vem das simetrias da física. As leis fundamentais da física são simétricas por *inversão temporal*, o que significa que qualquer fenômeno simples, se fosse filmado, poderia ser visto com o filme passando para trás. Isto é fato corriqueiro para fenômenos simples, como por exemplo duas esferas chocando-se uma contra a outra (como em um jogo de bilhar). Se filmarmos e passarmos o filme para trás, obteremos uma situação tão fisicamente possível como a situação realmente filmada. O mesmo não se pode dizer, por exemplo, da quebra de um ovo. Apesar das leis da física serem as mesmas, há uma situação que de fato não se processa. Tal impossibilidade de se passar um fenômeno para trás no tempo é descrito por uma função fenomenológica, a *entropia*, regida por

leis próprias, as *Leis da Termodinâmica*, que dizem, em particular, que a *entropia* sempre aumenta em processos físicos.

Na Relatividade Geral, a situação não é diferente, e mesmo havendo uma direção para a direção do tempo, não se descobriu até o presente uma função fundamental que tome o papel da entropia do sistema cosmológico¹¹. Como o tempo cosmológico permeia toda a existência do universo, incluindo, em especial, a vida, passa a ser fundamental a compreensão mais detalhada de seu papel na evolução existencial. Neste caso há duas vertentes de discussão. A primeira é puramente bio-sociológica, a segunda do pensamento, ligada à nossa estrutura psíquica.

A estrutura do tempo para o homem toma também dimensão de maior transcendência. É claro que o passar do tempo físico, através da evolução natural dos processos físicos, prepondera, mas a questão da evolução, da vida e da morte dentro dos âmbitos pessoal e social tomam novas formas, e sua compreensão torna-se ainda mais difícil.

O misticismo e o tempo formam uma configuração bastante singular, e se misturam com grande freqüência. A visão antiga do tempo, como um simples fluir, presente na física newtoniana, ainda está presente em nossas vida. Mas a questão do antes, do infinito para trás, gera novos problemas filosóficos para sua compreensão. O problema do início é fundamental, já que um infinito para trás nos leva a problemas formidáveis sobre a evolução tanto do homem como do cosmos. Cronos como a divindade que nos trouxe o tempo ou o início bíblico foram soluções aceitáveis, e até mesmo melhoradas na versão agostiniana.

A estrutura de compreensão do tempo está muito ligada à nossa compreensão da vida. Vimos que a visão da religião clássica baseava-se em um mundo temporal, com um céu atemporal, eterno, mas com um fluir diverso do tempo. As religiões ocidentais têm uma tendência a considerar o fluir do tempo como parte do mundo. A visão mais abrangente de vários Universos nos dá a possibilidade de transcender à questão temporal.

¹¹Para uma discussão detalhada mas ainda simples do problema ver [14].

5.4 A Teoria da Relatividade Geral

Há um germe da Relatividade Geral que faz parte da experiência de Galileo de queda dos corpos, que se deixa entrever nas equações de Newton da gravitação. Tal germe foi bastante discutido durante os últimos séculos do ponto de vista filosófico, chegando a ganhar status de importância física na Teoria Geral da Relatividade.

Esta questão concerne à definição de massa. Galileo observara que todos os corpos caem com a mesma aceleração em direção à Terra. Por quê? Olhando-se através das equações de Newton, que colocam as hipóteses de Galileo de modo formal, podemos ver que a matéria tem duas características fundamentais. A primeira é a inércia: é difícil mover um corpo, isto requer força. Se um corpo estiver isolado, isto é, se não houver forças agindo sobre o mesmo, ele permanecerá em seu estado de movimento: se estiver se movendo sem influência de outros corpos, continuará indefinidamente com velocidade constante.

Em termos quantitativos, o que foi dito acima significa, através da equação de Newton, que a força aplicada deve ser tão maior quanto maior for o valor pretendido para a aceleração de um dado corpo. Mais ainda, para se conseguir uma certa aceleração, a força será tão maior quanto maior for a resistência do corpo ao movimento, resistência esta que se convencionou chamar de massa. Diríamos *massa inercial*, ou seja, resistência *passiva, inerte*, ao movimento.

Por outro lado, olhemos para a causa do movimento, a força. Atentemos para a atração gravitacional: a lei da gravitação universal nos diz que matéria atrai matéria na razão direta de suas massas (e na razão inversa do quadrado da distância relativa). Chamaremos tais massas de *massas gravitacionais* associadas aos corpos em questão. A *experiência de Galileo* nos diz que a *massa inercial* é igual à *massa gravitacional* de um corpo. Este foi um dos mais profundos mistérios da física clássica!

Mach propôs um argumento interessante. Se girarmos um balde cheio de água, esta tenderá a subir pela borda do balde.

De acordo com as leis de Newton, este é um resultado da inércia, já que a água tende a subir pelas paredes do balde, devido ao fato da inércia fazer a água sair pela tangente ao movimento. Por causa da contenção da parede do balde, a água ali permanece, mas sempre tendendo a sair do balde, formando portanto uma figura não plana. A proposta de Mach é a seguinte: se não houvesse outras massas no universo, não poderíamos notar a rotação, de modo que as forças de inércia nada mais seriam que uma força média provocada pelas massas do universo. Esta seria uma forma mais geral do princípio de relatividade, segundo o qual qualquer observador, acelerado ou não, vê sempre a mesma física, onde quer que ele esteja.

Einstein formulou a Relatividade Geral da seguinte maneira. Suponhamos que o observador esteja dentro de uma caixa fechada que cai livremente, em um campo gravitacional. Fazendo ali uma experiência local, ele afirma não haver forças sobre outros corpos no elevador. Ou seja, afirma estar em um referencial inercial.

Um observador externo vê uma força gravitacional sobre o corpo, A comparação entre ambos os observadores, dada a geometria do problema, leva-nos à equação de movimento de um corpo em uma geometria qualquer. Assim, forças gravitacionais são efeitos da geometria do espaço, isto é, o espaço é curvo! Como vimos já no caso da Relatividade Especial em que espaço e tempo pouco diferem, concluímos também que o tempo, que não é absoluto, passa a *andar em curvas* em uma geometria qualquer que obedeça às equações de Einstein. Deste modo, a Relatividade Geral incorpora, de certa forma, a argumentação de Mach.

5.5 A Mecânica Quântica

A Mecânica Quântica teve uma origem absolutamente insólita, pois veio de uma explicação de demasiada simplicidade, obviamente errada sob o ponto de vista clássico, para um fenômeno simplíssimo, mas de explicação até aquele momento impossível dentro da física clássica. Chegou-se a pensar, na época, que a