Impresso no Brasil

Editora Universidade de
Brasília SCS Q.2 Bloco C n° 78
2 Andar 70300-500 Brasília,
DF Fax: (061)225-5611

Título original: *Physics and philosophy: the revolution in modern science*

Revisão: Renato de Assumpção Faria

ISBN: 85 - 230 - 0094 - 1

Capa: Francisco Regis.

Supervisão gráfica: Antonio Batista Filho e Elmano Rodrigues Pinheiro

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília

Heisenberg, Werner
H473p Física e filosofia. Trad. de Jorge Leal Ferreira. Brasília, Editora Universidade de Brasília, 3ª ed., 1995.

158p.

Título original: Physics and philosophy: the revolution m modem science

1 Física - filosofia I. Título.

CDU-53.01

S U M Á R I O

PREFÁCIO DA EDIÇÃO ALEMÃ *

Em diversas universidades da Escócia realizam-se, anualmente, as assim chamadas Conferências Gifford, as quais - de acordo com a vontade testamentária de seu instituidor –deveriam versar sobre a teologia natural, vale dizer, aquela disposição - que diz respeito às questões últimas - que resulta quando se prescinde de todo vínculo com qualquer religião ou ideologia pessoal. Esse propósito é usualmente interpretado de forma que o tema dessas palestras não tenha por objeto problemas específicos de uma dada ciência, mas sim seu conteúdo filosófico ou consequências que tenham a ver com nossa concepção do mundo. Por essa razão, quando o autor se dispôs a proferir as Conferências Gifford, durante o semestre de inverno de 1956-57, na Universidade de St. Andrews, o tema que lhe foi proposto teve por objeto precípuo revelar as relações entre a física atômica e problemas filosóficos gerais. O presente volume reproduz essas preleções em uma tradução alemã da versão original, em língua inglesa, publicada nos Estados Unidos. (...)

As conferências não foram proferidas especialmente para físicos profissionais mas sim tendo em mente um círculo mais amplo de estudantes interessados em filosofia e nas ciências naturais. O autor, todavia, tem consciência de que algumas partes do livro são difíceis de ser compreendidas por aqueles que não trabalham em física. Isso é praticamente inevitável, devido às dificuldades inerentes ao assunto, mas despendeu-se muito esforço para descrever as correlações mais importantes de tal maneira que elas também possam ser entendidas pelo leigo. Provavelmente, a parte mais complexa é aquela que versa sobre as contrapropostas à interpretação da teoria quântica pela Escola de Copenhague. Nesse capítulo a que nos referimos, os detalhes podem ser omitidos por aqueles que não se dedicam à física, pois não são particularmente importantes para as conclusões que seguem. Ademais, a fim de facilitar o entendimento do texto não se procurou evitar repetições nos capítulos restantes.

As consequências a que a moderna física atômica deu lugar, das quais aqui se fala, alteraram em muitos lugares deste planeta a visão do mundo

* “Physik und Philosophie” *(Ulstein Bücher,* 1959).

que o século XIX nos legou. Elas forçam uma mudança na maneira de pensar e, portanto, interessam a um círculo maior de pessoas. A presente edição tem a intenção de ajudar a criar as condições para essa mudança.

W. Heisenberg

INTRODUÇÃO AOS PROBLEMAS DA FILOSOFIA NATURAL *

F. S. Northrop

Professor de Direito e Filosofia, da Faculdade de Direito da Universidade de Yale, EUA.

Há uma consciência generalizada de que a física contemporânea deu lugar a uma revisão importante da concepção que o homem tem do universo e de seu relacionamento com ele. Já se disse que essa revisão atinge o que há de mais fundamental no destino e liberdade humanas, afetando mesmo a concepção que tem o homem acerca de sua capacidade de controlar seu próprio destino. Em ponto algum da física isso é tão flagrante quanto no princípio de indeterminação da mecânica quântica, descoberto pelo autor deste livro e que, comumente, leva seu nome. Portanto, ninguém mais competente do que ele para aferir seu real significado.

Em livro anterior, intitulado *Os Princípios Físicos da Teoria Quântica***, Heisenberg faz uma exposição da interpretação teórica da mecânica quântica, do seu significado experimental e, também, do instrumental matemático dessa teoria para físicos profissionais. No presente livro, ele analisa a teoria quântica e outras teorias no que diz respeito a suas implicações filosóficas e a algumas de suas possíveis consequências sociais para o leigo. Mais especificamente, procura aqui formular e sugerir respostas às três seguintes perguntas: (1) Que afirmam as teorias, já verificadas experimentalmente, da física contemporânea? (2) Quais suas implicações na maneira pela qual o homem pensa sobre si mesmo em relação ao seu universo? (3) De que maneira essa nova forma de pensar, criação do mundo ocidental moderno, irá afetar outras partes do mundo?

A última destas três questões é tratada brevemente por Heisenberg no começo e ao fim de seu questionamento. A brevidade de suas observações, todavia, não deverá iludir o leitor sobre a importância de seu significado. Como observa Heisenberg, os novos caminhos irão, queiramos ou não, alterar e parcialmente destruir costumes e valores tradicionais. É frequente, entre dirigentes de países da Ásia, da África e do Oriente Médio, e também

* Texto introdutório da edição norte-americana (Harper & Brothers, Nova Iorque, 1962).

** N.E. *The Physical Principles of the Quantum Theory* (University of Chicago Press, USA, 1930; reeditado por Dover Publications, Inc., USA).

de seus assessores ocidentais, a crença de que a aceitação por esses países das técnicas e procedimentos modernos seja meramente a de lhes propiciar uma abertura para sua independência política e, depois, meios e instrumentos práticos de ação que a tecnologia proporciona. No entanto, tal concepção é deveras simplificada, a passar por cima de muitas outras coisas. Em primeiro lugar, deve-se ter em conta que os equipamentos da física moderna derivam de sua teoria e requerem uma compreensão dessa teoria, a fim de que possam ser corretamente fabricados e eficientemente utilizados. Em segundo, essa teoria, por seu lado, baseia-se em pressupostos físicos e filosóficos. Quando compreendidos, esses pressupostos filosóficos geram mentalidade e comportamento, individual e social, bem diversos e, em alguns casos, incompatíveis com as tradições de família e casta, com a mentalidade tribal vigente. Em resumo, é impossível se introduzir os instrumentos da física moderna sem, cedo ou tarde, introduzir a atitude filosófica correspondente e, à medida que essa atitude cative os jovens que receberam treinamento científico, ela virá afetar a tessitura moral da família e tribo. A fim de se evitar conflitos emocionais desnecessários e desmoralização social, é importante que os jovens entendam o que esteja acontecendo. Isso significa que eles vejam a transição por que passam como a convergência de duas mentalidades filosóficas diversas: a de sua cultura tradicional e aquela da física. Daí a importância de se entender a filosofia da física moderna.

Há aqui lugar para umas perguntas. Não é a física de todo independente da filosofia? Não se torou eficaz a física moderna tão- somente após livrar-se da filosofia? Heisenberg responde ambas as perguntas na negativa. Mas por quê?

Newton legou a impressão de que, em sua física, não tinham sido feitas suposições além daquelas exigidas pelos dados experimentais. Depreende-se isso da sugestão que fez que não lançara mão de hipóteses e que deduzira seus conceitos básicos e leis tão-somente dos fatos da experiência. Fosse correta essa sua concepção da relação existente entre resultados experimentais e teoria, jamais teria a física newtoniana exigido qualquer modificação, pois nunca teria levado a resultados em desacordo com a experiência. E sendo ela consequência dos fatos experimentais, estaria acima de qualquer dúvida e seria tão final como aqueles fatos.

Em 1885, todavia, uma experiência realizada por Michelson e Morley veio revelar um fato que não poderia ocorrer se as suposições teóricas newtonianas encerrassem toda a verdade. Ficou, assim, evidente que a relação entre fatos experimentais e suposições teóricas é bem diversa daquela que Newton levara muitos físicos modernos a supor. Essa conclusão tornou-se irrecusável quando, cerca de dez anos mais tarde, as experiências sobre a radiação do corpo negro vieram exigir a adição de novos pontos de vista ao pensamento newtoniano sobre o assunto. Expresso de maneira afirmativa, isso significa que as teorias da física não

são uma mera descrição de fatos experimentais e nem, tampouco, algo dedutível de uma tal descrição; ao invés disso, como enfatizou Einstein, o físico só chega à formulação de sua teoria por via especulativa. No método que o físico utiliza, as inferências que faz não caminham dos fatos à teoria, mas, sim, da teoria que assumiu aos fatos experimentais. Assim, portanto, as teorias são propostas especulativamente e delas são deduzidas diretamente as muitas consequências a que dão lugar, a fim de que essas possam, indiretamente, ser confrontadas com os fatos experimentais. Em resumo, qualquer teoria física faz mais suposições, físicas e filosóficas, do que os fatos experimentais, por si mesmos, fornecem ou implicam. Por esta razão, qualquer teoria está sujeita a ser modificada e reconstruída, quando do advento de novas evidências que sejam compatíveis com suas suposições básicas, conforme ocorreu com a mecânica newtoniana após a experiência de Michelson e Morley.

Essas suposições, além do mais, são de caráter filosófico. Elas podem ser ontológicas, isto é, referem-se ao objeto do conhecimento científico, o qual é independente do observador; ou, então, podem elas ser epistemológicas, quer dizer, referem-se à relação entre o cientista, como experimentador e conhecedor, e o objeto que conhece. As teorias da relatividade, restrita e geral, de Einstein, modificam a filosofia da física moderna no aspecto ontológico acima referido, alterando radicalmente a teoria filosófica de espaço e tempo, e a relação desses com a matéria. A mecânica quântica, principalmente o princípio de indeterminação de Heisenberg que encerra, notabilizou-se pela mudança que trouxe à epistemologia do físico, da relação entre o experimentador e o objeto de seu conhecimento científico. A tese mais nova e importante deste livro talvez seja a afirmação feita pelo autor de que a mecânica quântica reviveu o conceito aristotélico de potencialidade na física moderna. Consequência disso é que a mecânica quântica é igualmente importante para a ontologia e a epistemologia. Nesse ponto, a filosofia da física, de Heisenberg, tem um elemento em comum com a de Whitehead.

Foi devido à introdução da potencialidade, no objeto que a física pesquisa, conceito que não pertencia às categorias epistemológicas dos físicos, que Einstein fez objeção à mecânica quântica. Sua objeção, ele a expressou dizendo que “Deus não joga dados”. Com isso, queria ele dizer que o jogo de dados se baseia nas leis do acaso, por acreditar Einstein que o conceito de acaso encontra seu sentido na ciência, tão-somente pelas limitações epistemológicas que decorrem da finitude da mente humana, em sua relação com o objeto onicompleto do conhecimento científico, sendo portanto erroneamente aplicado quando ontologicamente diz respeito ao próprio objeto. Sendo o objeto, de per si, todo completo e, nesse sentido, onisciente à maneira de Deus, o conceito de chance ou probabilidade não é adequado em qualquer descrição científica desse objeto.

Este livro é, também, importante por conter a resposta de Heisenberg à crítica feita à teoria quântica e, em particular, ao seu princípio de indeterminação por Einstein e outros. A fim de se entender essa resposta, deve-se ter em mente duas coisas: (1) A relação acima mencionada entre os dados experimentais da física e os conceitos de sua teoria; (2) A diferença entre o papel que o conceito de probabilidade desempenha em *(a*) mecânica newtoniana e relatividade einsteiniana, e em (*b*) mecânica quântica. No que diz respeito ao item (1), Einstein e Heisenberg, e as mecânicas relativística e quântica, estão de acordo. Eles só diferem no item (2). Mesmo assim, a razão de Heisenberg e os físicos quânticos, em geral, diferirem de Einstein, no que diz respeito ao item (2), depende consideravelmente do item (1) que Einstein admite.

O item (1) afirma que os dados experimentais da física não implicam na sua conceituação teórica. Disso segue que o objeto do conhecimento científico jamais é conhecido diretamente da observação, isto é, da experimentação, mas sim pela construção teórica (ou postulação axiomática), especulativamente proposta, e testada indireta e experimentalmente via as consequências que são deduzidas daquela construção. Para se compreender o objeto do conhecimento científico, devemos, portanto, partir de suposições teóricas a seu respeito.

Quando assim procedermos, por um lado no caso (a) das mecânicas de Newton e Einstein, e, por outro, no caso *(b)* da mecânica quântica, descobriremos que o conceito de probabilidades, ou acaso, entra na definição do estado de um sistema físico e, nesse sentido, no seu objeto de estudo, somente no caso da mecânica quântica, mas não no que diz respeito à mecânica de Newton e à teoria da relatividade de Einstein. Isso, sem dúvida, é o que Heisenberg quer dizer quando escreve, neste livro, que a teoria quântica reintroduziu o conceito de potencialidade na física. É igualmente indubitável que era isso o que Einstein tinha em mente ao fazer suas objeções à teoria quântica.

Mais concretamente, essa diferença, que existe entre a mecânica quântica e as teorias físicas que a precederam, pode ser assim expressa: nas teorias de Newton e de Einstein, o estado de qualquer sistema físico isolado, em um dado instante de tempo, fica precisa e completamente especificado pelo conhecimento, empiricamente adquirido, dos valores que correspondem à posição e ao momento linear de cada uma das partes, desse sistema, naquele instante de tempo; valores probabilísticos nelas não têm lugar. Em mecânica quântica, a interpretação de uma observação experimental, de um sistema físico, é algo um tanto complicado. A observação poderá consistir de uma única leitura, cuja precisão terá que ser avaliada, ou então ela poderá consistir de um conjunto complicado de dados, como no caso de uma fotografia de gotículas d’água em uma câmara de Wilson; qualquer que seja o caso, o resultado só poderá ser expresso em termos de uma distribuição de probabilidades que diga respeito, por exemplo, à

posição e ao momento linear das partículas do sistema. A teoria então poderá prever a distribuição de probabilidades para tempos futuros. A teoria, todavia, não poderá ser experimentalmente verificada, em qualquer desses instantes futuros, meramente com base no resultado experimental segundo o qual os valores das posições, ou dos momentos lineares, estejam dentro dos limites preditos, em uma particular observação. A mesma experiência, com as mesmas condições iniciais, deverá ser repetida um grande número de vezes, e os valores das posições e momentos lineares, que poderão diferir de uma observação a outra, devem se distribuir de maneira a reproduzir a distribuição de probabilidades predita. Em resumo, a diferença crucial, entre a mecânica quântica e as mecânicas de Einstein e de Newton, reside na maneira de especificar o estado de um sistema físico em qualquer instante de tempo; e essa diferença está no fato de que a mecânica quântica introduz o conceito de probabilidade em sua definição de estado, o que não é o caso das mecânicas de Newton e de Einstein.

Isso não significa que, na mecânica de Newton ou na de Einstein, não haja lugar para o conceito de probabilidade. Todavia, nesses dois casos, esse conceito se restringe à teoria dos erros, por meio da qual a precisão do Sim e do Não, isto é, verificação ou não-confirmação da predição da teoria, é avaliada. Portanto, o conceito de probabilidade restringiu-se à relação epistemológica do cientista na verificação do que ele conhece, estando, todavia, ausente na formulação teórica desse conhecimento. Assim, o dizer de Einstein de que "Deus não joga dados" se cumpre em suas duas teorias da relatividade e na mecânica newtoniana.

Cabe aqui a pergunta: existe alguma maneira de se decidir entre o ponto de vista de Einstein e o de Heisenberg e dos outros físicos quânticos? Esta pergunta foi objeto de muitas respostas. Alguns físicos e filósofos, realçando o papel das definições operacionais, argumentaram que, como todas as teorias físicas, as clássicas inclusive, são acompanhadas de erros e incertezas humanas, não há o que decidir entre Einstein e os físicos quânticos. Essa posição, todavia, *(a)* não leva em conta a presença, no método científico, de definições operacionais axiomaticamente construídas, definições teóricas constitutivas assim como a teoria dos erros, e *(b)* ela também supõe que o conceito de probabilidade e mesmo o conceito mais complexo de relação de incerteza só compareça na mecânica quântica no sentido de uma definição operacional. Heisenberg mostra neste livro que essa última suposição é falsa.

Outros cientistas e filósofos, que adotaram uma atitude diametralmente oposta, argumentam que só o fato de haver incerteza na predição de certos fenômenos não é bastante para se sustentar a tese de que esses fenômenos não sejam passíveis de uma determinação completa. Esse argumento combina o problema estático de definir o estado de um sistema mecânico, em dado instante de tempo, com o problema dinâmico, ou causal, de predizer mudanças no estado do sistema, no correr do tempo.

Mas o conceito de probabilidade só comparece, em teoria quântica, no aspecto estático dessa teoria, isto é, em sua definição do estado do sistema. Será de bom alvitre para o leitor guardar a diferença entre esses dois aspectos, a saber, a definição teórica, estática, de estado, e o aspecto dinâmico, ou causal, da mudança do estado, no passar do tempo. No que diz respeito ao primeiro desses aspectos, os conceitos de probabilidade e de sua companheira, a incerteza, comparecem teoricamente e em princípio; eles não se referem meramente às incertezas e erros de natureza operacional e epistemológica, frutos da finitude e imprecisões do pensamento e conduta humanas, que pertencem a qualquer teoria física e a suas experimentações.

Mas por que, pode-se perguntar, deveria o conceito de probabilidade ser introduzido, *em princípio*, na definição teórica de estado, em qualquer instante estático t_1? E, ao fazerem tal construção teórica, por postulação axiomática, não estariam Heisenberg e outros físicos quânticos cometendo uma petição de princípio no que diz respeito à questão que se levantou entre eles e Einstein? Este livro deixa claro que a resposta a essas perguntas é a seguinte: a justificação para esse procedimento, em mecânica quântica, é justamente a tese (1), acima mencionada, que o próprio Einstein também aceitou.

A tese (1) afirma que conhecemos o objeto do conhecimento científico somente por meios especulativos de construção axiomática teórica, ou postulação; portanto, é falsa a sugestão feita por Newton de que o físico possa inferir os conceitos teóricos dos dados experimentais. Em consequência, não existe em nenhum sentido, *a priori* ou empírico, base para se afirmar que o objeto do conhecimento científico ou, mais especificamente, o estado de um sistema mecânico, em um dado instante t_1, deva ser definido de uma certa maneira. O único critério, a respeito, decorre da seguinte pergunta: qual o conjunto de suposições teóricas, referentes ao objeto da mecânica, cujas consequências sejam confirmadas pelos dados experimentais?

Agora, quando definimos, teoricamente e em princípio, o estado de um sistema físico, para fenômenos subatômicos, somente em termos de números associados à posição e momento linear, como gostaria Einstein que fizéssemos, e deduzimos as consequências teóricas no caso da radiação do corpo negro, ocorre que essa suposição teórica - que diz respeito à definição do estado de um sistema físico e ao objeto da física atômica - se revela em desacordo com a evidência experimental. Os fatos experimentais simplesmente não são o que a teoria prevê. Todavia, quando se modifica a teoria tradicional pela introdução da constante de Planck e a inclusão, em princípio, de um segundo conjunto de valores associados às probabilidades de se encontrar certos números para as posições e momentos lineares, do qual segue o princípio de incerteza, então os dados experimentais confirmam os novos conceitos e princípios. Em suma, a situação em mecânica

quântica, no que diz respeito às experiências sobre a radiação do corpo negro, é idêntica àquela com que Einstein se defrontou, face à experiência de Michelson–Morley. Em ambos os casos, foi somente pela introdução de nova suposição teórica, em princípio, que a teoria física pôde se reconciliar com os fatos experimentais. Portanto, afirmar que, a despeito da mecânica quântica, posições e momentos lineares (de partículas subatômicas) estejam, na "realidade", precisamente localizados no espaço e tempo, e, assim, determinados por um par de valores somente, o que corresponde a uma descrição completa e causalmente determinista, como queriam Einstein e filósofos da ciência a que nos referimos, significa professar uma teoria, sobre o objeto do conhecimento físico, cujas experiências sobre a radiação do corpo negro revelaram ser falsa, isso no sentido de que resultados deduzidos dessa teoria não foram confirmados experimentalmente.

Não se deve, é claro, daí concluir que não se possa descobrir uma nova teoria, essa compatível com os fatos experimentais acima mencionados, na qual o conceito de probabilidade não compareça, em princípio, em sua definição de estado. O professor Norbert Wiener, por exemplo, acredita ter pistas a indicar a direção que uma tal teoria deveria seguir. Essa teoria, todavia, teria que rejeitar uma definição de estado no espaço-tempo quadridimensional da relatividade restrita einsteiniana e seria, portanto, incompatível com a tese de Einstein por outros motivos. A possibilidade mencionada não deve, certamente, ser excluída. Mesmo assim, até que uma tal teoria alternativa seja apresentada, qualquer um que não possua fonte alguma de informação, *a priori* ou pessoal, sobre qual deva ser o objeto do conhecimento científico não terá outra alternativa a não ser aceitar a definição de estado proposta pela teoria quântica e concordar, com o autor deste livro, que aquela definição restaura o conceito de potencialidade ao objeto do conhecimento científico moderno. As experiências sobre a radiação do corpo negro requerem que se conclua que Deus joga seu dado.

O que dizer da situação da causalidade e determinismo em mecânica quântica? Provavelmente, o interesse do leigo e do humanista por este livro resida em grande parte na resposta que ele propicia.

Para bem entender a resposta, o leitor deverá dar uma atenção especial à descrição que faz Heisenberg da (a) definição de estado, já mencionada, que utiliza o conceito de probabilidade, e sobre *(b)* a equação temporal de Schrôdinger. O leitor deverá também certificar-se - e essa é de todas as tarefas a mais difícil - de que o significado que tem das palavras "causalidade" e "determinismo" coincide com o sentido que delas tem Heisenberg ao detalhar sua resposta. Caso contrário, o autor estará respondendo a uma pergunta distinta daquela feita pelo leitor, o que levará este último a sé equivocar por completo.

Complica-se a situação ainda mais pelo fato da física moderna dar, ao conceito de causalidade, dois significados distintos e cientificamente

precisos, um mais forte que o outro, não havendo acordo entre os físicos sobre qual desses dois significados se deva atribuir à palavra "causalidade". Assim, alguns físicos e filósofos da ciência utilizam essa palavra em seu sentido mais forte. Há evidência, às vezes pelo menos, de que seja essa a acepção que Heisenberg emprega neste livro. Outros físicos e filósofos, entre eles o autor desta Introdução, usam a palavra "causalidade" em seu sentido mais fraco e a palavra "determinismo" em seu significado mais forte. Quando a primeira das interpretações mencionadas é escolhida, os conceitos de causalidade e determinismo tornam-se sinônimos. Quando, porém, se adota a segunda interpretação, todo sistema determinista é causal mas nem todo sistema causal é determinista.

Muita confusão ocorreu em discussões havidas sobre o assunto pois, com grande frequência, nem a pessoa que fazia a pergunta a respeito nem, tampouco, o físico que a respondia tinham o cuidado de especificar, na pergunta ou na resposta, se usavam a palavra "causalidade" em sua acepção mais fraca ou naquela mais forte da física moderna. Se alguém perguntar: "mantém-se a causalidade em mecânica quântica?" sem, todavia, especificar se se trata de causalidade em seu sentido mais forte ou no mais fraco poderá obter respostas aparentemente contraditórias de físicos igualmente competentes. Um físico, usando a palavra "causalidade" em seu significado mais forte, daria corretamente resposta negativa. Um outro, interpretando a mesma palavra em seu sentido mais fraco, responderia afirmativamente, com igual correção. É natural que essa dicotomia tenha dado lugar à impressão de que a mecânica quântica não seja específica sobre a resposta à pergunta acima. Essa impressão, todavia, não é correta. A resposta da mecânica quântica torna-se inequívoca no momento em que libertem pergunta e resposta dessa ambiguidade latente, pela especificação pura e simples de qual seja o sentido atribuído à palavra "causalidade".

É importante, portanto, distinguir claramente os diferentes sentidos possíveis associados àquela palavra. Comecemos pelo uso comum que o leigo faz da palavra "causa" para chegarmos finalmente aos significados mais precisos da física moderna e passando, também, nessa caminhada, pela sua acepção da física aristotélica. Podemos dizer: "a pedra bateu na janela e assim *causou* a quebra da vidraça". Neste uso da palavra "causalidade", ela é considerada como uma relação entre objetos, isto é, entre a pedra e a vidraça. O cientista, porém, exprime o mesmo fato de maneira diferente. Ele descreve esses acontecimentos em termos do estado da pedra e vidraça, no instante inicial t_1, quando pedra e vidraça estavam separados um do outro e do estado desse sistema de dois objetos, em um instante ulterior t2, quando os dois acabaram por colidir. Assim, portanto, enquanto o leigo tende a pensar na causalidade como uma relação entre objetos, o cientista a encara como uma relação entre estados diversos

do mesmo objeto ou de um sistema de objetos, em diferentes instantes de tempo.

Eis por que, afim de se averiguar o que diz a mecânica quântica sobre o conceito de causalidade, é preciso atentar para duas coisas: (1) a função de estado, que define o estado do sistema físico, em qualquer instante especificado, t_1; (2) a equação temporal de Schrôdinger, que relaciona o estado de um sistema físico, no instante t_1, ao seu outro estado em um tempo ulterior, t_2. O que Heisenberg escreve sobre esses dois itens deve, portanto, ser lido meticulosamente.

Para bem compreender o que tem a mecânica quântica a dizer sobre a relação entre os estados de um dado objeto físico ou de um sistema de objetos físicos, em diferentes instantes de tempo, será útil que consideremos as possíveis propriedades que essa relação possa exibir. O caso mais fraco possível seria o de uma mera sucessão temporal, sem nenhuma conexão com o que quer que seja e onde não houvesse a probabilidade, por menor que fosse, de que o estado inicial, especificável, tivesse por sequência, no correr do tempo, um estado futuro também especificável. Hume, o filósofo do século XVII, oferece-nos razões para crer que a relação entre estados de fenômenos naturais imediatamente percebidos pelos sentidos seja desse tipo. Certamente, dirigiu ele nossa atenção para o fato de que, nesse caso, não se sente qualquer relação de conexão necessária e nem, tampouco, se sente diretamente a probabilidade da sucessão. Tudo que a sensação nos traz, no que diz respeito aos sucessivos estados de qualquer fenômeno, é a mera relação de sucessão temporal.

Esse é um ponto de grande importância. Ele significa que se pode chegar a uma teoria causal - em qualquer ciência ou no senso comum das coisas ou, mesmo, em uma teoria probabilística - da relação entre os estados sucessivos de qualquer objeto ou sistema, tão-somente por meios especulativos, através de uma teoria científica e filosófica, axiomaticamente construída e formulada dedutivamente, a qual é testada, não diretamente em face aos dados sensoriais e experimentais, mas só de maneira indireta, via as consequências que dela se deduzem.

Uma segunda possibilidade que diz respeito ao caráter da relação entre os estados de qualquer sistema físico, em diferentes instantes de tempo, é a de que a relação é necessária, mas só se poderá saber qual conexão seja essa pelo conhecimento do estado futuro. O conhecimento do estado futuro poderá ser obtido, seja esperando que ele ocorra, seja por já ter sido observado, anteriormente, o estado futuro, ou final, de sistemas do mesmo tipo. Quando esse é o caso, a causalidade é teleológica. As mudanças do sistema, com o correr do tempo, são determinadas pelo estado final, ou fito, do sistema. Um exemplo é o sistema físico que se resume em uma bolota, no estado inicial t_1, e em um carvalho, em um instante posterior t_2. Parece, nesse caso, haver uma conexão necessária entre esses dois estados. Afinal, bolotas não se transformam em macieiras ou elefantes.

Elas só se transformam em carvalhos. Todavia, dadas as propriedades desse sistema físico, no estado de bolota, no instante t_1, cientista algum jamais deduziu os atributos do carvalho, que corresponde ao estado final do sistema, em um instante ulterior t_2. Pois bem, segundo a física aristotélica todas as relações causais são teleológicas.

Outra possibilidade é que a relação entre os estados de um objeto, ou de qualquer sistema de objetos, em diferentes instantes de tempo, seja uma relação de conexão necessária, tal que se possa deduzir o estado futuro do sistema, suposto isolado, do conhecimento de seu estado inicial. Em linguagem matemática mais técnica, isso pressupõe a existência de uma teoria, axiomaticamente construída e verificada indiretamente, cujos postulados (1) propiciem uma função de estado, cujas variáveis independentes especifiquem por completo o estado do sistema, a qualquer instante de tempo, e (2) forneçam uma equação temporal, que relacione os valores numéricos empíricos dessas variáveis independentes, em um instante inicial t_1 qualquer, aos seus valores numéricos empíricos, em qualquer instante ulterior t_2, e isso de tal maneira que, introduzindo-se o conjunto de valores operacionalmente determinados, no instante t_1, na equação temporal, os seus valores no instante futuro t_2 possam ser obtidos por mera resolução da equação. Quando esse for o caso, diz-se que a relação temporal exemplifica a causa mecânica.

Deve-se notar que essa definição de causalidade mecânica deixa em aberto a questão de quais variáveis independentes são requeridas para se definir o estado do sistema físico em um instante de tempo qualquer. Aqui, surgem pelo menos duas possibilidades: *(a)* o conceito de probabilidade pode ser utilizado para definir o estado do sistema ou (*b*) ele não pode ser assim empregado. Neste último caso, as variáveis independentes que especificam o estado do sistema não se referem a probabilidades e presenciamos, então, o tipo mais forte de causalidade mecânica. Já no caso *(a)*, as variáveis independentes que definem o estado do sistema são probabilidades associadas a propriedades, como, por exemplo, posição e momento linear; e temos, então, o tipo mais fraco de causalidade mecânica. Se o leitor tiver em mente essas duas acepções de causa mecânica e prestar a devida atenção para reconhecer de qual delas Heisenberg faz uso em diferentes passagens deste livro, ele deverá ser capaz de ter sua resposta acerca da questão sobre o *status* da causalidade em física moderna.

Que dizer sobre o determinismo? Aqui, também, não há um consenso entre os físicos e filósofos da ciência sobre em que acepção aquele termo deva ser empregado. Sua identificação com a forma a mais forte possível de causalidade é ditada pelo senso comum. Vamos, pois, fazer uso da palavra "determinismo" para denotar somente o tipo mais forte de causação mecânica. Creio, então, que o leitor atento deste livro obterá a seguinte resposta à sua pergunta: nas mecânicas newtoniana, einsteiniana e quântica, vale a causalidade mecânica ao invés da teleológica. E é por isso

que a física quântica é chamada de mecânica quântica, ao invés de teleológica quântica. Mas, enquanto, nas físicas de Newton e de Einstein, a causalidade é do tipo mais forte e, portanto, ao mesmo tempo mecânica e determinista, ela é na mecânica quântica do tipo causal mais fraco e, assim, mecânica, mas não determinista. Deste último fato decorre que se, em alguma passagem deste livro, Heisenberg usar a expressão "causalidade mecânica" em sua acepção mais forte, determinista, então a resposta à pergunta "vale, em mecânica, a causalidade em seu sentido mais forte?" será enfaticamente "Não"!

O leitor terá oportunidade de reconhecer que a situação é mais complicada do que essas distinções introdutórias, entre os diferentes tipos de causação, possam sugerir. Todavia, é de se esperar, por termos chamado atenção sobre essas diferentes acepções, que o leitor fique mais capacitado a encontrar seu caminho, neste livro excepcionalmente importante, mais facilmente do que sem aquelas considerações.

Essas distinções deveriam, também, bastar para permitir que se apreenda a enorme significância filosófica da introdução, na física moderna, do tipo mais fraco de causação mecânica, o que ocorreu em mecânica quântica. Essa significância consistiu em reconciliar o conceito de potencialidade objetiva e, nesse sentido, ontológico, da física aristotélica, com o conceito de causação mecânica da física moderna.

Seria, portanto, um erro se a ênfase dada por Heisenberg, sobre a presença na mecânica quântica de algo análogo ao conceito aristotélico de potencialidade, levasse o leitor a concluir que a física contemporânea nos tivesse conduzido de volta à física e ontologia de Aristóteles. Seria erro igual concluir, reciprocamente, que, devido ao fato da causalidade mecânica em sua forma mais fraca ainda valer em mecânica quântica, tudo está agora no mesmo na física moderna, no que diz respeito à sua causalidade e ontologia, como ocorria antes do advento da mecânica quântica. O que ocorreu foi que, com a teoria quântica, o homem contemporâneo ultrapassou os limites do mundo medieval e do mundo moderno, passando a uma nova física e a uma nova filosofia que combinam, consistentemente, algumas das pressuposições básicas, de natureza causal e ontológica, que aqueles mundos nos legaram. É bom lembrar que usamos o termo "ontológico" para denotar qualquer conceito de teoria cientifica, experimentalmente verificado, que se refira ao objeto do conhecimento científico, ao invés da relação meramente epistemológica entre o cientista, como conhecedor, e o objeto que ele conhece. Uma tal síntese filosófica, experimentalmente verificada, da potencialidade ontológica com a causalidade mecânica ontológica, no sentido mais fraco deste último conceito, ocorreu quando os físicos perceberam ser impossível explicar, teoricamente, o efeito Compton e, também, os resultados experimentais sobre a radiação do corpo negro, a menos que estendessem o conceito de probabilidade de seu papel meramente epistemológico da teoria de erros,

no contexto newtoniano e einsteiniano, ao especificarem quando sua teoria é ou não confirmada experimentalmente, ao seu papel ontológico (especificado, em princípio, nos postulados da teoria) de caracterizar o próprio objeto do conhecimento científico.

É, pois, de se admirar que Heisenberg tenha passado pelas experiências subjetivas, emocionais, descritas neste livro, antes de se sujeitar à necessidade, imposta por considerações experimentais e matemáticas, de modificar crenças filosóficas e científicas, do homem moderno e de seu antecessor medieval, de maneira tão profunda? Aqueles que se interessarem em uma descrição, em primeira mão, do funcionamento do espírito humano em um de seus momentos mais criadores hão de querer ler este livro, só por esse motivo. A coragem exigida para assim se afastar do determinismo sem qualificações da física clássica moderna pode ser devidamente apreciada, lembrando-se que um espírito tão ousado e criador, como Einstein, recuou. Ele não podia aceitar que Deus jogasse dados; e não poderia, tampouco, haver potencialidade no objeto do conhecimento científico, como permite a forma mais fraca da causalidade mecânica, em mecânica quântica.

Todavia, antes de se concluir que Deus tenha se tornado um jogador inveterado e que a potencialidade esteja presente em todos objetos, deve-se levar em conta certas limitações impostas pela mecânica quântica, na utilização da forma mais fraca da causação mecânica. Para bem apreciar essas limitações, deverá o leitor prestar atenção ao que é dito neste livro sobre (1) o efeito Compton, (2) a constante *h* de Planck e (3) o princípio de incerteza, este vinculado àquela constante.

A constante *h* é uma grandeza física que se refere *ao quantum* de ação de qualquer objeto ou sistema de objetos. Esse *quantum*, que estende a atomicidade da matéria e eletricidade à radiação luminosa, é uma grandeza muito pequena. Quando os números quânticos do sistema sob observação são pequenos, como no caso de fenômenos subatômicos, então a incerteza especificada pelo princípio de indeterminação de Heisenberg, para as posições e momentos lineares das partes do sistema, torna-se significativa. Então, correspondentemente, toram-se também significativas as probabilidades associadas às posições e momentos lineares. Quando, porém, os números quânticos do sistema são grandes, a magnitude das incertezas especificadas pelo princípio de Heisenberg fica insignificante e as probabilidades associadas à posição e momento linear tornam-se desprezíveis. É o que ocorre com os objetos macroscópicos comuns que nos cercam. E nesse ponto que a mecânica quântica, com seu tipo basicamente mais fraco de causalidade, dá lugar, como casos especiais, às mecânicas de Newton e Einstein, com seu tipo mais forte de causalidade e determinismo. Consequentemente, considerando-se os seres humanos *meramente* como objetos acessíveis aos nossos sentidos, a eles se

aplica o tipo mais forte de causalidade e, portanto, reina também o determinismo.

Todavia, os fenômenos subatômicos são cientificamente significativos no homem. Pelo menos, quanto a isso, a causalidade que o governa é do tipo mais fraco e ele incorpora tanto o destino mecânico quanto a potencialidade. Há razões científicas para se crer que isso ocorra mesmo na hereditariedade. O leitor interessado em conhecer esse tópico, além das páginas deste livro, deveria consultar a obra *Que é a Vida?* * do professor Erwin Schrödinger, o físico que dá o nome à equação temporal da mecânica quântica. Sem dúvida alguma, a potencialidade e a forma mais fraca da causalidade valem, também, para um sem-número de outras características humanas, particularmente para aqueles fenômenos neurológicos corticais no homem, que são correlatos epistêmicos das ideias e propósitos humanos, diretamente introspectivos.

Se essa última possibilidade de fato ocorrer, talvez estejamos pertos da solução de um desconcertante problema científico, filosófico e, mesmo, moral. Eis o problema: como conciliar a causação mecânica, mesmo em sua forma mais fraca, que prevalece na mecânica quântica, com a causação teleológica patentemente presente nos propósitos morais, políticos e legais do homem e na determinação causal teleológica de seu comportamento corpóreo provocada, pelo menos em parte, por esses propósitos? Em suma, como reconciliar a filosofia da física, exposta neste livro por Heisenberg, com a ciência e a filosofia moral, política e legal?

Poderá ser útil ao leitor entender como este livro deve ser assimilado antes que essas questões maiores possam ser corretamente compreendidas ou efetivamente respondidas. Assim, fazemos aqui breve menção a alguns artigos que relacionam a teoria da causação física à relação mais ampla entre mecanismos e teleologia, nas humanidades e ciências naturais. Os artigos relevantes são (a) os dos professores Rosen- blueth, Wiener e Bigelow, na revista *The Philosophy of Science*, janeiro de 1943; (*b*) os dos doutores McCulloch e Pitts, em *The Bulletin of Mathe- matical Biophysics*, vol. 5, 1943, e vol. 9, 1947; e (*c*) o cap. XIX do livro *Diferenças Ideológicas e Ordem Mundial***, editado pelo autor desta Introdução. Se lido após este livro, *(a)* mostrará como a causalidade teleológica surge como caso particular da causalidade mecânica descrita aqui por Heisenberg. Analogamente, *(b)* irá propiciar uma teoria física, dos correlatos neurológicos das ideias introspectivas, expressa em termos da causalidade teleologicamente mecânica da referência (*a*), dando assim uma explicação de como as ideias podem ter um efeito causalmente

* N.E. *What is Life?* (Cambridge University Press, 1954; The Macmillan Company, N.Y., 1946).

** N.E. *Ideological Differences* and *World Order* (editado por Yale University Press, USA, 1949).)

significativo no comportamento humano. Similarmente, (c) mostrará como as ideias e propósitos, do homem moral, político e legal, estão relacionados, através de (*b*) e (a), com a teoria da potencialidade física e causalidade mecânica, tão exaustivamente descrita por Heisenberg nesta obra.

Resta-nos chamar atenção para o que o professor Heisenberg diz sobre o Princípio da Complementaridade, de Bohr. Esse princípio desempenha um papel importante na interpretação da teoria quântica feita pela "Escola de Copenhague", a que pertencem Bohr e Heisenberg. Alguns estudiosos da mecânica quântica, tal como Margenau em seu livro *A Natureza da Realidade Física**, tendem a concluir que a mecânica quântica requer meramente a definição de estado, a sua equação temporal de Schrödinger e seus postulados matemáticos, suficientes para assegurar, como notamos acima, que as mecânicas de Newton e Einstein decorram da mecânica quântica como um de seus casos particulares. De acordo com essa última tese, o princípio da complementaridade nasce da dificuldade de se ter sempre em mente as duas formas, forte e fraca, da causalidade mecânica, com a consequente atribuição da forma mais forte àquelas partes da mecânica quântica onde somente a forma mais fraca comparece. Quando isso ocorre, há que introduzir o princípio da complementaridade a fim de evitar contradições. Se, todavia, se evita aquela prática precedente, o princípio da complementaridade, mesmo se logica- mente desnecessário, pelo menos ainda guarda o condão de nos ajudar a evitar o perigo, notado por Margenau ** e que não escapara a Bohr, de se dar pseudo-soluções a problemas físicos e filosóficos, ao se brincar precipitada e imprecisamente com a lei da contradição, em nome do princípio de complementaridade.

Fazendo-se uso desse princípio, as restrições que tiveram de ser impostas à linguagem do senso comum da física atômica, nos seus aspectos corpuscular e ondulatório, permitiram que as duas descrições se unissem. Mas, uma vez formulado um resultado, com exatidão matemática, axio- maticamente construída, qualquer uso ulterior daquele princípio não passa de mera conveniência quando, ao se deixar de lado as suposições matemáticas, essenciais e exatas, da mecânica quântica, nos viciamos na linguagem e imagens, do senso comum, de ondas e partículas.

Mostrou-se necessário partirmos para as diferentes interpretações do princípio da causalidade, a fim de capacitar o leitor a formar um juízo mais abalizado a respeito do que diz Heisenberg sobre os conceitos, cartesiano e do senso comum, de substâncias materiais e mentais. Isso se deve ao fato de que sua conclusão, sobre Descartes, resulta da generalização, feita pelo autor

* N.E. *The Nature of Physical Reality* (McGraw Hill Book Co., Inc., N. Y., 1950, pp. 418-22. Ver também Northrop, *A Lógica das Ciências e das Humanidades (The Logic of the Sciences and the Humanities*, Macmillan, N.Y., 1947, cap. 11).

**N.E. Margenau. *op. cit.* p. 422.

deste livro, do princípio da complementaridade além da física: primeiro, à relação entre conceitos biológicos, do ponto de vista do senso comum, e conceitos matemáticos e físicos da mecânica quântica; segundo, ao problema corpo-mente.

O resultado dessa generalização é que a teoria cartesiana das substâncias mentais se sai muito melhor, como também o conceito de substâncias em geral, do que em qualquer outro livro, sobre a filosofia da física contemporânea, que o autor destas linhas conhece.

Whitehead, por exemplo, conclui que a ciência e filosofia contemporâneas não têm lugar para o conceito de substância e nem dele necessitam. E com isso concordam monistas neutros como Bertrand Russel e lógico-positivistas como Camap.

Podemos, de uma maneira geral, dizer que o argumento de Heisenberg é que não há razão alguma que nos obrigue a abandonar qualquer dos conceitos, oriundos do senso comum, seja na biologia ou na física, após se ter compreendido os conceitos refinados que conduzam à clarificação completa dos problemas da física atômica. Como essa clarificação é completa, ela é relevante somente em um domínio restrito de problemas da ciência e, assim, não se pode evitar que usemos, em outros domínios, muitos conceitos que não resistiriam a uma análise crítica do tipo da que foi feita na teoria quântica. Como o ideal da clarificação completa jamais será atingido - e é importante que não nos enganemos a respeito - podemos nos permitir o uso de conceitos oriundos do senso comum, desde que tenhamos bastante cuidado e cautela. A esse respeito, a complementaridade é, certamente, um conceito científico muito útil.

De qualquer maneira, duas coisas parecem claras e fazem com que o que diz Heisenberg sobre esses assuntos seja da maior importância. Em primeiro lugar, o princípio da complementaridade e a validade atual dos conceitos cartesianos e os que derivam do senso comum, de corpo e mente, estão indissoluvelmente ligados: permanecem ou caem juntos. Em segundo, pode ser que ambas essas noções não sejam mais que trampolins convenientes que devam ser descartados agora ou futuramente. Mesmo assim, pelo menos na teoria da mente, o trampolim terá que permanecer até que, pelo seu uso continuado, encontremos uma teoria linguisticamente mais exata e empiricamente mais satisfatória que nos permita abandonar a linguagem cartesiana. É certo que existem, atualmente, teorias fragmentárias da mente que não fazem uso da noção de substância, mas nenhum de seus autores, a menos que seja Whitehead, jamais mostrou como a linguagem dessas teorias poderia ser compatibilizada com a linguagem científica de outros fatos do conhecimento humano. É, portanto, provável que qualquer indivíduo que pense saber mais que Heisenberg sobre assuntos dessa importância, seja ele um físico profissional, filósofo ou leitor leigo, corra o grave risco de supor que esteja de posse de uma teoria

científica que diga respeito à relação entre mente e corpo, quando de fato isso não é assim.

Até aqui, temos focalizado nossa atenção, com duas únicas exceções, naquilo que a ciência tem a dizer sobre o objeto do conhecimento científico *qua* objeto; ele independe de sua relação com o cientista como conhecedor. Em suma, temos nos ocupado com sua ontologia. Essa filosofia, todavia, tem também sua componente epistemológica, esta consistindo das três partes seguintes: (1) a relação entre (*a*) os dados diretamente observados, obtidos pelo físico em sua condição de conhecedor indutivo, em suas observações ou em suas experiências e (b) os postulados de sua teoria, especulativamente propostos, indiretamente verificados e axiomaticamente construídos. Esse último item, (b), define o objeto do conhecimento científico *qua* objeto e faz, assim, sua ontologia. A relação entre *(a) e (b)* define um fator na epistemologia. (2) O papel desempenhado pelo conceito de probabilidade na teoria dos erros, por meio da qual o físico define o critério para estimar de quanto seus resultados experimentais se afastam, devido aos erros da experimentação humana, das consequências deduzidas dos postulados da teoria e, ainda assim, ser considerados como confirmando a teoria. (3) O efeito da experiência que está sendo feita sobre o objeto que está sendo conhecido. O que diz Heisenberg a respeito da presença do primeiro e segundo desses três fatores epistemológicos, na física contemporânea, já foi destacado nesta Introdução. Falta, todavia, chamar atenção do leitor sobre o que tem a dizer o autor deste livro acerca do item (3).

Na teoria da física moderna que precedeu o advento da mecânica quântica, o item (3) não desempenhou papel algum. Em consequência, a epistemologia da física de então estava completamente especificada tão-somente pelos itens (1) e (2). Na mecânica quântica, todavia, o item (3) tornou-se (assim como os itens (1) e (2)) assaz importante. O próprio ato de observar altera o objeto que esteja sendo observado, quando seus números quânticos são pequenos.

Heisenberg deduz, desse último fato, uma conclusão deveras importante acerca da relação entre o objeto, o físico que o observa e o resto do universo. Para julgar essa conclusão é preciso atentar para alguns pontos-chave que consideraremos a seguir. Podemos relembrar que, em algumas das definições de causalidade mecânica já apresentadas nesta Introdução, foi acrescentada a expressão limitativa “para um sistema isolado”, enquanto em outras instâncias ficou ela implícita. Essa condição limitativa pode ser satisfeita, em princípio, nas mecânicas de Newton e Einstein e, também, na prática, fazendo-se observações cada vez mais cuidadosas e novos refinamentos nos equipamentos experimentais utilizados. A introdução do objeto do conhecimento científico, em mecânica quântica, elimina, todavia, *em princípio* (e não meramente na prática, devido às imperfeições que provêm da observação humana e de seus instrumentos) a

possibilidade de se satisfazer a condição de que o objeto do conhecimento do cientista seja um sistema isolado. Heisenberg mostra, também, que a inclusão do equipamento experimental e, mesmo, do olho do observador, no sistema físico - que é o objeto de estudo - nada ajuda pois, se a mecânica quântica estiver correta, os estados de todos objetos têm que ser definidos, em princípio, recorrendo-se ao conceito de probabilidade. Em consequência, somente se todo o universo for incluído no objeto do conhecimento científico, poder-se-á satisfazer a condição limitativa expressa nas palavras "para um sistema isolado", mesmo na acepção mais fraca da causação mecânica. Indubitavelmente, mostra-se neste livro que a filosofia da física contemporânea é tão nova em sua epistemologia quanto em sua ontologia. De fato, é da originalidade de sua ontologia - a unificação consistente da potencialidade e da causalidade mecânica em sua forma mais fraca - que emana a novidade da epistemologia.

Sem dúvida, uma outra coisa está bem clara. Uma análise das teorias específicas da física moderna, experimentalmente verificadas, no que diz respeito ao que elas revelam sobre o objeto do conhecimento científico e de sua relação com o conhecedor humano, exibe uma filosofia, ontológica e epistemológica, muito rica e complexa, parte essencial da teoria científica e de seu próprio método. A física, portanto, não é epistemológica e ontologicamente neutra. Negue-se qualquer um dos pressupostos epistemológicos da teoria física e não sobrará método científico algum para testar se é verdadeiro o que a teoria afirma acerca do objeto físico, no sentido de sua confirmação empírica. Tente-se negar qualquer um dos pressupostos ontológicos e não restará conteúdo bastante nos postulados matemáticos da teoria física, axiomaticamente construídos, a permitir a dedução de sua versão dos fatos experimentais, a qual é introduzida a fim de predizer, organizar consistentemente e explicar os resultados revelados pela experiência. Assim, portanto, na medida em que os físicos experimentais nos asseguram que sua teoria da física contemporânea seja indireta e experimentalmente verificada, eles *ipso facto* nos garantem ser igualmente verificada a mui rica e complexa filosofia, ontológica e epistemológica, associada àquela teoria.

Quando sua filosofia, empiricamente comprovada, do verdadeiro nas ciências naturais é identificada com o critério do bom e do justo, nas humanidades e nas ciências naturais, obtemos a ética da lei natural e a jurisprudência. Em outras palavras, temos aqui critério e método cognitivos que, cientificamente, fazem sentido, para julgarmos tanto as normas verbais, pessoais e sociais da lei positiva, assim como também o *ethos* vivente, este corporificado nos costumes, hábitos e instituições culturais tradicionais dos povos e culturas existentes neste mundo. O encontro dessa nova filosofia da física com as respectivas filosofias do pensamento da humanidade é o evento mor do mundo de hoje e de amanhã. Nesse ponto, a

filosofia da física expressa neste livro e sua referência importante às consequências sociais da física fazem seu encontro.

Os capítulos deste livro foram apresentados nas *Gifford Lectures* da Universidade de St. Andrews, na Escócia, durante o período acadêmico de inverno de 1955-1956. De acordo com o desejo expresso pelo seu fundador, as *Gifford Lectures* deveriam "discutir livremente todas as questões relativas às concepções do homem sobre Deus e o Infinito, sua origem, natureza e verdade, se ele pode ter essas concepções, se Deus está ou não sujeito a limitações e quais seriam elas e assim por diante". As conferências proferidas por Heisenberg não procuraram alcançar problemas tão imensamente gerais e difíceis como esses. Mas elas tentaram ir bem além dos limites de qualquer ciência particular, a penetrar no vasto domínio dos problemas humanos mais gerais, que têm sido levantados pelo enorme desenvolvimento recente e pelas aplicações práticas de longo alcance da ciência natural.

Capítulo I

TRADIÇÕES: ANTIGA E NOVA

Quando, hoje em dia *, se fala da física moderna, o primeiro pensamento que ocorre diz respeito às armas nucleares. Todos sabem da enorme influência dessas armas na estrutura política do mundo de hoje, e ninguém tem dúvida em admitir que a influência da física sobre a situação geral seja maior do que jamais foi. Mas será o aspecto político da física moderna o mais importante? Quando o mundo, em sua estrutura política, tiver se ajustado às novas possibilidades tecnológicas, que restará da influência da física moderna?

A fim de responder essas perguntas, é preciso se ter em mente que cada ferramenta traz consigo o espírito que lhe deu origem. Como toda nação e grupo político têm, de alguma maneira, que se interessar pelo problema das novas armas, independentemente da localização e da tradição cultural desse grupo, o espírito da física moderna acabará por permear a mente das pessoas, ligando-se de diversas maneiras às velhas tradições. Qual será, é de se perguntar, o resultado desse impacto de um dos ramos da ciência moderna sobre poderosas e antigas tradições? Naquelas partes do mundo onde a ciência moderna foi desenvolvida, o interesse maior dirigiu-se, por longo tempo, para a atividade prática, indústria e engenharia combinadas com a análise racional das condições externas e internas que justificassem tal atividade. Nesses países, não haverá dificuldade maior em lidar com as novas ideias, isso pelo fato de terem tido tempo bastante para um ajustamento, lento e gradual, aos métodos modernos do pensamento científico. Em outras partes do mundo, confrontar-se-ão essas ideias com os fundamentos religiosos e filosóficos da cultura nativa. Por ser verdade que os resultados da física moderna tocam de perto em conceitos fundamentais como realidade, espaço e tempo, a confrontação poderá dar lugar a mudanças inteiramente novas e, atualmente, imprevisíveis. Um aspecto característico desse encontro entre a ciência moderna e as velhas maneiras de pensar será sua completa internacionalização. Nessa troca de ideias, de um lado, a velha tradição, será diferente em diversas partes

* N.T. Leve, o leitor, em conta que esse “hoje em dia” é de um quarto de século atrás.

do mundo, mas por outro lado a ciência será a mesma em qualquer lugar e o resultado dessa troca se espalhará por toda parte onde ela estiver sendo discutida.

É por tais razões que talvez não seja uma tarefa sem importância a tentativa de se discutir essas ideias da física moderna em uma linguagem não demasiadamente especializada, a fim de estudar suas consequências filosóficas e compará-las com algumas das tradições mais antigas.

Talvez a melhor maneira de abordar os problemas da física moderna seja através de uma descrição histórica do desenvolvimento da teoria quântica. É verdade que essa teoria é apenas um pequeno setor da física atômica e esta, também, por sua vez, um diminuto setor da ciência moderna. Mesmo assim, foi na teoria quântica que ocorreram as mudanças fundamentais no que diz respeito ao conceito de realidade e é mais nessa teoria, em sua forma final, que as novas ideias da física atômica estão concentradas e cristalizadas. Por outro lado, os equipamentos experimentais, enormes e extremamente complexos, em uso nas pesquisas em física nuclear, exibem um outro aspecto deveras impressionante desse domínio da ciência moderna. Mas, no que se refere às suas técnicas experimentais, a física nuclear representa a extensão extrema de um método de pesquisa que determinou o crescimento da ciência moderna, desde Huyghens, Volta ou Faraday. De maneira análoga, pode-se também dizer que a desestimulante complicação matemática, de algumas partes da teoria quântica, representa a consequência extrema dos métodos utilizados por Newton, Gauss e Maxwell. Todavia, a mudança no conceito de realidade, que se manifesta na teoria quântica, não é uma simples continuação do passado; essa mudança parece representar um novo caminho no que diz respeito à estrutura da ciência moderna. Eis por que o primeiro dos capítulos que se seguirão será devotado ao estudo do desenvolvimento histórico da teoria quântica.

Capítulo II

A HISTÓRIA DA TEORIA QUÂNTICA

A origem da teoria quântica está ligada a um fenômeno bem conhecido que não pertencia às partes centrais da física atômica. Qualquer pedaço de matéria, quando aquecido, tora-se incandescente, primeiramente avermelhado e depois esbranquiçado a temperaturas mais elevadas. Sua coloração não depende muito de sua superfície e para um corpo negro ela depende somente da temperatura em que se encontra. Portanto, a radiação emitida por um corpo negro, a altas temperaturas, é um objeto de interesse para a pesquisa científica; trata-se de um fenômeno simples que deveria ter uma explicação, igualmente simples, com base nas leis clássicas conhecidas da radiação e do calor. As tentativas feitas no fim do século XIX por Lorde Rayleigh e Jeans, todavia, malograram e vieram revelar sérias dificuldades. Não é possível se descrever aqui a natureza dessas dificuldades em termos simples, bastando dizer que a aplicação de leis conhecidas não levaram a resultados satisfatórios. Quando Planck, em 1895, iniciou suas pesquisas nesse domínio, procurou concentrar-se no átomo radiante ao invés de na radiação por si mesma. No entanto, isso não removeu nenhuma das dificuldades inerentes ao problema, embora tenha simplificado a interpretação dos fatos empíricos. Foi nesse tempo, durante o verão de 1900, que Curbaum e Rubens, em Berlim, fizeram medidas muito precisas do espectro da radiação térmica. Ao saber desses resultados, Planck tentou reproduzi-los teoricamente por fórmulas matemáticas simples que parecem plausíveis do ponto de vista de sua pesquisa sobre a relação entre calor e radiação. Um dia, Planck convidou Rubens para um chá em sua casa e tiveram então a oportunidade de comparar os resultados experimentais mais recentes de Rubens com uma nova fórmula sugerida por Planck. A comparação mostrou uma concordância completa. E essa descoberta constituiu-se na *lei de Planck da radiação térmica.*

Isso deu lugar a um período de intensa atividade teórica para Planck. Qual seria a interpretação física correta da nova fórmula? Pelo fato de Planck poder, com base no seu trabalho anterior, traduzir facilmente sua fórmula em termos do átomo radiante (o assim chamado *oscilador),* ele

deve ter logo descoberto que sua fórmula parecia revelar que tudo se passava como se o oscilador só pudesse emitir *quanta* com energias discretas - um resultado tão diferente de tudo que se conhecia na física clássica que ele certamente deve tê-lo, de início, rejeitado. Mas, em um período de intenso trabalho, no verão de 1900, finalmente convenceu-se que não havia como escapar de sua conclusão. Conta o filho de Planck que seu pai lhe falara sobre suas novas ideias, durante longa caminhada pelo Grunewald, um bosque nos subúrbios de Berlim. Nesse passeio, ele confessou que acreditava ter feito uma descoberta de primeira grandeza, comparável talvez somente às descobertas de *Sir* Isaac Newton. Assim, Planck deve ter, nesse tempo, compreendido que sua fórmula vinha abalar os fundamentos de nossa descrição da Natureza e que, um dia, esses fundamentos teriam que sofrer nova formulação. Planck, um conservador em sua maneira de ver as coisas, não gostou nada dessas consequências, mas, mesmo assim, publicou sua hipótese quântica em dezembro de 1900.

Tão nova era a ideia de que a energia radiante somente pudesse ser emitida e absorvida em quantidades discretas que não havia como introduzi-la na estrutura tradicional da física. Uma tentativa feita por Planck, a fim de reconciliar sua nova hipótese com as leis da radiação conhecidas, malogrou em seus pontos essenciais. Cinco anos se passaram até que o próximo passo pudesse ser dado na nova direção.

Foi aí que surgiu o jovem Albert Einstein, um gênio revolucionário entre os físicos, que não se amedrontava com a ideia de se afastar dos velhos conceitos. Havia, então, dois problemas em que ele poderia fazer uso das novas ideias. O primeiro era o assim chamado *efeito fotoelétrico,* que consistia na emissão de elétrons por metais sob ação de luz. Tinham as experiências mostrado, especialmente as de Lenard, que a energia dos elétrons emitidos não dependia da intensidade da luz, mas, tão-somente, de sua cor ou, mais precisamente, de sua frequência. Esse resultado, todavia, não podia ser entendido com base na teoria tradicional da radiação. Einstein pôde explicar tal resultado ao interpretar a hipótese de Planck quando afirma que a luz consiste em *quanta* de energia que se propagam através do espaço. Ademais, a energia de um único *quantum* de luz deve, de acordo com as hipóteses feitas por Planck, ser igual ao produto da frequência da luz pela constante de Planck.

O outro problema foi o do *calor específico* * dos corpos sólidos. Aqui, a teoria tradicional conduzia a valores para o calor específico que concordavam com as observações feitas a altas temperaturas, discordando todavia com as feitas a baixas temperaturas. E, mais uma vez, pôde Einstein mostrar que se podia entender o fenômeno aplicando-se a hipótese quântica às

* N.T. Vide Apêndice (p. 155): “Do Efeito Fotoelétrico e da Teoria do Calor Específico dos Sólidos".

vibrações elásticas dos átomos em corpos sólidos. Esses dois resultados, o efeito fotoelétrico e a teoria do calor específico de sólidos, marcaram um avanço de grande importância, por terem revelado a presença do *quantum* de ação de Planck (nome usado pelos físicos para a constante por ele introduzida) em fenômenos diversos que nada tinham diretamente a ver com a radiação térmica. Os dois resultados revelaram, também, o caráter profundamente revolucionário da nova hipótese, pois o primeiro deles conduzia a uma descrição da luz completamente diversa daquela propiciada pelo modelo ondulatório tradicional. A luz poderia ser interpretada como consistindo de ondas eletromagnéticas, de acordo com a teoria de Maxwell, ou então como sendo constituída de *quanta* de luz, pacotes de energia que se propagam pelo espaço com velocidade assaz elevada. Mas, pergunta-se: poderia ela ser ambas as coisas? Sabia Einstein, não há dúvida, que os fenômenos bem conhecidos de difração e interferência podem ser explicados somente no modelo ondulatório. Não podia ele pôr em dúvida a existência de uma contradição entre esse modelo ondulatório e a ideia dos *quanta* de luz,. como também não tentou remover a inconsistência dessa nova interpretação. Ele simplesmente encarou a contradição como algo que provavelmente seria entendido somente muito tempo depois.

Enquanto isso, as experiências de Becquerel, Mme. Curie e Rutherford tinham resultado em alguma clarificação da estrutura do átomo. Em 1911, as experiências feitas por Rutherford sobre a interação dos *raios alfa* ao penetrar através da matéria resultaram em seu famoso modelo atômico. Nele, o átomo é apresentado como sendo composto de um núcleo central, que está carregado positivamente e que é responsável por quase toda a massa do átomo, e por elétrons que circulam ao redor do núcleo, qual planetas em torno do Sol. A ligação química entre átomos de elementos diferentes é explicada como resultado de uma interação entre os elétrons mais externos de átomos vizinhos; ela nada tem a ver diretamente com o núcleo atômico. O núcleo, por sua vez, determina o comportamento químico pela presença e grandeza de sua carga, a qual por sua vez fixa o número de elétrons em um átomo neutro. Esse modelo do átomo não podia, a princípio, explicar a característica mais importante do átomo, a saber, sua enorme estabilidade. Sistema planetário algum, de acordo com as leis da mecânica de Newton, jamais retornaria à sua configuração inicial após uma colisão com um outro desses sistemas. Mas um átomo de carbono, por exemplo, ainda continuará a ser um átomo de carbono depois de uma colisão ou em uma interação que o ligue quimicamente a átomos de outros elementos.

A explicação para essa inusitada estabilidade foi dada por Bohr, em 1913, aplicando a hipótese quântica de Planck. Com efeito, se o átomo pode mudar sua energia somente por *quanta* com energias discretas, isso deve significar que o átomo só possa existir em estados discretos estacionários, aquele de energia mais baixa sendo o estado em que ele

normalmente se encontra. Portanto, após qualquer tipo de interação, o átomo retornará ao seu estado normal.

Assim, pela aplicação da teoria quântica ao modelo atômico, Bohr pôde não somente explicar a estabilidade dos átomos como também dar, em alguns casos simples, uma interpretação teórica dos espectros de linhas emitidas por átomos que foram excitados por descargas elétricas ou pelo calor. Sua teoria baseou-se em uma combinação de mecânica clássica, no que dizia respeito ao movimento dos elétrons, e de condições quânticas, estas superimpostas ao movimento clássico dos elétrons a fim de propiciar estados estacionários discretos. Uma formulação matemática consistente dessas condições foi dada posteriormente por Sommerfeld. Ora, Bohr estava bem ciente do fato de que as condições quânticas vinham prejudicar a consistência da mecânica newtoniana. No caso mais simples, a saber, o átomo de hidrogênio, pôde-se calcular pela teoria de Bohr as frequências da luz emitida pelo átomo, e o acordo com a experiência foi perfeito. Todavia, essas frequências diferiam das frequências orbitais dos elétrons que circulam ao redor do núcleo, e de seus harmônicos, e este fato mostrou imediatamente que a teoria ainda estava repleta de contradições. Ela, porém, continha uma parte essencial da verdade, pois explicava qualitativamente o comportamento químico dos átomos e seus espectros de linhas; e a existência de níveis estacionários discretos foi, por fim, verificada nas experiências de Franck e Hertz, e de Stern e Gerlach.

A teoria de Bohr abrira uma nova linha de pesquisa. A grande quantidade de dados experimentais, colecionados pela espectroscopia através de muitas décadas, estava agora à disposição para prestar informações sobre as estranhas leis quânticas que governam os movimentos dos elétrons nos átomos. E as muitas experiências da química podiam ser utilizadas para o mesmo propósito em vista. Foi desse tempo em diante que os físicos aprenderam a fazer as perguntas corretas; e fazer a pergunta certa é, frequentemente, mais do que a metade do caminho que conduz à solução do problema.

Mas quais eram essas perguntas? Praticamente, todas elas tinham a ver com as estranhas contradições que pareciam persistir entre resultados de diferentes experiências. Afinal, como pode ser que a mesma radiação que produz figuras de interferência e que, portanto, deve consistir de ondas também produza o efeito fotoelétrico e deva, consequentemente, consistir de partículas em movimento? E, também, como pode ser que a frequência do elétron, em seu movimento orbital no átomo, não coincida com a frequência da radiação emitida? Significaria isso que o movimento orbital não existe? Ora, se a ideia de movimento orbital for errônea, então o que sucede com os elétrons no interior do átomo? Podemos ver os elétrons movendo-se em uma câmara de Wilson, e eles são às vezes expelidos de um átomo; por que razão não deveriam eles também se mover dentro de um átomo? É verdade que os elétrons poderiam estar em repouso no estado

normal do átomo, o estado de menor energia. Há, todavia, muitos estados de energia mais alta, onde a camada de elétrons tem momento angular. Neste caso, não parece admissível que os elétrons estejam em repouso. Aqui, pode-se acrescentar um bom número de exemplos semelhantes. Percebia-se, assim, repetidamente, que a tentativa de descrever os fenômenos atômicos, dentro dos conceitos da física tradicional, conduzia a contradições.

No começo da década de vinte, os físicos gradualmente se acostumaram a lidar com esse tipo de dificuldade, e adquiriram um conhecimento, um tanto vago, é verdade, sobre onde os tropeços iriam ocorrer, e aprenderam a evitá-los. Como? Bem, eles aprenderam qual descrição de um fenômeno atômico seria a mais conveniente para uma dada experiência. Isso, todavia, não era bastante para prover uma visão ampla e consistente daquilo que ocorre em um processo quântico, mas serviu para modificar a atitude dos físicos de tal maneira que eles, de um jeito ou de outro, acabaram por captar o espírito da teoria quântica. Assim, mesmo algum tempo antes de se ter conseguido uma formulação consistente da teoria quântica, sabia-se prever mais ou menos qual seria o resultado de qualquer uma dessas experiências.

Frequentemente, discutiam-se o que alguém chamou de *experiências ideais.* Tais experiências foram imaginadas para responder a uma questão deveras crítica sem, todavia, haver preocupação, por parte de seus autores, se elas poderiam ou não ser realizadas praticamente. É claro que era importante que elas fossem, em princípio, realizáveis, embora pudessem requerer técnicas extremamente complicadas. Acreditava-se que essas experiências poderiam ser muito úteis para esclarecer certos problemas. Mesmo que não houvesse acordo entre os físicos sobre o resultado de uma certa experiência ideal, era frequentemente possível encontrar-se uma experiência similar e mais simples que pudesse ser realizada e, assim, a resposta experimental viria contribuir de maneira essencial para maior clarificação da teoria quântica.

O fato mais estranho daqueles anos foi que os paradoxos da teoria quântica não desapareceram durante esse processo de clarificação; pelo contrário, tornaram-se ainda mais marcantes e mais estimulantes. Havia, por exemplo, o caso da experiência de Compton sobre o espalhamento de raios X. Pelos dados de experiências anteriores sobre a interferência de luz espalhada, não havia dúvida de que o espalhamento se dava da seguinte maneira: a onda eletromagnética incidente fazia o elétron vibrar com a frequência da onda; o elétron oscilante emitia, então, uma onda esférica de mesma frequência, produzindo, assim, a luz espalhada. Compton, todavia, descobriu em 1923 que a frequência dos raios X espalhados não coincidia com a frequência do raio X incidente. Essa mudança na frequência podia ser formalmente entendida admitindo-se que o espalhamento resultasse da colisão de um *quantum* de luz (no caso,

raios X) com um elétron. Na colisão, a energia do *quantum* de luz mudaria e, visto que a sua energia seria dada pelo produto de sua frequência pela constante de Planck, essa frequência teria que mudar correspondentemente. Mas o que ocorre nessa interpretação da onda de luz? As duas experiências - uma, sobre a interferência da luz espalhada e, a outra, da modificação da frequência da luz espalhada – pareciam contraditórias e sem vislumbre de qualquer possibilidade de compromisso.

Por essa época, muitos físicos estavam convencidos de que essas aparentes contradições faziam parte da estrutura intrínseca da física atômica. Eis por que em 1924, na França, de Broglie procurou estender o dualismo, entre as descrições de onda e de partícula, às partículas elementares que constituem a matéria, começando pelo elétron. Mostrou ele que uma certa onda de matéria poderia "corresponder" ao elétron em movimento, da mesma maneira que uma onda de luz corresponde a um *quantum* de luz se propagando. Todavia, não era muito claro que tipo de associação esse "corresponder" estava a sugerir. Mas a sugestão de de Broglie era que a condição quântica, na teoria de Bohr, deveria ser interpretada como uma asserção sobre as ondas materiais. Uma onda, circulando ao redor do núcleo atômico, não pode deixar de ser, por razões geométricas, uma onda estacionária; e o perímetro da onda tem que ser um múltiplo de seu comprimento de onda. Dessa maneira, a ideia de de Broglie conseguiu ligar a condição quântica, até então elemento estranho na mecânica dos elétrons, ao dualismo onda-partícula.

Na teoria de Bohr, a discrepância observada entre as frequências calculadas dos elétrons e da radiação emitida teve que ser interpretada como uma limitação do conceito de órbita eletrônica, conceito que já levantara suspeitas desde o começo. Todavia, para os estados de energia mais alta, os elétrons mover-se-iam a uma grande distância do núcleo da mesma maneira como o fazem quando os vemos atravessar uma câmara de Wilson. Fazia então sentido falar-se em órbitas eletrônicas. Foi, assim, deveras satisfatória a constatação de que, para as órbitas mais exteriores, as frequências da radiação emitida se aproximavam cada vez mais da frequência orbital e de seus harmônicos mais altos. Por outro lado, também Bohr já tinha sugerido, em artigos anteriores, que as intensidades das linhas espectrais emitidas se aproximavam das intensidades dos harmônicos correspondentes. Esse *princípio de correspondência* já se tinha mostrado muito útil no cálculo aproximado das intensidades das linhas espectrais. Dessa maneira, tinha-se a impressão de que a teoria de Bohr dava uma descrição qualitativa, embora não quantitativa, do que ocorre no interior do átomo; e que alguma nova característica do comportamento da matéria estava sendo expressa pelas condições quânticas que, por seu lado, diziam respeito ao dualismo onda-partícula.

A formulação matematicamente precisa da teoria quântica emergiu finalmente como consequência de dois diferentes desenvolvimentos. O

primeiro deles derivou do princípio de correspondência de Bohr. Tinha-se aqui que abandonar o conceito de órbita eletrônica, mas mantê-lo no limite dos grandes números quânticos, isto é, para as grandes órbitas. Neste último caso, a radiação emitida - por intermédio de suas frequências e intensidades - propicia uma imagem das órbitas eletrônicas que deriva do que os matemáticos denominam de expansão de Fourier da órbita. A ideia trazia consigo a sugestão de que se deveria expressar as leis mecânicas, não por equações para as posições e velocidades dos elétrons mas, sim, por equações para as frequências e amplitudes da expansão de Fourier. Partindo-se , então, dessas novas equações e modificando-as ligeiramente, poderíamos esperar obter relações para as grandezas que correspondem às frequências e intensidades da radiação emitida, mesmo para o caso de órbitas pequenas e para o *estado fundamental* (ou normal) do átomo. Esse plano pôde de fato ser posto em prática e, no verão de 1925, deu lugar ao formalismo matemático que foi denominado *mecânica das matrizes* ou, para se usar uma expressão mais geral, *mecânica quântica*. Assim, as equações de movimento da mecânica clássica foram substituídas por equações formalmente semelhantes entre matrizes; foi uma experiência realmente estranha ver que muitos resultados da mecânica newtoniana, como a conservação da energia e outros, podiam ser igualmente derivados no novo esquema. Posteriormente, as investigações'de Bom, Jordan e Dirac mostraram que as matrizes representativas da posição e momento do elétron não comutam. Esse último resultado revelou claramente a diferença essencial entre as mecânicas quântica e clássica.

O outro desenvolvimento decorreu da ideia de de Broglie das ondas materiais. Schrödinger procurou estabelecer uma equação para as ondas estacionárias de de Broglie que circundam o núcleo atômico. No início de 1926, conseguiu ele derivar os níveis de energia, que correspondem aos estados estacionários do átomo de hidrogênio, como *autovalores* de sua equação de ondas (que traz o seu nome), e pôde apresentar uma prescrição mais geral, que permitiu a transformação de um dado conjunto de equações clássicas de movimento em uma correspondente equação de ondas em um espaço tridimensional. Posteriormente, conseguiu Schrödinger demonstrar ser seu formalismo, o da chamada *mecânica ondulatória*, matematicamente equivalente ao formalismo anterior da mecânica das matrizes.

Finalmente, tinha-se um formalismo matemático consistente que poderia ser utilizado em suas duas formulações equivalentes, uma partindo de relações entre matrizes e a outra de equações de ondas. Com esse formalismo, obtiveram-se corretamente os valores dos níveis de energia do átomo de hidrogênio; e levou menos de um ano para se mostrar o seu sucesso para o átomo de hélio e nos casos mais complicados de átomos mais pesados. Mas ainda resta a pergunta: em que sentido o novo formalismo descrevia a estrutura atômica? Os paradoxos que sobrevi-

nham do dualismo onda-partícula não tinham sido resolvidos; permaneciam escondidos de alguma maneira no esquema matemático da teoria.

Um primeiro passo, e muito interessante, na direção do entendimento real da teoria quântica foi dado por Bohr, Kramers e Slater, em 1924, que procuraram resolver a aparente contradição do dualismo onda-partícula pela introdução do conceito de onda de probabilidade. As ondas eletromagnéticas foram interpretadas, não como ondas "reais", mas sim como ondas de probabilidade cuja intensidade determinaria, em um dado ponto do espaço, a probabilidade associada à absorção (ou à emissão induzida) de um *quantum* de luz por um átomo localizado naquele ponto. Essa ideia conduziu à conclusão de que as leis da conservação de energia e momento linear não precisam valer para um único evento, por serem elas somente leis estatísticas e, assim, verdadeiras quando médias estatísticas são consideradas. Esta conclusão, todavia, não era correta, e a relação entre os aspectos ondulatório e de partícula complicou-se ainda mais.

Entretanto, o artigo de Bohr, Kramers e Slater revelava uma característica essencial da correta interpretação da teoria quântica. Esse conceito por eles introduzido de onda de probabilidade era algo inteiramente novo na física teórica desenvolvida desde Newton. Probabilidade, em matemática ou na mecânica estatística, significa uma afirmação sobre o nosso grau de conhecimento acerca de uma situação concreta. Quando jogamos dados, não temos como conhecer exatamente os detalhes finos do movimento de nossas mãos, que determinam a maneira como caem os dados e, portanto, dizemos que a probabilidade de cair um certo número é uma em seis. A onda de probabilidade de Bohr, Kramers e Slater, todavia, significava mais do que isso: ela correspondia a uma tendência para alguma coisa. Tratava-se, assim, de uma versão quantitativa do velho conceito de potência da filosofia aristotélica, que introduzia algo entre a ideia de evento e o evento real, um tipo estranho de realidade física a mediar entre possibilidade e realidade.

Posteriormente, quando o arcabouço matemático da teoria foi completado, Max Bom retomou a ideia de onda de probabilidade e apresentou uma definição clara da quantidade matemática que deveria, no formalismo, ser interpretada como onda de probabilidade. Essa onda não era tridimensional, como as elásticas e de rádio, mas uma onda em um espaço de configuração mutidimensional e, portanto, uma quantidade matemática um tanto abstrata.

Todavia, mesmo nesse tempo, no verão de 1926, ainda não era claro, em cada caso, como deveria ser utilizado o formalismo matemático a fim de se descrever uma dada situação experimental. Sabia-se como descrever os estados estacionários de um átomo, mas não se sabia como descrever um evento muito mais simples: um elétron passando através de uma câmara de Wilson.

Quando, naquele verão, Schrödinger mostrou que seu formalismo da mecânica ondulatória era matematicamente equivalente ao da mecânica quântica, ele tentou também, por algum tempo, abandonar completamente as ideias de *quanta* e de "saltos quânticos", e substituir os elétrons nos átomos simplesmente por suas ondas tridimensionais de matéria. A inspiração que o levou a tal empresa proveio do resultado de que os níveis de energia do átomo de hidrogênio, em sua teoria, pareciam ser simplesmente as autofreqüências das ondas estacionárias de matéria. Pareceu-lhe, portanto, ser um engano chamar as autofreqüências de energias; elas não passavam de frequências. Todavia, nas discussões realizadas no outono de 1926 em Copenhague entre Bohr e Schrödinger e o grupo de físicos de Copenhague, tornou-se logo aparente que tal interpretação não seria suficiente para explicar a fórmula de Planck da radiação térmica.

Durante os meses que se seguiram a essas discussões, um estudo intensivo de todas as questões, discutidas em Copenhague, sobre a interpretação da teoria quântica, teve por resultado uma clarificação completa e, como muitos físicos acreditam, satisfatória, da situação. Todavia, não foi uma solução que se pudesse facilmente aceitar. Lembro- me de longas discussões com Bohr, até altas horas da noite, que acabavam quase em desespero. E quando, ao final de uma dessas discussões, saí para uma caminhada pelo parque vizinho, fiquei repetindo interiormente a mesma pergunta: pode a Natureza ser tão absurda como nos tem parecido nessas experiências com os átomos?

A solução final foi abordada de duas maneiras diferentes. Uma delas foi uma reviravolta da questão. Ao invés de perguntar: como se pode demonstrar, no esquema matemático conhecido, uma dada situação experimental? uma outra pergunta era feita: seria verdade dizer-se que ocorrem na Natureza somente aquelas situações experimentais que podem ser demonstradas pelo formalismo matemático? A hipótese de que isso fosse realmente verdade, deu lugar a limitações no uso de conceitos que tinham sido, desde Newton, básicos na física clássica. Da mesma maneira que na mecânica newtoniana, nada impede que se fale em posição e velocidade do elétron e, além disso, pode-se observar e medir essas grandezas. Mas, contrariamente ao que ocorre na mecânica de Newton, não se pode medir simultaneamente aquelas grandezas com alta precisão arbitrariamente. De fato, o produto das duas imprecisões, em suas medidas, resultou não ser menor que a constante de Planck dividida pela massa da partícula. Relações análogas foram igualmente formuladas para outras situações experimentais. Todas elas são usualmente chamadas de *relações de incerteza*, diferentes instâncias do *princípio de indeterminação*. E, assim, aprendeu-se que os velhos conceitos não se adequam à Natureza de maneira exata.

Uma outra maneira de abordar o problema foi o conceito de *complementaridade* introduzido por Bohr. Schrödinger tinha descrito o

átomo não como um sistema composto de partículas, núcleo e elétrons, mas sim como constituído de núcleo e ondas de matéria. Essa descrição dos elétrons como ondas de matéria certamente encerrava um elemento de verdade. Já Bohr considerou a maneira quântica de descrever em seus dois aspectos, de partícula e de onda, como duas descrições complementares da mesma realidade. Cada uma dessas descrições pode ser só parcialmente verdadeira, e limitações devem ser impostas ao uso, tanto do conceito de partícula como do de onda, pois, caso contrário, não haveria como se evitar as contradições. Se levarmos em conta essas limitações, expressas pelo princípio de incerteza, as contradições desaparecerão.

Dessa maneira, desde a primavera de 1927, conseguiu-se uma interpretação consistente da teoria quântica que é, usualmente, conhecida como a "interpretação de Copenhague". Essa interpretação teve seu teste crucial, no outono de 1927, na conferência Solvay, em Bruxelas. Lá, todas as experiências, que sempre deram lugar aos piores paradoxos, foram discutidas repetidamente em todos seus detalhes, especialmente por Einstein. Novas experiências ideais foram inventadas a fim de descobrir possíveis inconsistências na teoria; mas a teoria mostrou-se consistente e de acordo com os fatos experimentais, pelo menos pelo que se pôde ver.

Os detalhes da interpretação de Copenhague serão discutidos no próximo capítulo. Devemos dar ênfase, aqui, ao fato de que mais de um quarto de século se passou para, da ideia primeira do *quantum* de energia, chegar-se a um entendimento real das leis teóricas da mecânica quântica. Isso indica uma mudança profunda que teve de ocorrer nos conceitos fundamentais que dizem respeito à realidade, antes que se pudesse entender a nova situação.

Capítulo III

A INTERPRETAÇÃO DE COPENHAGUE DA TEORIA QUÂNTICA

A interpretação de Copenhague da teoria quântica tem, como ponto de partida, um paradoxo. Qualquer experiência em física, refira-se ela a fenômenos da vida comum ou a eventos atômicos, tem que ser descrita na terminologia da física clássica. Os conceitos da física clássica propiciam a linguagem por meio da qual descrevemos os arranjos experimentais e enunciamos seus resultados. Não podemos e não temos como substituí-los por outros. Ainda assim, a aplicação desses conceitos sofre as limitações ditadas pelo princípio da indeterminação. Devemos ter em mente o alcance limitado da aplicabilidade desses conceitos, mas não podemos melhorá-los e, assim, não há por que tentar.

Para um melhor entendimento desse paradoxo, é útil compararmos os procedimentos utilizados na interpretação teórica de uma experiência em física clássica e em física quântica. Na mecânica newtoniana, por exemplo, podemos começar pela medida da posição e velocidade do planeta cujo movimento queremos estudar. O resultado da observação feita é traduzido matematicamente com auxílio dos valores numéricos que a experimentação revelar. No passo seguinte, as equações de movimento são utilizadas para, desses valores das coordenadas e momentos lineares, em um dado instante de tempo, alcançar os valores futuros dessas coordenadas e momentos ou de qualquer outra grandeza do sistema. E, dessa maneira, o astrônomo prevê as propriedades do sistema que pesquisa em qualquer tempo futuro. Ele poderá, por exemplo, predizer o instante exato em que ocorrerá um eclipse da Lua.

Na física quântica, o procedimento é ligeiramente diferente. Nós poderíamos, digamos, estar interessados no movimento de um elétron em uma câmara de Wilson e poderíamos determinar, por algum tipo de observação, a posição e velocidade iniciais do elétron. Essa determinação, todavia, não seria precisa; ela traria consigo, pelo menos, as imprecisões que derivam da correspondente relação de incerteza e, provavelmente, ainda erros maiores devidos às dificuldades da técnica experimental utilizada. Mas são as imprecisões do primeiro tipo mencionado que nos permitem traduzir o resultado da observação na linguagem matemática da

teoria quântica. Nesse ponto, exibe-se uma função de probabilidade que representa a situação experimental, no instante em que a observação foi feita, nela estando também incluídos os eventuais erros cometidos nas medidas.

Essa função de probabilidade representa a mistura de duas coisas, em parte um fato e em parte nosso conhecimento desse fato. Ela representa um fato na medida em que atribui à condição inicial do sistema a probabilidade 1, isto é, certeza absoluta: o elétron movendo-se com a velocidade observada, na posição observada. A qualificação "observada" refere-se à observação dentro da precisão do experimento. A função de probabilidade representa, também, nosso conhecimento, no sentido de que um outro observador poderia, talvez, conhecer a posição do elétron com maior precisão. O erro experimental não representa – pelo menos dentro de certos limites - uma propriedade do elétron, mas sim o conhecimento deficiente que temos acerca do elétron. E a deficiência desse conhecimento está também presente na função de probabilidade.

Na física clássica, deve-se também considerar, em uma experiência cuidadosamente conduzida, os erros experimentais. Como resultado, obteríamos uma distribuição de probabilidade para os valores iniciais das posições e velocidades e, assim, algo muito semelhante à função de probabilidade da mecânica quântica, com a diferença que as incertezas vinculadas ao princípio de indeterminação estão ausentes na física clássica.

Na teoria quântica, após ter sido determinada a função de probabilidade, no instante inicial, através das observações feitas, pode-se calcular com auxílio das leis quânticas a função de probabilidade em qualquer instante futuro e, dela, determinar a probabilidade de ocorrência, em uma medida, de um certo valor da grandeza observada. Nós podemos, por exemplo, predizer a probabilidade de se achar um elétron, em um instante posterior, em um dado ponto, em uma câmara de Wilson. Deve-se, todavia, chamar atenção ao fato de que a função de probabilidade, por si mesma, não representa um curso de eventos, no correr do tempo. Ela representa uma tendência para a ocorrência de eventos e nosso conhecimento desses eventos. Dada uma função de probabilidade, ela somente poderá ser ligada à realidade se uma condição essencial for satisfeita, a saber, se uma nova medida for feita para determinar uma certa propriedade do sistema. Somente assim a função de probabilidade nos permitirá calcular o resultado provável da nova medida. E o resultado da medida será, novamente, expresso nos termos da física clássica.

A interpretação teórica de uma experiência requer, portanto, três estágios distintos: (1) traduzir a situação experimental inicial em uma função de probabilidade; (2) seguir a evolução temporal dessa função; (3) escolher uma nova medida a ser feita no sistema físico considerado, cujo resultado poderá então ser calculado da função de probabilidade. No primeiro estágio, o princípio de indeterminação tem necessariamente que

ser considerado. O segundo, não pode ser descrito em termos dos conceitos da física clássica; não há descrição alguma do que ocorre no sistema, do Instante em que foi feita a observação inicial ao instante em que for efetuada a próxima medida. E é somente no terceiro estágio que mudamos novamente, passando do "possível" ao "real".

Ilustremos esses três estágios em uma *experiência ideal* simples. Já dissemos que o átomo consiste de um núcleo e de elétrons que em torno dele circulam; afirmou-se, também, ser duvidoso o conceito de órbita eletrônica. Poder-se-ia argumentar ser possível, pelo menos em princípio, observar-se o elétron em sua órbita. O experimentador simplesmente olharia através de um microscópio de grande poder resolutivo e veria então o elétron revolvendo em sua órbita. Esse microscópio de alto poder resolutivo não poderia, certamente, utilizar a luz visível, já que a imprecisão, na medida da posição do elétron, não pode ser menor que o comprimento de onda da luz. Mas um microscópio que utilizasse raios gama, cujo comprimento de onda é menor que o tamanho do átomo, serviria para o propósito indicado. Um tal microscópio ainda não foi construído, o que não nos proíbe de discutir essa experiência ideal.

Uma pergunta: é o primeiro estágio - a tradução do resultado da observação em uma função de probabilidade - realmente possível? Ora, ele seria possível somente se a relação de incerteza, da posição e momento linear, fosse satisfeita após a observação. A posição do elétron seria conhecida com uma precisão dada pelo comprimento de onda do raio gama. E o elétron poderia ter estado praticamente em repouso, antes da observação. Todavia, no ato de observação, pelo menos um *quantum* de radiação gama teria atravessado o microscópio e seria, então, defletido pelo elétron. Assim, portanto, o elétron seria desviado pelo *quantum* de radiação gama, o que viria modificar sua posição e momento linear, e aqui se pode mostrar que a incerteza dessa mudança seria suficientemente grande para garantir a validade da relação de incerteza correspondente. A conclusão é, pois, que não haveria dificuldade alguma com respeito ao primeiro estágio.

Poderemos, ao mesmo tempo, perceber facilmente que não existe maneira alguma de se observar a órbita do elétron, em sua revolução ao redor do núcleo. O segundo estágio mostraria um pacote de ondas, não em movimento em torno do núcleo, mas sim afastando-se do átomo, pois o primeiro *quantum* teria arrancado o elétron do átomo. O momento linear do *quantum* da radiação gama seria muito maior do que o momento linear original do elétron, se o comprimento de onda do raio gama fosse muito menor do que o tamanho do átomo. Portanto, o primeiro *quantum* gama teria energia suficiente para arrancar o elétron do átomo, e nunca se poderia observar nada mais do que um ponto na órbita do elétron; assim, não haveria órbita eletrônica no sentido comum. A observação que se seguiria, a do terceiro estágio, mostraria o elétron em seu trajeto ao afastar-se do

átomo. De um ponto de vista muito geral, não há maneira alguma de se descrever o que acontece entre duas observações consecutivas. É, certamente, tentador dizer-se que o elétron deve ter estado em algum lugar, no intervalo de tempo entre essas duas observações e que, portanto, o elétron deveria ter descrito algum tipo de trajetória ou órbita, mesmo que seja impossível saber-se qual. Esse seria um argumento razoável em física clássica. Em teoria quântica, porém, teria sido um abuso de linguagem que, como veremos depois, não pode ser justificado. Deixaremos, por enquanto de esclarecer se esse aviso deva ser entendido como uma afirmação a respeito da maneira pela qual deveríamos nos expressar acerca dos eventos atômicos ou, então, uma asserção sobre os próprios eventos, isto é, se ele se refere à epistemologia ou à ontologia. Seja como for, temos que proceder com grande cautela, no uso das palavras, ao fazermos uma afirmação sobre o comportamento das partículas atômicas.

Na verdade, não precisamos de maneira alguma falar em partículas. Em muitas experiências, é mais conveniente falar-se em ondas de matéria; por exemplo, as ondas estacionárias de matéria ao redor do núcleo atômico. Uma tal descrição contradiria frontalmente a outra descrição, caso se ignorasse as limitações impostas pelas relações de incerteza. Levando-se em conta essas restrições, a contradição é evitada. O uso de "ondas de matéria" é conveniente, por exemplo, ao se lidar com a radiação emitida pelo átomo. Por intermédio de suas frequências e intensidades, a radiação presta informação acerca da distribuição de carga oscilante no átomo e, nesse caso, a descrição ondulatória aproxima-se muito mais da verdade do que a de partículas. Eis por que Bohr advogou o uso de *ambas* descrições e chamou-as de *complementares* entre si. As duas descrições são, certamente, mutuamente exclusivas, pois uma certa coisa não pode ser ao mesmo tempo uma partícula (i.e., substância confinada a um volume muito pequeno) e uma onda (i.e., substância espalhada sobre uma região de dimensões muito grandes), mas se complementam uma à outra. Jogando-se com ambas as descrições, indo-se de uma à outra e de volta novamente, obteremos por fim a impressão correta desse estranho tipo de realidade que permeia os fenômenos atômicos. Bohr faz uso, em muitas instâncias, na interpretação da teoria quântica, do conceito de *complementaridade*. O conhecimento da posição de uma partícula é complementar ao conhecimento de sua velocidade (ou momento linear). Se conhecermos uma dessas grandezas com alta precisão, a outra não poderá ser conhecida com essa mesma alta precisão; mesmo assim, precisaremos conhecer ambas as imprecisões a fim de determinar o comportamento do sistema. A descrição espaço-temporal dos eventos atômicos é, por sua vez, complementar à descrição determinista desses eventos. Por outro lado, a função de probabilidade obedece uma equação de movimento (como também é o caso na mecânica newtoniana, para as coordenadas de posição) e a variação dessa função, no correr do tempo, fica completamente determinada por

essa equação quântica, mas ela não permite uma descrição no espaço e tempo. Por outro lado, a observação experimental compele à descrição espaço-temporal mas quebra a continuidade presente na função de probabilidade, por mudar nosso conhecimento do sistema.

Em geral, o dualismo entre as duas distintas descrições da mesma realidade já não mais constitui uma dificuldade, pois sabemos, da formulação matemática, que contradições não podem ocorrer. O dualismo entre as duas descrições complementares, ondas e partículas, é claramente exemplificado na flexibilidade do esquema matemático. Na mecânica de matrizes, o formalismo é normalmente escrito de maneira a assemelhar-se ao da mecânica newtoniana, com equações de movimento para as coordenadas de posição e momento linear das partículas. E elas podem, por uma simples transformação, ser reescritas de maneira a tomar a forma de uma equação de onda, para ondas tridimensionais ordinárias de matéria. Assim, portanto, essa possibilidade de se jogar com descrições complementares distintas encontra sua analogia nas diferentes transformações que o esquema matemático oferece; e tal possibilidade não conduz a dificuldade alguma na interpretação de Copenhague da teoria quântica.

Uma dificuldade verdadeira, no entendimento dessa interpretação, surge, todavia, quando se faz a famosa pergunta: mas o que ocorre "realmente" em um evento atômico? Já dissemos antes que o mecanismo e os resultados de uma observação experimental podem sempre ser enunciados em termos de conceitos da física clássica. Mas o que se deduz de uma tal observação é uma função de probabilidade, uma expressão matemática que traz consigo tanto enunciados sobre possibilidades ou tendências, como também afirmações sobre nosso conhecimento de fatos. Assim, pois, não podemos objetivar completamente o resultado de uma observação experimental, e não temos como descrever o que "acontece" entre essa observação e a seguinte. Isso deixa a impressão de que tenhamos introduzido, na teoria, um elemento subjetivo, como se quiséssemos dizer: o que acontece depende de nossa maneira de observar o sistema ou do fato de que o estamos observando. Antes de discutirmos esse problema da subjetividade, é necessário explicar muito claramente porque se enfrentaria dificuldades, sem a menor esperança de solução, ao se tentar descrever o que ocorreria entre duas observações consecutivas.

Com esse propósito em vista, é útil discutir-se a seguinte experiência *ideal.* Suponhamos que uma pequena fonte de luz monocromática irradie um feixe em direção a uma tela negra que ostente dois pequenos furos. O diâmetro dos furos não poderá ser muito maior que o comprimento de onda da luz utilizada, mas a distância entre os dois terá que ser muito maior. A alguma distância, atrás da tela, situa-se uma chapa fotográfica para registro da luz incidente. Se a experiência fosse descrita em termos ondulatórios, dir-se-ia então que a onda primária penetrou através dos dois furos: haveria ondas esféricas secundárias, partindo dos furos, que interfe-

ririam uma com a outra, o que daria lugar a uma figura de intensidade variável na chapa fotográfica, as assim chamadas *franjas de interferência.*

O enegrecimento da chapa fotográfica é um processo quântico, uma reação química produzida por *quanta* individuais de luz. Portanto, deveria ser também possível descrever-se a experiência em termos de *quanta* de luz. Se fosse possível dizer-se o que acontece a um único *quantum* de luz, no intervalo de tempo entre sua emissão pela fonte luminosa e sua posterior absorção na chapa fotográfica, poder-se-ia argumentar assim: o único *quantum* de luz pode atravessar o primeiro furo ou o segundo. Se tiver atravessado o primeiro, sendo então por ele defletido, sua probabilidade de ser absorvido, em um ponto qualquer da chapa fotográfica, não poderá depender de estar o segundo furo fechado ou não. A distribuição de probabilidades, na chapa, seria então a mesma que ocorreria se somente o primeiro furo estivesse aberto. Se a experiência fosse repetida um grande número de vezes e se agrupássemos todos os casos em que o *quantum* luminoso tivesse passado pelo primeiro furo, o enegrecimento da chapa devido a esses casos corresponderia a essa distribuição de probabilidade. Se considerássemos somente aqueles *quanta* de luz que tivessem atravessado o segundo furo, o enegrecimento resultante corresponderia a uma distribuição de probabilidade que decorreria da hipótese de que somente o segundo furo estivesse aberto. O enegrecimento total, portanto, seria assim tão-somente a soma dos enegrecimentos nos dois casos: em outras palavras, não ocorreria figura de interferência alguma. Sabemos, todavia, que isso não é assim e que a experiência iria exibir franjas de interferência. Portanto, a assertiva de que qualquer *quantum* de luz passou *ou* pelo primeiro *ou* pelo segundo furo é problemática e conduz a contradições. Este exemplo mostra, claramente, que o conceito de função de probabilidade não permite uma descrição do que ocorre entre duas observações consecutivas. Qualquer tentativa de se encontrar uma tal descrição daria lugar a contradições: isso deve ser entendido como significando que a palavra "acontece" está restrita à observação experimental.

Bem, isso é realmente um resultado muito estranho, visto que parece indicar que a observação experimental tem um papel decisivo no acontecimento e que a realidade varia, dependendo se a observamos ou não. A fim de esclarecer esse ponto, temos que analisar o processo de observação experimental de mais perto.

Para começar, é importante lembrarmo-nos que, em ciência natural, não estamos interessados no Universo como um todo, nós nele incluídos, mas sim em dirigir nossa atenção a alguma parte dele, que será então o objeto de nossos estudos. Em física atômica, essa parte é, frequentemente, um objeto muito pequenino, uma partícula atômica ou um agregado dessas partículas, às vezes bem maior - seu tamanho não importa; mas é importante que se reconheça que uma boa porção do Universo, nós incluídos, *não* faz parte do objeto em sua observação experimental.

Bem, a interpretação teórica de uma experiência inicia-se com os dois estágios que já discutimos. No primeiro deles, temos que descrever o programa da experiência, eventualmente combinando-o com uma primeira observação, em termos de física clássica, e depois, transcrever tal descrição em uma função de probabilidade. A função de probabilidade obedece as leis da teoria quântica e a variação contínua dessa função, com o correr do tempo, pode ser calculada a partir das condições iniciais: este é o estágio dois. Digamos assim: a função de probabilidade combina em si elementos objetivos e subjetivos. Ela contem asserções sobre possibilidades ou tendências mais propícias *(potentia*, na filosofia aristotélica) e tais assertivas são completamente objetivas, por não dependerem de observador algum; ademais, contém ela afirmações acerca de nosso conhecimento do sistema que, é claro, são subjetivas no sentido de poderem diferir de um experimentador a outro. Em casos ideais, o elemento subjetivo contido na função de probabilidade pode ser em prática desprezível quando comparado com a faceta objetiva. Os físicos falam, então, de um "caso puro".

Quando, então, chegamos ao momento da próxima observação experimental, cujo resultado deveria ser predito pela teoria, é muito importante entender-se que o objeto da pesquisa está em contato com a outra parte do mundo, a saber, o programa experimental, a régua de medida, etc., antes ou, pelo menos, no momento da observação. Isso significa que a equação de movimento, a que satisfaz a função de probabilidade, contém agora, de fato, a influência da interação com o instrumento de medida. Essa influência introduz um novo elemento de incerteza, pois o aparelho de medida é, necessariamente, descrito na linguagem da física clássica; uma tal descrição contém todas as incertezas que digam respeito à estrutura microscópica do instrumento de medida que conhecemos da termodinâmica e, visto que esse instrumento está ligado ao resto do mundo, aquela descrição conterá, de fato, as incertezas da estrutura microscópica do mundo todo. Essas incertezas podem ser rotuladas de *objetivas*, dentro dos limites em que elas possam ser consideradas como uma simples consequência da descrição em termos da física clássica e pelo fato de independerem do observador. Por outro lado, elas podem ser consideradas como *subjetivas*, na medida em que se referem ao nosso conhecimento incompleto do mundo.

Após a ocorrência dessa interação, a função de probabilidade passa a conter o elemento objetivo de tendência e, também, o elemento subjetivo do conhecimento incompleto, mesmo que se tivesse um "caso puro", antes da interação. É, assim, por essa razão, que o resultado da observação não pode, em geral, ser *predito* com certeza: o que pode ser teoricamente previsto é a probabilidade de um certo resultado ocorrer na observação e, tal afirmação sobre essa probabilidade poderá ser verificada, repetindo-se a experiência um grande número de vezes. A função de probabilidade não descreve - em oposição ao procedimento usual na mecânica clássica -

um certo evento mas, pelo menos durante o processo de observação, um conjunto todo de acontecimentos possíveis.

O ato de observação, por si mesmo, muda a função de probabilidade de maneira descontínua; ele seleciona, entre todos os eventos possíveis, o evento real que ocorreu. Visto que, pela observação, nosso conhecimento do sistema mudou descontinuamente, sua representação matemática também sofreu essa descontinuidade. E falamos, então, de um "salto quântico". Quando ouvirmos o velho adágio, *Natura non facit saltus,* como base para se criticar a teoria quântica, poderemos replicar que, certamente, nosso conhecimento pode mudar abruptamente e esse fato justifica o uso da expressão "salto quântico".

Portanto, a transição do "possível" ao "real" ocorre durante o ato de observação. Se quisermos descrever o que ocorre em um evento atômico, deveremos compreender que o termo "ocorre" pode somente ser aplicado à observação, e não ao estado de coisas durante duas observações consecutivas. Aquele termo diz respeito à componente física do ato de observação, mas não à psíquica e poderemos dizer que a transição do "possível" ao "real" toma lugar tão logo a interação do objeto com o instrumento de medida (e, portanto, com o resto do mundo) tenha se realizado; ele nada tem a ver com o ato de registrar o resultado por parte da mente do observador. A mudança descontínua na função de probabilidade, no entanto, tem lugar com o ato de registro, pois é essa mudança descontínua do nosso conhecimento, no instante do registro, que tem por imagem a mudança descontínua da função de probabilidade.

Até que ponto, então, finalmente conseguiu-se uma descrição objetiva do mundo e, especialmente, do domínio atômico? Na física clássica, a ciência teve como ponto de partida a crença – ou dever-se-ia dizer ilusão? - de que se podería descrever o mundo ou, pelo menos, partes dele, sem referência alguma a nós mesmos. Isso é, em grande medida, de fato possível. Por exemplo, todos nós temos conhecimento da existência da cidade de Londres *, independentemente de tê-la visto ou não. Poder-se-ia dizer que a física clássica é justamente aquele tipo de idealização segundo a qual podemos falar de coisas do mundo sem qualquer referência a nós mesmos. Seu sucesso deu lugar ao ideal bem amplo de uma descrição objetiva do mundo. Objetividade tornou-se, assim, o critério primeiro na avaliação de qualquer resultado científico. Pergunta: e a interpretação de Copenhague ainda segue esse ideal? Talvez se possa dizer que a teoria quântica corresponda a esse ideal tanto quanto possível. Certamente, a teoria quântica não contém características subjetivas genuínas, não

* N.T. Heisenberg, possivelmente, teve em mente o caso de Emmanuel Kant que conhecia o Tâmisa, por leituras e conversas com viajantes e marujos em Königsberg, sem jamais ter lá estado.

introduzindo a mente do físico como parte do evento atômico. Mas a teoria quântica começa pela divisão do mundo em "objeto" e o resto do mundo e, também, do fato de que, pelo menos para o "resto do mundo", utilizamos conceitos clássicos em nossa descrição. Essa divisão é arbitrária e, historicamente, uma consequência direta do método científico; a utilização de conceitos clássicos é, afinal, uma consequência da maneira geral do ser humano pensar. Mas isso já constitui uma referência a nós mesmos e isso na medida em que nossa descrição não é completamente objetiva.

Afirmamos, na abertura deste capítulo, que a interpretação de Copenhague da teoria quântica começa por um paradoxo. Ela começa pelo fato de que descrevemos nossos experimentos apoiados nos conceitos da física clássica e, ao mesmo tempo, do conhecimento de que esses conceitos não se ajustam à Natureza de maneira precisa. É na tensão reinante entre esses dois pontos de partida que se encontra a raiz do caráter estatístico da teoria quântica.

Eis por que já foi sugerido algumas vezes que se deveria abandonar por completo os conceitos clássicos e que uma mudança radical nos conceitos utilizados para se descrever as experiências poderia, possivelmente, levar-nos de volta a uma descrição não-estática e completamente objetiva da Natureza.

Essa sugestão, todavia, baseia-se em um engano. Os conceitos da física clássica constituem, por certo, um refinamento dos conceitos da vida quotidiana e são parte essencial da linguagem que propicia a base da ciência natural toda. Nossa real situação na ciência é tal que nós usamos *de fato* os conceitos clássicos para descrever as experiências e isso apresentou-se como um desafio à teoria quântica, quer dizer, se ela é realmente capaz de exibir uma interpretação teórica dessas experiênciais com base naqueles conceitos. Não adianta discutir-se o que poderia ser feito se fôssemos seres diferentes dos humanos que somos. Neste ponto, temos que compreender, como disse von Weizsäcker, que "a Natureza precedeu o homem mas o homem precedeu a ciência natural". A primeira parte da citação justifica a física clássica, no seu ideal de objetividade completa. A segunda, diz-nos que não podemos escapar ao paradoxo da teoria quântica, vale dizer, à necessidade de se usar conceitos clássicos.

Temos que adicionar alguns comentários sobre o procedimento concreto na interpretação teórica quântica dos eventos atômicos. Já dissemos que sempre se tomou, como ponto de partida, a divisão do mundo em objeto, aquilo a estudar, e o resto do mundo, e que essa separação é um tanto arbitrária. Não deveria, de fato, fazer diferença alguma no resultado final se, por exemplo, adicionássemos uma parte do instrumento de medida, ou o instrumento inteiro, ao objeto e aplicássemos, então, as leis quânticas a esse objeto novo e mais complexo. Pode-se mostrar que uma tal modificação do tratamento teórico não viria alterar as predições que dizem respeito a uma dada experiência. Isso segue, matematicamente, do fato de que as leis da

teoria quântica são quase idênticas às leis clássicas para aquela classe de fenômenos em que a constante de Planck possa ser considerada uma grandeza desprezível. Seria, entretanto, um erro acreditar-se que essa aplicação das leis teóricas quânticas ao instrumento de medida poderia ajudar a evitar o paradoxo básico da teoria quântica.

O instrumento de medida somente fará por merecer seu nome se estiver em contato bem próximo com o resto do mundo, e se houver uma interação entre esse instrumento e o observador. Portanto, a incerteza, com respeito ao comportamento microscópico do mundo, penetrará no sistema teórico quântico também naquele caso, da mesma maneira que na primeira interpretação. Fosse o instrumento de medida isolado do resto do mundo, ele não seria um instrumento de medida, nem tampouco poderia ser descrito nos termos da física clássica.

No que diz respeito a essa situação, Bohr enfatizou ser mais realista afirmar-se que a divisão entre objeto e o resto do mundo não é arbitrária. Nossa situação concreta, o trabalho de pesquisa em física atômica, é usualmente a seguinte: desejamos entender um certo fenômeno, queremos reconhecer como esse fenômeno decorre das leis gerais da Natureza. Portanto, aquela parte de matéria, ou de radiação, que toma parte no fenômeno, é o "objeto" natural no tratamento teórico e deveria ser separado, nesse sentido, dos instrumentos utilizados no estudo do fenômeno. Isso de novo realça o elemento subjetivo na descrição dos eventos atômicos, pois o instrumento de medida foi construído pelo observador, e temos que nos lembrar que aquilo que observamos não é a Natureza em si mas, sim, a Natureza exposta ao nosso método de questionar. Nosso trabalho científico, em física, consiste em fazer perguntas sobre a Natureza, usando a linguagem que possuímos e tentando conseguir as respostas por via experimental, com os meios de que dispomos. Dessa maneira, a teoria quântica nos faz lembrar, como disse Bohr, de uma sabedoria muito antiga segundo a qual -na procura da harmonia da vida - jamais deveremos esquecer que, no drama da existência, somos ao mesmo tempo atores e espectadores. É compreensível que, em nosso relacionamento científico com a Natureza, nossa própria atividade tore-se muito importante quando temos que lidar com partes da Natureza onde só podemos penetrar fazendo uso das mais elaboradas ferramentas.

Capítulo IV

A TEORIA QUÂNTICA E AS RAÍZES DA CIÊNCIA ATÔMICA

O conceito de átomo remonta a tempos muito mais antigos do que a aurora da ciência moderna no século XVII; ele teve sua origem na antiga filosofia grega e constituía, naquele período, o conceito central do materialismo propagado por Demócrito e Leucipo. Por outro lado, as interpretações modernas dos eventos atômicos têm muito pouco a ver com a genuína filosofia materialista; pode-se, de fato, dizer que a física atômica afastou a atividade científica da tendência materialista que a permeara durante o século XIX. É, pois, interessante comparar-se a evolução da filosofia grega, na direção do conceito de átomo, com o posicionamento atual sobre esse conceito em física moderna.

A ideia de que a matéria fosse constituída de partículas diminutas, básicas e indivisíveis, surgiu pela primeira vez no processo de elaboração dos conceitos de *Matéria*, *Ser* e *Vir-a-Ser*, que caracterizaram o primeiro período da filosofia grega. Esse período iniciou-se, no século VI a.C., com Tales - fundador da escola milesiana - a quem Aristóteles atribui o seguinte pronunciamento: "A água é a causa material de todas as coisas". Essa afirmação, por estranha que nos possa parecer, exprime, como observou Nietzsche, três ideias filosóficas fundamentais. Primeira: a pergunta sobre a causa material de todas as coisas; segunda: a exigência de que a pergunta seja respondida racionalmente, sem apelo a mitos e misticismos; terceira: o postulado de que, no entendimento final das coisas, se possa reduzir tudo a um único princípio. O pronunciamento de Tales foi a primeira sugestão da ideia de uma substância fundamental, da qual todas as outras coisas seriam formas transitórias. Nesse contexto, a palavra "substância" certamente não foi, naquele tempo, interpretada no sentido puramente material que, frequentemente, a ela atribuímos em nossos tempos. A vida estaria ligada a essa substância ou a ela seria inerente, e Aristóteles também atribui a Tales a seguinte afirmação: "Todas as coisas estão cheias de deuses". Mesmo assim, no primeiro dos pronunciamentos acima citados, a questão dizia respeito à causa material das coisas e não é difícil de se imaginar que Tales tenha abraçado esse ponto de vista levado por considerações meteorológicas. Entre todas as coisas, sabemos que a água pode assumir as mais

numerosas e variadas formas; pode, no inverno, surgir como gelo e neve, como também metamorfosear-se em vapor e formar nuvens. Parece transformar-se em terra nos deltas dos rios e sabe jorrar do solo. Ela é um imperativo vital. É, portanto, natural - ao se pensar em uma substância fundamental – que se escolhesse a água como primeira opção.

A ideia de substância fundamental foi, então, levada adiante por Anaximandro, discípulo de Tales e igualmente cidadão de Mileto. Anaximandro negava que a substância fundamental fosse água ou qualquer outra das substâncias conhecidas. Ensinava, o discípulo, ser a substância primeira infinita, eterna e indestrutível, e que envolvia o mundo. E ela tinha como se transformar nas várias substâncias com as quais estamos familiarizados. Teofrasto citando Anaximandro: "Aquilo de onde surgiram as coisas retornam, conforme foi ordenado, para oferecer uma à outra reparação e simpatia, pela injustiça cometida na ordenação do tempo".

Nessa filosofia, a antítese entre Ser e Vir-a-Ser tem o papel fundamental. A substância primeira, infinita e indestrutível, o Ser não diferenciado, degenera em várias outras formas ou coisas, o que entre elas dá lugar a conflitos sem fim. O Vir-a-Ser é visto como uma forma de degradação do Ser infinito - uma desintegração pelo conflito, por fim expiada por um retorno àquilo que não tem forma nem qualidades. O conflito, a que o discípulo de Tales se referia, é aquilo que ocorre entre formas opostas, sendo responsável pela criação do mundo. O quente é oposto ao frio, o seco ao molhado, etc. Esses opostos pelejam entre si e qualquer predominância de um sobre o outro é vista como uma "injustiça", razão pela qual os opostos devem oferecer reparação, um ao outro, no tempo marcado. Também de acordo com Anaximandro, há um "movimento eterno", a criação e a destruição dos mundos de um infinito ao outro.

Pode ser interessante observar-se, agora, que o problema - se a substância primeira pode, ou não, ser uma entre as substâncias conhecidas ou deve, por necessidade, ser algo essencialmente diferente -ocorre de uma maneira um tanto diversa na parte mais moderna da física atômica. Os físicos, nos dias de hoje, tentam encontrar, para a matéria, uma lei fundamental de movimento da qual se possa derivar matematicamente todas as partículas elementares e suas propriedades. Essa equação fundamental de movimento poderia referir-se a ondas de um tipo conhecido (por exemplo, ondas protônicas e ondas mesônicas), ou então a ondas de caráter completamente diferente, que nada têm a ver com as ondas conhecidas ou partículas elementares. No primeiro desses casos, significaria que todas as partículas elementares poderiam ser explicadas de alguma maneira por um número menor de partículas elementares "fundamentais"; de fato, a física teórica nas duas últimas décadas * tem de preferência

* N.E. O leitor deve ter em mente que as conferências que deram lugar a este livro foram proferidas em fins de 1955 e começo de 1956.

favorecido essa linha de pesquisa. No segundo, todas as diferentes partículas elementares poderiam ser explicadas a partir de uma substância universal* (chamá-la-íamos de energia ou matéria), nenhuma das partículas elementares podendo ser considerada mais elementar do que outra. O último ponto de vista, é claro, corresponde à doutrina de Anaximandro e estou convencido de que, em física moderna, é o ponto de vista correto. Mas retornemos à filosofia grega.

O terceiro dos filósofos milesianos, Anaxímenes, um associado de Anaximandro, ensinava ser o ar a substância primeira. Damos-lhe a palavra: "Da mesma maneira que nossa alma, que é ar, nos mantém unidos, também o sopro e o ar mantêm o mundo inteiro". Anaxímenes introduziu, na filosofia milesiana, a ideia de que os processos de condensação e de rarefação fossem a causa da transformação da substância primeira nas demais substâncias. A condensação do vapor d'água, que dá lugar às nuvens, era exemplo evidente e, como seria de se esperar, a diferença entre vapor d'água e ar não era entendida naquela época.

Na filosofia de Heráclito de Éfeso, o conceito de Vir-a-Ser ocupa a posição de destaque. Heráclito tomou como matéria primeira aquela que anda: o fogo. A dificuldade - a de reconciliar a ideia de um único princípio fundamental com a variedade infinita dos fenômenos - é resolvida por ele pelo reconhecimento de que o conflito dos opostos é realmente um tipo de harmonia. Para Heráclito, o mundo é, ao mesmo tempo, Um e Muitos e é, justamente, "a tensão oposta" dos contrários que constitui a unidade do Um. Em suas palavras: "Devemos saber que a guerra é comum a todas as coisas, conflito é justiça, e que todas as coisas vêm a ser e depois deixam de ser pela discórdia".

Volvendo os olhos para o desenvolvimento da filosofia grega até esse ponto compreende-se que ela foi conduzida, de seus primórdios até o estágio que ora discutimos, pela tensão entre Unidade e Variedade. Segundo nossos sentidos, o mundo consiste de uma variedade infinita de coisas e eventos, sons e cores. Mas, a fim de entendê-lo, temos que introduzir algum tipo de ordem, e ordem significa reconhecer o que seja igual, sendo portanto alguma forma de Unidade. Brota daí a convicção de que exista um princípio fundamental e, ao mesmo tempo, da dificuldade de dele se derivar a infinita variedade das coisas. Que devesse existir uma causa material para todas as coisas era um ponto de partida natural, visto que o mundo seria constituído de matéria. Todavia, ao se levar a ideia da Unidade fundamental às suas últimas consequências, chegava-se àquele Ser não diferenciado, infinito e eterno, que, fosse ele material ou não, não poderia por si mesmo explicar a variedade infinita das coisas. Isso conduziu à antítese entre Ser e Vir-a-Ser e, por fim, à solução de Heráclito, segundo a qual a mudança, ela mesma, é o princípio fundamental: "a mudança

*N.T. Vide Apêndice ao fim deste livro: "A Matéria Primordial".

imperecível que renova o mundo", no dizer dos poetas. Mas a mudança por si mesma não é uma causa material e, portanto, foi representada na filosofia de Heráclito pelo fogo, o elemento básico, ao mesmo tempo matéria e força motriz.

Podemos observar, neste ponto, que a física moderna está, sob um certo ponto de vista, extremamente próxima das doutrinas de Heráclito. Se substituirmos a palavra "fogo" por "energia", poderemos quase repetir suas afirmações, palavra por palavra, segundo nosso ponto de vista moderno. A energia é, de fato, a substância da qual são feitas todas as partículas elementares, átomos e, portanto, todas as coisas e é também aquilo que move. A energia é uma substância porque sua quantidade total não muda, e as partículas elementares podem de fato ser formadas dessa substância, conforme se observa em muitas experiências sobre a criação dessas partículas. A energia pode ser transmutada em movimento, calor, luz e em tensão. Ela pode ser chamada a causa fundamental de toda mudança no mundo. Essa comparação, entre a filosofia grega e as ideias da ciência moderna, será discutida posteriormente.

A filosofia grega retomou, por algum tempo, ao conceito do Um, nos ensinamentos de Parmênides, que viveu em Eléia, ao sul da Itália. Sua contribuição mais importante ao pensamento grego consistiu, talvez, em ter introduzido um argumento puramente lógico em metafísica: "Não se pode conhecer o que não é - isso é impossível – nem nome lhe dar; pois o que pode ser pensado e o que pode existir são uma mesma coisa". Portanto, somente o Um *é*, e não existem nem Vir-a-Ser nem Deixar-de-Ser. Parmênides negava a existência de espaço vazio por razões lógicas. E, por ter assumido que toda mudança requer espaço vazio, rejeitou a ideia de mudança por considerá-la uma ilusão.

Mas, afinal, a filosofia não poderia, por muito tempo, basear-se nesse paradoxo. Empédocles, de Agrigento, na costa sul da Sicília, foi o primeiro a passar do monismo a um certo tipo de pluralismo. A fim de evitar a dificuldade de que uma substância primeira não pode explicar a variedade das coisas e fenômenos, ele assumiu quatro elementos básicos, a saber, terra, água, ar e fogo. Esses elementos misturar-se-iam uns aos outros e se separariam pela ação de Amor e Conflito. Portanto, esses dois últimos, que eram, de muitas maneiras, encarados como tão corpóreos quanto os quatro elementos básicos, foram vistos como responsáveis pela mudança imperecível. Empédocles descreve a formação do mundo da seguinte maneira: primeiro, há a Esfera Infinita do Um (como na filosofia de Parmênides); mas, na substância primeira, todas as quatro "raízes" aproximam-se e se misturam pela presença do Amor; então, quando o Amor está se afastando e o Conflito chegando, os elementos em parte se separam e parcialmente se combinam; depois disso, os elementos se separam, por completo, e o Amor afasta-se do mundo; finalmente, o Amor está de volta, os elementos tornam

a se misturar e o Conflito está-se indo, o que dá lugar ao retomo à Esfera Original.

Essa doutrina de Empédocles representa uma mudança bem definida na direção de um ponto de vista mais materialista na filosofia grega. Os quatro elementos são bem menos um princípio fundamental do que substâncias materiais e reais. Aqui, pela primeira vez, expressa-se a ideia de que a mistura e separação de umas poucas substâncias, fundamentalmente diferentes, explicam a variedade infinita das coisas e fenômenos. O pluralismo jamais fascina aqueles que preferem pensar em princípios fundamentais. Mas, afinal, é um compromisso razoável que, por um lado, evita as dificuldades do monismo e, por outro, permite a introdução de algum tipo de ordem.

O próximo passo, na direção do conceito do átomo, deve-se a Anaxágoras, natural de Clazômena, na Jônia, que foi contemporâneo de Empédocles. Viveu ele por cerca de trinta anos em Atenas, provavelmente na primeira metade do século V a.C. Anaxágoras realça a ideia da mistura de elementos, na hipótese de que toda mudança seja causada por mistura e separação. Admite uma variedade infinita de "sementes", infinitamente pequenas, das quais todas as coisas seriam compostas. As "sementes" não se identificam com os quatro elementos de Empédocles, delas existindo um número incontável de diferentes espécies. Elas se misturam umas às outras, depois novamente se separam e, dessa maneira, dão lugar a todas as mudanças. A doutrina de Anaxágoras permite, pela primeira vez, que se dê uma interpretação geométrica ao termo "mistura". Como admite o filósofo que exista um número incontável de diferentes "sementes", essa mistura pode ser descrita como composta de dois tipos de areia de coloração diversa. Ademais, "sementes" podem variar em número e posição relativa. Anaxágoras supõe que elas estejam presentes em todas as coisas, a diversidade entre coisas provindo das diferentes proporções com que as "sementinhas" delas participem. Diz ele: "Todas as coisas estão em tudo; nem é possível que se mantenham separadas, mas todas as coisas participam do todo". O Universo de Anaxágoras é posto em movimento não por Amor e Conflito, conforme pensara Empédocles mas sim por *Nous* que podemos traduzir como "Mente".

Somente um passo a mais faltava a essa filosofia, para dela se chegar ao conceito de átomo, o que ocorreu com Leucipo de Mileto e Demócrito de Abdera. A antítese entre Ser e Não-Ser, na filosofia de Parmênides, é aqui secularizada na antítese entre o "Cheio" e o "Vazio". Ser não é somente o Um, que pode repetir-se um número infinito de vezes. Ele é agora o *átomo*, a menor unidade indivisível da matéria. O átomo é eterno e indestrutível mas tem um tamanho finito. Movimentos tornam-se possíveis através do espaço vazio entre os átomos. Assim, pela primeira vez na história, enuncia-se a ideia da existência de partículas extremamente

diminutas e indivisíveis (nós as chamaríamos de “partículas elementares”) que seriam os “tijolos” da matéria.

De acordo com esse novo conceito de átomo, a matéria não consistiria somente do “Cheio” mas, também, do “Vazio”, aquele espaço livre por onde os átomos se movem. O argumento lógico de Parmênides contra o “Vazio”, que o Não-Ser não pode existir, foi simplesmente ignorado por não concordar com a experiência. Do nosso ponto de vista moderno, diríamos que o espaço vazio entre os átomos, na filosofia de Demócrito, não era o Nada; pois esse espaço suporta a geometria e a cinemática, tornando assim possível os vários arranjos e movimentos dos átomos. Mas a possibilidade de existir um espaço vazio tem sempre sido um problema controvertido em filosofia. Na teoria da relatividade geral, a resposta oferecida é que a geometria é produzida pela matéria ou a matéria pela geometria. Isso corresponde mais de perto ao ponto de vista, esposado por muitos filósofos, segundo o qual o espaço seria definido pela extensão da matéria. Mas Demócrito, claramente, afasta-se dessa maneira de ver, a fim de tornar mudança e movimento possíveis.

Os átomos, segundo Demócrito, eram todos formados da mesma substância que tinha a propriedade de Ser, embora ostentando tamanhos e formas diversas. Os átomos eram, portanto, imaginados como divisíveis do ponto de vista matemático mas não do ponto de vista físico. Eles podiam se mover e ocupar diferentes posições no espaço, mas não apresentavam outras propriedades físicas. Por exemplo, não tinham cor, odor, nem sabor. As propriedades da matéria, que percebemos por nossos sentidos, eram supostas provir das posições e movimentos dos átomos no espaço. Da mesma maneira que tanto tragédia como comédia podem ser escritas fazendo-se uso do mesmo alfabeto, a vasta variedade dos fenômenos no mundo pode ser realizada pelos mesmos átomos, considerando-se seus diferentes arranjos e movimentos. Geometria e cinemática, possibilitadas pelo Vazio, mostraram ser ainda, de alguma maneira, mais importantes que o puro Ser. Demócrito é citado como tendo dito: “Uma coisa meramente parece ter cor, meramente parece ser doce ou amarga. Somente átomos e o espaço vazio têm existência real”.

Os átomos, na filosofia de Leucipo, não se movem simplesmente ao acaso. Leucipo parece ter acreditado em um determinismo completo, pois ele é conhecido por ter enunciado que “nada acontece sem razão; tudo tem uma justificação ou uma necessidade”. Os atomistas não apresentaram argumento algum para justificar o movimento inicial dos átomos, o que mostra simplesmente que eles pensavam em uma descrição causal do movimento atômico; ora, a causalidade só pode explicar acontecimentos futuros a partir de eventos passados, mas jamais poderá explicar seu começo.

As ideias básicas da teoria atômica pré-socrática foram assumidas e modificadas, em parte, por filósofos gregos posteriores. A fim de se poder

fazer uma comparação com a moderna física atômica, é importante mencionar-se a explicação sobre a constituição da matéria apresentada por Platão em seu diálogo *Timeu*. Platão não era um atomista; ao contrário, Diógenes Laércio relata que Platão desgostava de Demócrito, a tal ponto que gostaria de ver todos os seus livros queimados. Platão, todavia, combinou ideias próximas ao atomismo com as doutrinas da escola pitagórica e os ensinamentos de Empédocles.

A escola pitagórica foi uma ramificação do Orfísmo, este remontando aos tempos do culto a Dionísio. Ocorreu, ai, uma combinação entre religião e matemática que, desde então, exerceu enorme influência sobre o pensamento humano. Os pitagóricos parecem ter sido os primeiros a compreender a força criadora inerente às formulações matemáticas. A descoberta por eles feita que duas cordas soam em harmonia se seus comprimentos têm uma razão simples demonstrava quão útil a matemática poderia ser para o entendimento dos fenômenos naturais. Para os pitagóricos, todavia, isso não era tanto um problema de entendimento. Para eles, a razão numérica simples, dos comprimentos de duas cordas vibrantes, *criava*, por si mesma, a harmonia sonora. Havia, também, uma boa parte de misticismo nas doutrinas da escola pitagórica, algo que para nós, hoje em dia, torna-se difícil de entender. E, assim, fazendo a matemática parte da religião que professavam, eles levantaram um ponto essencial no desenvolvimento do pensamento humano. Tomo a liberdade de citar uma frase de Bertrand Russell sobre Pitágoras: "Não sei de nenhum outro homem que tenha sido tão influente na esfera do pensamento".

Platão sabia da descoberta dos sólidos regulares feita pelos pitagóricos e da possibilidade de combiná-los com os elementos de Empédocles. Associou ele as partes menores do elemento terra ao cubo, do ar ao octaedro, do fogo ao tetraedro, e da água ao icosaedro. Não havia um elemento que correspondesse ao dodecaedro; a respeito, Platão diz somente que "havia ainda uma quinta combinação de que Deus fez uso ao delinear o Universo".

Quanto à questão de se os sólidos regulares, que representam os quatro elementos, possam ser mesmo comparados com os átomos, Platão deixa bem claro que tais sólidos não são indivisíveis. Platão os constrói a partir de dois triângulos básicos, o equilátero e o isósceles, esses juntados uns aos outros para se obter a superfície desses sólidos. Portanto, os elementos podem (pelo menos parcialmente) ser transformados uns nos outros. Ademais, os sólidos regulares podem ser decompostos em uma coleção de triângulos básicos e, deles, novos sólidos poderão então ser construídos. Assim, por exemplo, um tetraedro e dois octaedros podem ser desfeitos de maneira a que fiquemos com vinte triângulos equiláteros, que poderão ser recombinados de forma a que tenhamos um icosaedro. Isso significa que um átomo de fogo e dois de ar podem ser combinados de maneira a dar um átomo de água. Por outro lado, os triângulos básicos não

podem ser considerados como matéria, pois não têm extensão no espaço. É tão-somente quando esses triângulos são juntados uns aos outros, para formar um sólido regular, que uma unidade de matéria é criada. As menores porções de matéria não são as Entidades fundamentais, como era o caso na filosofia de Demócrito, mas sim formas matemáticas. Aqui, é bastante evidente que a forma é mais importante que a substância que a formou.

Após esse breve delineamento da filosofia grega, dos primórdios à formulação do conceito de átomo, podemos retornar à física moderna e perguntar como nossa concepção atual, sobre o átomo e a teoria quântica, se compara com aquele conceito que o passado nos legou. Historicamente, a palavra "átomo" - utilizada em física e química modernas - foi associada ao objeto errado, durante o renascimento da ciência no século XVII, pois as menores partículas pertencentes a um elemento químico são ainda, como se sabe, sistemas um tanto complexos de unidades ainda menores. Em física, essas unidades menores correspondem, hoje em dia*, às chamadas partículas elementares, e é perfeitamente óbvio que, se existe em física moderna algo que possa ser comparado aos átomos de Demócrito, são partículas elementares como próton, nêutron, elétron e mésons.

Demócrito estava bem ciente do fato de que se os átomos devessem *explicar*, por seus movimentos e arranjos, propriedades da matéria como cor, odor e gosto, eles mesmos não poderiam ostentar esses atributos. Ele, portanto, privou-os dessas qualidades e o seu átomo é, assim, uma entidade material um tanto abstrata. Demócrito, todavia, dotou-os do atributo de "ser", de extensão espacial, forma e movimento. Teve ele que manter essas qualidades pois teria sido muito difícil, em ausência delas, utilizar o conceito de átomo. Por outro lado, isso implica que seu conceito de átomo não pode explicar sua geometria, extensão espacial e existência, por não poder reduzi-las a algo mais fundamental. O ponto de vista moderno** sobre as partículas elementares, no que diz respeito a esse ponto, parece ser mais consistente e radical. Discutamos a seguinte questão: que *é* uma partícula elementar? Estamos acostumados a falar, por exemplo, "um nêutron" sem, todavia, poder exibir uma descrição bem definida e um significado do termo. Podemos fazer uso de descrições diversas e apresentar "o nêutron" ora como uma partícula, ora como uma onda ou, ainda, como um pacote de ondas. Mas sabemos que nenhuma dessas descrições é precisa. O nêutron, certamente, não tem cor, odor ou sabor. Nesse sentido, ele se assemelha ao átomo da filosofia grega. Mas a partícula elementar é, em alguma medida, despojada mesmo dos outros atributos mantidos por Demócrito: conceitos de geometria e cinemática, como forma ou movimento espaciais, a ela não podem ser atribuídos consistentemente. Se quisermos oferecer uma descrição precisa de partícula elementar– e, aí, a ênfase está no termo "precisa"- a única coisa que poderemos apresentar é uma função de probabilidade.

* N.T. O que corresponde a trinta anos atrás.

** N.T. Ver nota anterior.

Mas, então, perceberemos que nem mesmo o atributo de "ser" (caso este possa ser classificado de "atributo") pertence àquilo que está sendo descrito. A função de probabilidade diz respeito à possibilidade de "ser" ou uma tendência para "ser". A partícula elementar na física moderna, portanto, é ainda uma entidade bem mais abstrata que o átomo dos antigos gregos e é, por essa mesmíssima qualidade, guia mais consistente na busca da explicação do comportamento da matéria.

Na filosofia de Demócrito, todos os átomos consistem da mesma substância, caso a palavra "substância" possa ser aqui utilizada. Por outro lado, as partículas elementares da física moderna têm massa e, isso, no mesmo sentido limitado com que exibem outras propriedades. Visto que massa e energia, de acordo com a teoria da relatividade, são essencialmente os mesmos conceitos, podemos dizer que todas as partículas elementares consistem de energia. Isto poderia ser interpretado como fazendo da energia a "substância primordial" do Universo. Ela tem, de fato, a propriedade essencial inerente à ideia de "substância primeira", a saber, sua conservação. Eis por que mencionamos, anteriormente, que os pontos de vista da física moderna são, a esse respeito, bem próximos aos de Heráclito, caso interpretemos "fogo" como energia. De fato, energia é aquilo que move; ela pode ser considerada como causa primeira de toda mudança, podendo transformar-se em matéria, calor ou luz. O conflito entre opostos, na filosofia de Heráclito, pode - na visão moderna - ser encontrado no conflito entre duas formas diversas de energia.

Na filosofia de Demócrito, os átomos são unidades eternas e indestrutíveis de matéria, e jamais podem se transformar uns nos outros. No que diz respeito a essa questão, a física moderna assume uma posição frontalmente contrária à de Demócrito, favorecendo Platão e os pitagóricos . Com efeito, as partículas elementares certamente não são unidades eternas e indestrutíveis de matéria, pois podem de fato se transformar em outras. Concretamente, se duas dessas partículas, movendo-se pelo espaço com energia cinética bastante elevada, acabarem por colidir, o resultado da colisão poderá ser a criação de muitas outras partículas elementares, a expensas da energia disponível, com a eventual destruição de ambas as partículas iniciais. Eventos desse tipo têm sido frequentemente observados e oferecem prova cabal de que as partículas elementares compartilham da mesma "substância", a saber, energia. Quanto à semelhança entre os pontos de vista modernos e aqueles de Platão e dos pitagóricos, ela pode ser levada mais além. As "partículas elementares", no *Timeu* de Platão, não são, em última análise, substâncias mas, sim, formas matemáticas. E "todas as coisas são números" é uma sentença atribuída a Pitágoras. Mas as poucas formas matemáticas conhecidas naqueles tempos eram geométricas como os poliedros regulares ou os triângulos que compõem sua superfície. Na teoria quântica moderna, não pode haver dúvida de que as partículas elementares acabarão, também, por ser consideradas formas

matemáticas, mas de natureza muito mais complexa. Os filósofos gregos pensaram em termos de formas estáticas e encontraram-nas nos sólidos regulares. Contrariamente, a ciência moderna teve, como ponto de partida, desde seus começos nos séculos XVI e XVII, o problema dinâmico. O elemento básico, na física desde Newton, não é uma configuração ou uma forma geométrica, mas sim uma lei dinâmica. A equação de movimento que a expressa vale para todos os tempos e, nesse sentido, é eterna, o que não é o caso das formas geométricas, como, por exemplo, as órbitas, mutáveis por natureza. Semelhantemente, as formas matemáticas - que representarão as partículas elementares - serão soluções de alguma lei eterna de movimento para a matéria. De fato, eis um problema que ainda não encontrou sua solução. Com efeito, a lei fundamental de movimento para a matéria ainda não é conhecida e, portanto, é atualmente impossível derivar-se matematicamente as propriedades das partículas elementares a partir de uma lei primeira *. Mas, mesmo assim, a física teórica - em seu estado atual - parece não estar muito longe desse objetivo e podemos, pelo menos, dizer que tipo de lei poderemos esperar. A equação final de movimento, para a matéria, será provavelmente uma equação de ondas, não linear e quantizada - para operadores associados a campos de ondas - que simplesmente representará a matéria e, não, qualquer tipo específico de onda ou partícula. Tal equação de ondas será, provavelmente, equivalente a sistemas um tanto complicados de equações integrais, cuja solução revelará seus “autovalores” e “autofunções”, na nomenclatura dos físicos. Essas “autofunções” representarão, finalmente, as partículas elementares; elas serão as formas matemáticas que virão, por assim dizer, substituir os poliedros regulares dos pitagóricos. Poderíamos mencionar, aqui, que essas “autofunções” decorrerão da equação fundamental da matéria, por um processo matemático que muito se assemelha àquele pelo qual as vibrações harmônicas, da corda vibrante pitagórica, decorrem da equação de ondas que governa seu movimento. Mas, como já dissemos, o problema das partículas elementares ainda não foi resolvido.

Se persistirmos na linha pitagórica de pensamento, poderemos manter a esperança de que a nova lei fundamental de movimento venha a se revelar como algo matematicamente simples, mesmo que sua solução se mostre assaz complicada. É difícil apresentar-se um bom argumento que nos propicie uma convicção com respeito a essa simplicidade - exceto pelo fato de que, até agora, tenha sido sempre possível escrever-se as equações fundamentais da física sob formas matematicamente simples. Este fato condiz com a religião pitagórica e muitos físicos compartilham da mesma convicção, embora nenhum argumento convincente tenha sido, até agora, apresentado a respeito.

* N.T. Vide Apêndice a respeito ao fim deste volume: “A Matéria Primordial”.

Podemos, neste ponto, acrescentar um argumento relativo à pergunta feita, frequentemente, por leigos sobre o conceito de partícula elementar, em física moderna: por que os físicos mantêm que suas partículas elementares não podem ser divididas em pedacinhos ainda menores? A resposta a esta questão mostra, claramente, quão mais abstrata é a ciência moderna que a filosofia grega. O argumento desenvolve-se assim: para começar, como se poderia dividir uma partícula elementar? Certamente, só se fizermos uso de forças imensas e de ferramentas muito finas. As únicas ferramentas disponíveis são outras partículas elementares. Portanto, os únicos processos que, eventualmente, permitiriam conseguir essa divisão seriam colisões de duas partículas de altíssima energia. De fato, elas *podem* ser cindidas em tais processos e, às vezes, em muitos fragmentos; mas, mesmo assim, esses fragmentos serão, como antes, partículas elementares (e não meros pedaços daquelas), suas massas resultando da grande energia cinética das partículas colidentes. Em outras palavras, a transmutação de energia em matéria torna possível que os fragmentos de partículas elementares sejam novamente elementares.

Após a comparação da visão moderna da física com a filosofia grega, devemos adicionar um aviso, à guisa de cautela: que essa comparação não leve a mal-entendidos. Talvez possa parecer, à primeira vista, que os filósofos gregos tenham chegado, por uma intuição genial, a conclusões idênticas, ou muito semelhantes àquelas que chegamos em tempos modernos, após muitos séculos de trabalho duro em experiências e no uso da matemática. Essa interpretação, sobre a comparação que fizemos, seria, no entanto, um engano completo. Há uma enorme diferença entre a filosofia grega e a ciência moderna, que é justamente a atitude empírica desta última. Desde os tempos de Galileu e Newton, baseou-se a ciência moderna no estudo detalhado da Natureza e no postulado segundo o qual só poderão ser aceitas afirmações que foram verificadas ou que pelo menos o possam ser, em princípio, pela experimentação. A ideia de que, graças a uma experiência, se possa isolar certos fenômenos da Natureza, a fim de estudar seus detalhes e descobrir qual é a lei permanente da mudança contínua, não ocorreu aos filósofos gregos. Pode-se, pois, dizer que a ciência moderna, desde os seus primórdios, baseou-se em uma concepção bem mais modesta mas, ao mesmo tempo, muito mais firme do que aquela da filosofia grega. Eis por que as asserções da física moderna são expressas, em geral, de maneira mais responsável do que as asserções daquela filosofia. Quando, por exemplo, Platão afirmou que as menores partículas de fogo são tetraedros, não é fácil de entender o que ele realmente quis dizer com isso. Será que só simbolicamente estaria a forma do tetraedro associada ao fogo? Ou seria, talvez, que essas partículas menores de fogo agiriam como tetraedros rígidos ou, quem sabe, como tetraedros elásticos e, se assim fosse, por que tipo de força poderiam eles ser separados em triângulos equiláteros, etc.? Aqui, a ciência moderna

faria a seguinte pergunta: de que maneira se poderia decidir, experimentalmente, se os átomos de fogo são tetraedros e não, digamos, cubos? Portanto, quando a ciência moderna afirma que o próton é uma certa solução de uma equação fundamental da matéria, isso significa que podemos, a partir dessa solução, deduzir matematicamente todas as possíveis propriedades do próton e, além disso, verificar a validade da solução por intermédio de experiências sobre cada uma daquelas propriedades. Essa possibilidade de verificar, experimentalmente, a correção de uma afirmação teórica, com grande precisão e nas muitas facetas do objeto experimental, dá um peso enorme àquela afirmação, o que não ocorria na aurora da filosofia grega.

Mesmo assim algumas asserções da antiga e respeitável filosofia grega estão, em certa medida, próximas daquelas da ciência moderna. Isso simplesmente mostra quão longe se pode chegar combinando-se a nossa vivência diária da Natureza (que temos sem necessidade de apelar a experimentações) com o esforço, sem esmorecimento, de encontrar alguma ordem lógica nessa experiência quotidiana, a fim de se poder entendê-la a partir de princípios gerais.

Capítulo V

O DESENVOLVIMENTO DAS IDEIAS FILOSÓFICAS, APÓS DESCARTES, EM COMPARAÇÃO COM A NOVA SITUAÇÃO DA TEORIA QUÂNTICA

Nos dois mil anos que se seguiram ao apogeu da ciência e cultura gregas, nos séculos V e IV a.C., o espírito humano esteve em grande medida ocupado com problemas de um tipo diferente daqueles outrora abordados na Grécia. Nos primeiros séculos da cultura grega, o impulso mais forte encontrara sua origem na realidade imediata do mundo em que vivemos, que percebemos por nossos sentidos. Nessa realidade, intensa e cheia de vida, não havia uma boa razão para se realçar a diferença entre matéria e mente, ou entre corpo e alma. Por outro lado, percebe-se claramente, na filosofia de Platão, a emergência de uma nova concepção de realidade. No famoso mito da caverna, Platão compara os homens a prisioneiros guardados sob ferros em uma caverna, onde somente podem olhar em uma única direção. Têm, os prisioneiros, uma fogueira às costas e vêem, sobre uma parede, as sombras deles mesmos e de objetos que se encontram atrás de si. Como nada percebem a não ser essas sombras, eles as consideram reais, sem, todavia, ter a vivência desses objetos. Finalmente, um dos prisioneiros escapa e, saindo da caverna, passa à luz do Sol. Pela primeira vez, ele se defronta com coisas reais e compreende que, até então, fora ludibriado pelas sombras. Também pela primeira vez, conhece a verdade e pensa com tristeza na sua longa vida pregressa, em meio às trevas. O verdadeiro filósofo é o prisioneiro que, escapando da caverna, depara-se com a luz da verdade; é ele quem possui o conhecimento *real* das coisas. Essa associação imediata com a *verdade* ou, no sentido cristão, com *Deus*, é a nova realidade a superar a realidade sensível do mundo. Essa associação imediata com Deus ocorre na alma humana, não no mundo exterior, e esse foi o problema que, mais do que qualquer outro, ocupou o pensamento humano nos dois milênios que se seguiram a Platão. Nesse período, os olhos dos filósofos voltaram-se à alma humana e à relação desta com Deus, aos problemas da ética e à interpretação da *Revelação*, com exclusão do mundo exterior. Foi somente com a erupção da Renascença italiana que, novamente, uma mudança gradual teve lugar na mente humana, resultando no renascimento do interesse sobre a Natureza.

O grande progresso da ciência natural, nos séculos XVI e XVII, foi precedido e acompanhado por um correspondente desenvolvimento das ideias filosóficas, essas estando bem de perto ligadas aos conceitos fundamentais da ciência. Poderá, portanto, ser instrutivo tecer comentários acerca dessas ideias, do ponto de vista a que finalmente chegou a ciência moderna em nossos tempos.

O primeiro grande filósofo desse novo período da ciência foi René Descartes, que viveu na primeira metade do século XVII. As suas ideias, que mais de perto dizem respeito ao desenvolvimento do método científico, estão no seu *Discurso sobre o Método.* Alicerçado na dúvida e no raciocínio lógico, ele tenta encontrar uma base completamente nova e, à sua maneira de ver, firme, para erigir um sistema filosófico. Descartes não admite a Revelação como uma tal base, nem uma aceitação não crítica do que é percebido pelos sentidos. Assim, ele começa com seu *método da dúvida,* levantando suspeitas sobre aquilo que nos contam os sentidos sobre os resultados de nosso raciocínio e chega, finalmente, à sua famosa sentença: *cogito ergo sum,* isto é, "penso, logo existo". Em outras palavras: não posso duvidar de minha existência pois ela decorre do fato de eu estar pensando. E, após estabelecer, dessa maneira, a existência do "Eu", ele passa a provar a existência de Deus, seguindo essencialmente as linhas da filosofia escolástica. Finalmente, a existência do mundo decorre do fato de que Deus nos deu uma forte predisposição a acreditar na existência do mundo e é simplesmente inconcebível que Ele nos tenha enganado.

Essa base da filosofia cartesiana é radicalmente diferente daquela dos antigos filósofos gregos. Para Descartes, o ponto de partida não é um princípio fundamental ou substância primeira, mas sim a tentativa de se chegar a um conhecimento fundamental. E ele compreende que aquilo que conhecemos sobre nossa mente é mais seguro do que o que sabemos sobre o mundo exterior. Todavia, o seu ponto de partida, com o "triângulo" *Deus-Mundo-Eu,* já simplifica de uma maneira perigosa a base de seus raciocínios ulteriores. A separação entre matéria e espírito, ou entre alma e corpo, que teve seu começo na filosofia de Platão, é agora total. Deus está separado tanto do "Eu" como também do mundo. Deus é alçado tão alto, acima do mundo e dos homens, que Ele finalmente aparece na filosofia de Descartes como um ponto de referência comum, a estabelecer a relação entre o "Eu" e o mundo.

A antiga filosofia grega tentara achar uma ordem, na infinita variedade de coisas e fenômenos, pela procura de algum princípio fundamental de unificação. Já Descartes procurou estabelecer a ordem por meio de uma divisão (i.e., separação) fundamental. Todavia, as três partes que resultam dessa divisão perdem algo de sua natureza se cada qual for considerada separadamente das demais. Se quisermos mesmo fazer uso dos conceitos fundamentais cartesianos é essencial que Deus

se encontre no mundo e no "Eu", e é também essencial que o "Eu" não possa ser realmente separado do mundo. Descartes, certamente, sabia da inegável necessidade dessa ligação, mas a filosofia e ciência natural no período seguinte desenvolveram-se com base na polaridade entre *res cogitans* ("coisa pensante") e *res extensa* ("coisa extensa"), a ciência natural concentrando seu interesse na "coisa extensa". A influência da divisão cartesiana sobre o pensamento humano, nos séculos que se seguiram, dificilmente poderá ser exagerada, mas é justamente essa divisão que teremos que criticar, mais adiante, do atual ponto de vista da física.

Certamente, seria errado dizer-se que Descartes, através de seu novo método filosófico, tenha dado uma nova direção ao pensamento humano. O que ele realmente fez foi formular, pela primeira vez, uma tendência no pensamento humano cuja presença já pudera ser sentida na Renascença italiana e na Reforma. Temos, então, a revivescência do interesse pela matemática que expressa uma crescente influência de elementos platónicos em filosofia e a insistência na religião pessoal. O crescimento do interesse pela matemática veio favorecer um sistema filosófico que partira do raciocínio lógico e que tentava, com esse método, chegar a alguma verdade que seria tão certa quanto uma conclusão matemática. A insistência na religião pessoal separava o "Eu" e sua relação com Deus do mundo. O interesse em combinar o conhecimento empírico com a matemática, como ocorreu no trabalho de Galileu, foi talvez em parte devido à possibilidade de se chegar, dessa maneira, a algum conhecimento que pudesse ser mantido completamente afastado das disputas teológicas que se sucederam durante a Reforma. Esse conhecimento empírico poderia ser formulado sem qualquer menção a Deus ou a nós mesmos e vinha favorecer a separação dos três conceitos fundamentais, *Deus, Mundo, Eu,* ou a separação entre "coisa pensante" e "coisa extensa". Nesse período, havia, em alguns casos, entre pioneiros da ciência empírica, um acordo tácito segundo o qual o nome de Deus ou de uma causa fundamental não deveriam ser mencionados.

Por outro lado, as dificuldades da "separação" poderiam ser claramente percebidas desde o começo. Assim, por exemplo, na distinção entre "coisa pensante" e "coisa extensa", Descartes viu-se forçado a pôr os outros animais inteiramente do lado da "coisa extensa". Portanto, animais e plantas não seriam considerados essencialmente diferentes das máquinas, seu comportamento sendo completamente determinado por causas materiais. Mas, mesmo assim, sempre pareceu difícil negar-se completamente a existência de algum tipo de alma nos animais e, aqui, parece-nos que o conceito mais antigo de alma, presente na filosofia de São Tomás de Aquino, é mais natural, menos forçado, que o conceito cartesiano de "coisa pensante", mesmo que estejamos convencidos de que as leis da física e química sejam estritamente válidas em organismos vivos. Uma das

definidas de tal maneira que a afirmação siga necessariamente. Mas isso nada nos diz sobre até que ponto podemos usar os conceitos de “pensar” e “ser”, ao procurarmos nosso caminho. Esse problema dos limites de aplicabilidade dos conceitos que diariamente utilizamos será, por fim, sempre uma questão empírica.

As dificuldades do realismo metafísico foram percebidas logo após Descartes e tornaram-se o ponto de partida para o empirismo filosófico, sensualismo e positivismo.

Os três filósofos que podem ser considerados como representantes dos primórdios do empirismo filosófico foram Locke, Berkeley e Hume. Locke mantém, em oposição a Descartes, que todo conhecimento é, em última análise, baseado na experiência. Essa experiência pode ser a sensação ou percepção de uma atividade de nossa própria mente. Segundo Locke, o conhecimento é a percepção do acordo ou desacordo entre duas ideias. O passo seguinte foi dado por Berkeley. Se, de fato, todo nosso conhecimento deriva da percepção, não há sentido algum em se afirmar que as coisas realmente existem; pois, se houver uma percepção, não fará a menor diferença que existam coisas ou não. Portanto, ser percebido é idêntico a existir. Essa linha de argumentação foi então estendida a um ceticismo extremo por Hume, ao negar os processos de indução e causação, o que o levou a conclusões que, se aceitas, conduziriam à destruição das bases de toda ciência empírica.

A crítica feita ao realismo metafísico pelo empirismo filosófico é certamente justificável na medida em que ela sirva de aviso contra o uso ingênuo da palavra “existência”. Mas as afirmações confiantes desse empirismo podem ser analogamente criticadas. Afinal, nossas percepções não são basicamente feixes de cores ou gamas sonoras; aquilo que percebemos já é apreendido como alguma coisa, a ênfase aqui sendo na palavra “coisa” e é, portanto, duvidoso se iremos ganhar em entendimento ao considerarmos as percepções, ao invés das coisas, como os elementos básicos da realidade.

A dificuldade subjacente foi claramente reconhecida pelo positivismo moderno (ou positivismo lógico). Essa linha de pensamento expressa sua crítica, a respeito do uso ingênuo de certos termos como, por exemplo, “coisa”, “percepção” e “existência”, fazendo uso de um princípio geral pelo qual a questão de uma dada sentença ter, de fato, sentido só poderá ser respondida após um exame crítico e exaustivo. Esse princípio e a atitude em que se baseia derivam da lógica matemática. Assim, o procedimento da ciência natural é descrito como a atribuição de símbolos aos fenômenos. Os símbolos podem, como é o caso em matemática, ser combinados de acordo com certas regras e, dessa maneira, afirmações feitas sobre os fenômenos poderão ser representadas por combinações desses símbolos. Todavia, não se dirá, de uma combinação de símbolos que viole as regras, que ela seja falsa mas, simplesmente, que é desprovida de sentido.

A dificuldade evidente nesse argumento é a ausência de qualquer critério geral que nos permita afirmar que uma sentença não tem sentido. Uma decisão definitiva somente será possível se a sentença pertencer a um sistema fechado de conceitos e axiomas, o que -durante o desenvolvimento da ciência natural - seria mais exceção que regra. Em alguns casos, a conjetura de que uma certa sentença seja desprovida de sentido deu lugar historicamente a progressos importantes, pelo fato de abrir caminho à criação de novas associações, o que não teria sido possível se a sentença fizesse sentido. Um exemplo em teoria quântica já discutido neste livro é a sentença que segue: "Em que órbita, em torno do núcleo, se move o elétron?" Todavia, falando de uma maneira geral, o esquema positivista, calcado que foi na lógica matemática, é demasiadamente estreito para permitir uma descrição da Natureza, descrição que forçosamente terá de fazer uso de termos e conceitos só vagamente definidos.

A tese filosófica de que todo conhecimento é essencialmente baseado na experiência conduziu por fim a um postulado que diz respeito à elucidação lógica de qualquer enunciado sobre a Natureza. Tal postulado poderia ser justificado nos tempos da física clássica mas, desde o advento da teoria quântica, aprendemos que ele não pode ser satisfeito. Os termos "posição" e "velocidade" de um elétron, por exemplo, pareciam outrora estar perfeitamente bem definidos tanto no que dizia respeito ao seu sentido como também em suas possíveis ligações um com outro; e, de fato, eram conceitos claramente definidos dentro da estrutura matemática da mecânica newtoniana. Mas, do ponto de vista da mecânica quântica, viu-se que eles não estavam, de fato, bem definidos, como evidencia a correspondente relação de incerteza. Pode-se assim dizer, a respeito do seu posicionamento na mecânica newtoniana, que aqueles conceitos eram bem definidos, mas não frente à Natureza. Isso mostra que jamais poderemos saber, de antemão, que limitações deverão ser impostas na aplicabilidade de certos conceitos quando os estendemos a partes mais recônditas da Natureza, nas quais só conseguiremos penetrar pelo uso das técnicas mais elaboradas. Portanto, nesse processo de penetração, somos às vezes obrigados a usar nossos conceitos de uma maneira injustificada e desprovida de sentido. Assim sendo, a insistência no postulado de uma completa elucidação lógica tornaria a ciência inexeqüível. Nesse ponto, a física moderna nos faz lembrar de velha sabedoria: aquele que insiste em jamais dizer algo errado deve permanecer em silêncio.

Uma combinação dessas duas linhas de pensamento, que se originaram, por um lado, em Descartes e, por outro, em Locke e Berkeley, foi tentada na filosofia de Kant, o fundador do idealismo alemão. A parte de seu trabalho que importa para se estabelecer uma comparação com os resultados da física moderna encontra-se em sua *Crítica da Razão Pura*. Nessa obra, Kant retorna a questão de se o conhecimento é somente baseado na experiência ou pode provir de outras fontes, e chega à

conclusão de que nosso conhecimento é, em parte, *a priori*, isto é, conhecimento que não pode ser inferido indutivamente da experiência. Ele, portanto, distingue entre conhecimento "empírico" e conhecimento que seja *a priori.* Ao mesmo tempo, faz ele a distinção entre proposições "analíticas" e "sintéticas". Proposições "analíticas" são as que simplesmente decorrem do uso do raciocínio lógico e, assim, sua negação levaria à autocontradição. E as proposições que não são "analíticas" são ditas "sintéticas".

De acordo com Kant, qual o critério para se saber se um certo conhecimento é *a priori*? Kant concorda que todo conhecimento parte da experiência, mas ele completa seu pensamento afirmando que nem todo conhecimento deriva da experiência. É bem verdade que a experiência nos ensina que uma certa coisa tem essa ou aquela propriedade, mas ela não nos ensina que essas propriedades não poderiam ser diferentes. Portanto, se uma certa proposição for considerada juntamente com sua necessidade, ela terá que sera *priori.* A experiência jamais propicia a. seus julgamentos uma total generalidade. Assim, por exemplo, a sentença "O sol se levanta cada manhã" significa que não conhecemos, no passado, nenhuma exceção à regra e que esperamos que ela continue a vigorar no futuro. Podemos, todavia, imaginar exceções à regra. Mas se uma regra for enunciada em completa generalidade, e se for impossível imaginar- se qualquer exceção, ela tem que sera *priori.* Um julgamento "analítico" é sempre a *priori;* mesmo que uma criança aprenda aritmética brincando com bolas de gude, ela não necessitará voltar à experiência com as bolinhas para saber que "dois mais dois são quatro". O conhecimento empírico, por outro lado, é sempre "sintético".

Mas serão possíveis julgamentos "sintéticos *a priori*"? Kant tenta provar a existência de tais julgamentos, exibindo exemplos nos quais os critérios acima parecem ser satisfeitos. Espaço e tempo, diz ele, são formas *a priori* da intuição pura. No que diz respeito ao espaço, ele alinha os seguintes argumentos metafísicos:

1. O espaço não é um conceito empírico, abstraído de outras experiências, pois o espaço é pressuposto quando atribuímos sensações à ação de uma causa exterior, e a experiência do exterior somente será possível pela apreensão perceptiva do espaço.

2. O espaço é uma realização necessária de caráter *a priori,* que serve de base a todas as percepções exteriores; pois não podemos imaginar a inexistência do espaço, embora possamos imaginar um espaço vazio.

3. O espaço não é um conceito discursivo e genérico das relações entre coisas em geral, isso porque há somente um espaço, do qual o que chamamos de "espaços" são partes e não instâncias.

4. O espaço é considerado ter tamanho infinito, mantendo dentro de si todas as suas partes; essa relação é diferente daquela que ocorre entre um

conceito e suas instâncias e, portanto, o espaço não é um conceito mas sim uma forma de intuição.

Esses argumentos não serão discutidos aqui. Eles foram mencionados simplesmente como exemplos para o tipo geral de prova que Kant tinha em mente para os julgamentos "sintéticos *a priori".*

No que diz respeito a física, Kant tomou, como julgamento *a priori,* além de espaço e tempo, a lei da causalidade e o conceito de substância. Em estágio ulterior de seu trabalho, ele tentou incluir, na mesma categoria, a lei da conservação da matéria, a igualdade da "ação e reação" e, mesmo, a lei da gravitação. Nenhum físico estaria inclinado a seguir Kant nesse seu ponto de vista caso a expressão *a priori* fosse usada no sentido absoluto que lhe foi atribuído pelo filósofo de Königsberg. Em matemática, Kant aceitou o caráter *a priori* da geometria euclidiana.

Antes de compararmos essas doutrinas de Kant com os resultados propiciados pela física moderna, devemos mencionar uma outra parte de seu trabalho a que voltaremos mais adiante. A questão bastante incômoda de se "as coisas realmente existem", ou não, que deu lugar ao empirismo filosófico, aparece também no sistema kantiano. Kant, todavia, não seguiu a linha de Berkeley e Hume, embora tal escolha teria sido logicamente consistente. Preservou ele a noção da "coisa-em-si" como sendo diversa daquilo que é percebido e, dessa maneira, manteve alguma ligação com o realismo filosófico.

Passando agora a comparar as doutrinas de Kant com a física moderna, tem-se à primeira vista a impressão de que seu conceito central de "julgamentos sintéticos *a priori"* tenha sido completamente aniquilado pelas descobertas de nosso século. A teoria da relatividade modificou nossos pontos de vista sobre espaço e tempo e, de fato, revelou características inteiramente novas de espaço e tempo, das quais nada transparece nas formas kantianas *a priori* da intuição pura. A lei da causalidade não mais é aplicável à teoria quântica e a lei de conservação da matéria perdeu sua validade no caso das partículas elementares. Evidentemente, Kant não poderia ter previsto essas novas descobertas mas, como estava convencido de que seus conceitos tornar-se-iam "a base de qualquer metafísica futura que possa ser chamada de ciência", é interessante se entender onde seus argumentos falharam.

Tomemos, como exemplo, a lei da causalidade. Afirmava Kant que, toda vez que observamos um evento, temos que assumir que haj a um evento precedente do qual o outro decorra de acordo com alguma regra. Isso, dizia ele, é a base de todo trabalho científico. Nessa questão, não importa se possamos, ou não, encontrar sempre o evento precedente do qual o outro decorra. Mas é um fato que poderemos, em muitos casos, encontrá-lo. Todavia, mesmo que não sejamos capazes disso, nada nos proíbe de perguntar qual poderia ter sido esse evento precedente e, então, procurá-lo. A lei da causalidade, portanto, reduz-se ao método da pesquisa científica:

essa lei propicia a condição que torna possível a ciência. Visto que nós, de fato, aplicamos esse método, a lei da causalidade é *a priori* e não uma decorrência da experiência. Esse é o ponto de vista kantiano.

Mas é isso verdade em física atômica? Consideremos um átomo que possa emitir uma partícula alfa, o átomo de rádio. O instante da emissão dessa partícula não pode ser previsto. A respeito, podemos tão-somente dizer que, em média, a emissão ocorrerá em cerca de dois mil anos. Portanto, quando observamos a emissão, nós de fato não procuramos um evento anterior do qual a emissão deva, de acordo com a regra, decorrer. Do ponto de vista lógico, seria perfeitamente possível procurar-se esse evento precedente, e não devemos nos sentir desencorajados pelo fato de que, até agora, jamais um deles tenha sido encontrado. Mas por que, pode-se perguntar, o método científico de fato mudou sua posição, desde Kant, a respeito de uma questão tão fundamental como essa?

Duas respostas possíveis podem ser dadas a esta última pergunta. A primeira: fomos convencidos pela experiência que as leis da teoria quântica são corretas e, se assim for, elas nos ensinam que um evento precedente, que seja a causa para a emissão, em um dado instante de tempo, não pode ser encontrado. A segunda: conhecemos o evento precedente mas não com grande precisão. E conhecemos as forças no núcleo atômico que são responsáveis pela emissão da partícula alfa. Esse conhecimento, todavia, contém a incerteza que provém da interação entre o núcleo e o resto do mundo. Se quisermos saber por que a partícula alfa foi emitida naquele particular instante de tempo, teremos que conhecer a estrutura microscópica do mundo inteiro, nós, nele incluídos, e isso não é factível. Portanto, não mais valem os argumentos kantianos que favorecem o caráter *a priori* da lei da causalidade.

Discussão análoga poderia ser apresentada sobre o caráter *a priori* de espaço e tempo como formas de intuição. O resultado seria o mesmo. Os conceitos *a priori* que Kant considerou como verdade indisputável, não mais estão presentes na estrutura científica da física moderna.

Esses conceitos, todavia, ainda são parte essencial daquela estrutura, mas isso em um sentido um tanto diferente. Na discussão que fizemos sobre a interpretação de Copenhague da teoria quântica, chamamos atenção para o fato de que fazemos uso de conceitos clássicos na descrição de nosso equipamento experimental e, mais geralmente, ao descrever aquela parte do mundo a que não pertence o objeto da experiência. O uso desses conceitos, onde se incluem espaço, tempo e causalidade, é, de fato, a condição para podermos observar eventos atômicos, a qual é, nesse sentido, *a priori*. O que Kant não previu foi que esses conceitos *a priori* viessem constituir-se em condições a serem satisfeitas pela pesquisa científica e, ao mesmo tempo, com aplicabilidade limitada. Quando fazemos uma experiência, temos que admitir a existência de uma cadeia causal de eventos que, partindo do evento atômico, passa através do

equipamento experimental e que, por fim, chega, por assim dizer, ao olho do observador; não fosse causal essa cadeia, nada se poderia saber sobre o evento atômico. Mesmo assim, devemos ter em mente que física clássica e causalidade têm somente uma aplicabilidade limitada. Foi esse paradoxo fundamental da teoria quântica que jamais Kant pôde prever. A física moderna mudou a afirmação kantiana sobre a possibilidade de julgamentos "sintéticos *a priori*", passando de uma asserção metafísica a uma de natureza prática. Os julgamentos "sintéticos a *priori*" têm, consequentemente , o caráter de verdade relativa.

Se reinterpretarmos dessa maneira o *a priori* kantiano, não haverá razão para se considerar as percepções como dadas, ao invés das coisas. Exatamente como em física clássica, poderemos falar sobre aqueles eventos que não são observados, da mesma maneira que acerca daqueles que o são. O realismo prático, portanto, é parte essencial da reinterpretação quântica. No que diz respeito ao conceito kantiano da "coisa-em-si", Kant chama atenção ao fato de que nada se pode concluir, a partir da percepção, acerca da "coisa-em-si". Essa afirmação tem, como percebeu Weizsäcker, sua analogia formal no fato de que, apesar do uso dos conceitos clássicos em todas as experiências, é possível um comportamento não clássico dos objetos atômicos. A "coisa-em-si" é, no final das contas, para o físico, caso ele faça mesmo uso desse conceito, uma estrutura matemática; essa estrutura, todavia, é - contrariamente ao que pensava Kant - deduzida indiretamente da experiência.

Nessa reinterpretação, o *a priori* kantiano está indiretamente ligado à experiência na medida em que ele se formou, através do desenvolvimento do espírito humano, desde um passado muito remoto. Seguindo na trilha desse argumento, o biólogo Lorentz comparou, certa vez, os conceitos *a priori* com formas de comportamento que, nos animais, são chamadas de "esquemas herdados ou inatos". É, de fato, bastante plausível que, para certos animais primitivos, espaço e tempo sejam diversos daquilo que Kant chamou de nossa "intuição pura" de espaço e tempo. Essa intuição pode pertencer à espécie "homem" mas não ao mundo considerado como independente do homem. Mas estamos, talvez, entrando em discussões demasiadamente especulativas ao seguir o comentário, de origem biológica, sobre o *a priori.* Se mencionamos esse comentário, foi meramente como exemplo de como se pode, talvez, interpretar a expressão "verdade relativa" em conexão com o *a priori* kantiano.

Utilizamos, aqui, a física moderna como um exemplo ou, podemos dizer, como um modelo para testar os resultados de alguns sistemas filosóficos importantes que o passado nos legou e que, sem dúvida alguma, foram construídos para valer em domínios muito mais amplos. O que aprendemos especialmente da discussão das filosofias de Descartes e Kant pode, talvez, ser sumarizado como segue.

Quaisquer palavras ou conceitos que foram criados no passado, frutos da interação do homem com o mundo, não são, de fato, precisamente definidos no que se refere a seu sentido; isso quer dizer que não sabemos exatamente quão longe palavras e conceitos nos ajudarão a achar nosso caminho no entendimento do mundo. Frequentemente, sabemos que eles podem ser aplicados em um domínio amplo de experiências interiores e exteriores mas, na prática, jamais saberemos precisamente os limites de sua aplicabilidade. Isso é verdade mesmo para os conceitos mais simples e para os mais gerais como "existência", e "espaço e tempo". Portanto, jamais será possível chegar-se, pela razão pura, a alguma verdade absoluta.

Os conceitos poderão, todavia, ser precisamente definidos no que diz respeito às suas inter-relações. Isso é, de fato, o que ocorre quando os conceitos se tornam partes de um sistema de axiomas e definições que podem ser expressos consistentemente em um esquema matemático. Um tal conjunto de conceitos inter-relacionados pode vir a ser aplicável a um domínio amplo da experiência e ajudar-nos-á a encontrar nosso caminho nesse domínio. Seus limites de aplicabilidade, todavia, não serão em geral conhecidos, pelo menos não completamente.

Mesmo se compreendermos que o significado de um conceito jamais será definido com precisão absoluta, alguns conceitos são parte integrante dos métodos da ciência pelo fato de representarem, pelo menos por algum tempo, o resultado final do desenvolvimento do pensamento humano desde um passado assaz remoto; eles podem mesmo ter sido herdados e são, qualquer que seja o caso, instrumentos indispensáveis na execução do trabalho científico em nosso tempo. Neste sentido, podem eles, praticamente, ser considerados como *a priori*. Todavia, ulteriores limitações em sua aplicabilidade poderão ser futuramente descobertas.

Capítulo VI

A RELAÇÃO ENTRE A TEORIA QUÂNTICA E OUTROS RAMOS DA CIÊNCIA NATURAL

Já afirmamos que os conceitos da ciência natural podem, às vezes, ser precisamente definidos em suas inter-relações. Tal possibilidade foi exibida, pela primeira vez, nos *Principia* * de Newton e é exatamente por essa razão que o trabalho de Newton exerceu enorme influência em todo o desenvolvimento da ciência natural, nos séculos posteriores. Newton inicia os *Principia* com um conjunto de definições e axiomas que são inter-relacionados de maneira a formar o que se poderia chamar de "sistema fechado". Cada conceito pode ser representado por um símbolo matemático, e as inter-relações entre diferentes conceitos são então representadas por equações matemáticas onde aqueles símbolos comparecem. A descrição matemática do sistema assegura-lhe a inexistência de contradições. Dessa maneira, os movimentos possíveis dos corpos, sob a influência das forças que sobre eles agem, são expressos pelas soluções que as equações de movimento revelam. O sistema de definições e axiomas, que dá lugar a um conjunto de equações matemáticas, é visto como descrevendo uma estrutura eterna da Natureza, que independe de um dado espaço, como também de um dado instante de tempo.

A inter-relação entre os diferentes conceitos presentes no sistema é tão íntima que, em geral, não se pode substituir qualquer um deles sem destruir o sistema inteiro.

Por essa razão, o sistema newtoniano foi, por muito tempo, considerado como definitivo e a tarefa a que se dispuseram os cientistas do período seguinte foi simplesmente a de expandir a mecânica de Newton a domínios mais amplos da experiência. A física, de fato, desenvolveu-se ao longo dessas linhas por cerca de dois séculos.

Assim, por exemplo, podemos passar da teoria do movimento de pontos materiais à mecânica dos sólidos, aos seus movimentos de rotação

*N.T. *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis* (Londres, 6 de julho de 1686); tradução em língua inglesa por Andrew Mote, em 1729; tradução revisada por Floriano Cajori (University of California Press, Berkeley, Califórnia, 1946).

e, também, tratar os movimentos contínuos de um fluido ou os movimentos vibratórios de um corpo elástico. Todas essas partes da mecânica, isto é, da dinâmica, desenvolveram-se gradualmente, seguindo de perto a evolução da matemática, especialmente do cálculo diferencial, e seus resultados foram confirmados por experiências. A acústica e a hidrodinâmica tornaram-se ramos da mecânica. Uma outra ciência, à qual a aplicação da mecânica newtoniana era óbvia, foi a astronomia. A evolução dos métodos matemáticos levou, gradualmente, a determinações cada vez mais precisas dos movimentos dos planetas e de suas interações mútuas. Quando foram descobertos os fenômenos da eletricidade e do magnetismo, as forças elétricas e magnéticas foram comparadas às forças gravitacionais e suas ações sobre o movimento dos corpos puderam, também, ser estudadas nas linhas da mecânica newtoniana. Finalmente, no século XIX, mesmo a teoria do calor pôde ser reduzida à mecânica, com base na hipótese de que o calor realmente consiste em um movimento estatístico complicado de partículas diminutas de matéria. E, combinando os conceitos da teoria matemática das probabilidades com os conceitos da mecânica newtoniana, Clausius, Gibbs e Boltzmann mostraram que as leis fundamentais da teoria do calor podiam ser interpretadas como leis estatísticas, decorrentes da mecânica de Newton, quando aplicadas a sistemas mecânicos complexos.

Até esse ponto, o programa estabelecido pela mecânica newtoniana fora posto em prática de maneira bastante consistente e levara ao entendimento de um amplo domínio de fenômenos naturais. A primeira dificuldade surgiu nas discussões sobre o campo eletromagnético, nos trabalhos de Faraday e Maxwell. Na mecânica newtoniana, a força gravitacional era considerada como já conhecida e não como um objeto para novos estudos teóricos. Nos trabalhos de Faraday e Maxwell, todavia, os próprios campos de força tornaram-se o objeto da investigação; os físicos queriam saber como esses campos de força variavam em função da posição espacial e do tempo. Eles, então, procuraram estabelecer equações de movimento para os campos e não, diretamente, equações para os corpos sobre os quais os campos atuam. Essa mudança reconduziu ao ponto de vista que fora esposado por muitos cientistas que a Newton antecederam. Uma ação ou influência, assim lhes parecia, poderia ser transferida de um corpo a outro tão-somente quando os dois corpos se tocassem: por exemplo, em uma colisão ou pelo atrito. Newton, por sua vez, introduzira novíssima e estranhíssima hipótese ao admitir uma força capaz de agir a grandes distâncias. Bem, na teoria dos campos de força, poder-se-ia retomar à velha ideia, pré-newtoniana, da ação passar de um ponto a outro, vizinho, somente se o comportamento desses campos fosse descrito por equações diferenciais. Isso mostrou-se, de fato, possível e, assim, a descrição dos campos eletromagnéticos pelas equações de Maxwell pareceu ser uma solução satisfatória para o problema desses campos de força. Aqui, tinha-se realmente alterado o programa newtoniano. As definições e axiomas, que

Newton construíra, referiam-se a corpos e seus movimentos; mas, com Maxwell, os campos de força pareciam ter adquirido o mesmo *status* de realidade que os corpos na teoria newtoniana. Esse novo ponto de vista, como seria de se esperar, não foi facilmente aceito. E, a fim de evitar uma tal mudança no conceito de realidade, procurou-se comparar, o que parecia então plausível, os campos eletromagnéticos com os campos de deformações elásticas ou das tensões, e as ondas eletromagnéticas da teoria de Maxwell com as ondas sonoras nos corpos elásticos. Com isso, muitos físicos se convenceram de que as equações de Maxwell realmente diziam respeito às deformações de um meio elástico que chamaram de "éter"; essa denominação foi atribuída meramente para sugerir que aquele meio seria tão leve e rarefeito que teria a capacidade de penetrar nos corpos, e não poderia ser visto ou sentido. Essa explicação não era, todavia, muito satisfatória, pois não tinha como dar conta da ausência de ondas eletromagnéticas longitudinais.

Por fim, a teoria da relatividade, que discutiremos no próximo capítulo, mostrou de maneira conclusiva que o conceito de éter, como substância, a que as equações de Maxwell se referiam, tinha que ser abandonado. Os argumentos a respeito não podem ser apreciados aqui, mas o resultado a que se chegou foi que os campos tinham que ser considerados como uma realidade independente.

Um resultado ulterior e ainda mais surpreendente da teoria da relatividade restrita foi a descoberta de novos atributos do espaço e tempo, de fato uma relação entre espaço e tempo que jamais fora conhecida e que inexistira na mecânica newtoniana.

Sob o impacto dessas novas estranhezas, muitos físicos, um tanto apressadamente, chegaram à seguinte conclusão: a invalidez da mecânica newtoniana tinha, finalmente, sido demonstrada. Pois, segundo eles, a realidade primeira seria o campo e não o corpo sobre o qual ele atuaria, e a estrutura do espaço e tempo sendo descrita corretamente pelas relações de Lorentz e Einstein, e não pelos axiomas de Newton. E se, por um lado, a mecânica newtoniana tinha se mostrado, em muitos casos, uma boa aproximação, ela todavia precisava ser melhorada a fim de propiciar uma descrição mais rigorosa da Natureza.

Do ponto de vista a que, finalmente, chegamos na teoria quântica, as afirmações do parágrafo precedente seriam consideradas como uma descrição muito pobre da verdadeira situação. Em primeiro lugar, tal colocação ignora que a maioria das experiências, nas quais campos são medidos, baseiam-se na mecânica newtoniana e, em segundo, que essa mecânica não pode ser melhorada; ela é uma teoria acabada e, como tal, só pode ser substituída por uma teoria essencialmente diferente!

O desenvolvimento da teoria quântica ensinou-nos que se deveria, ao invés, descrever a situação nos seguintes termos: em qualquer circunstância em que os conceitos newtonianos podem ser utilizados, a fim de descrever

eventos na Natureza, as leis formuladas por Newton são estritamente corretas e não podem ser melhoradas. Já os fenômenos eletromagnéticos não podem ser descritos adequadamente pelos conceitos newtonianos. Eis por que as experiências sobre campos eletromagnéticos e ondas luminosas, juntamente com sua análise teórica devida a Maxwell, Lorentz e Einstein, deram lugar a um sistema fechado de definições e axiomas, e a conceitos que puderam ser representados por símbolos matemáticos, esse novo sistema exibindo a mesma coerência do sistema newtoniano, sendo todavia essencialmente diverso.

Portanto, mesmo as expectativas que tinham guiado o trabalho dos cientistas posteriores a Newton tiveram que ser abandonadas. Aparentemente, o progresso da ciência não pode sempre ser conseguido pela aplicação de leis, já estabelecidas, a novos fenômenos. Em alguns casos, os novos fenômenos observados só podem ser entendidos pela utilização de novos conceitos que se adaptem àqueles fenômenos, da mesma maneira que os conceitos newtonianos o foram aos eventos mecânicos. Esses novos conceitos deverão poder, como antes, ser inter-relacionados em um sistema fechado e representados por símbolos matemáticos. Mas se a física (ou, mais geralmente, a ciência natural) assim procedeu, surge a seguinte pergunta: Qual a relação existente entre os diferentes conjuntos de conceitos, o antigo e o novo? Se, por exemplo, os mesmos conceitos e termos ocorrem em dois conjuntos diversos e são, consequentemente, definidos de maneira distinta, no que diz respeito às suas inter-relações e representação matemática, em cada um desses conjuntos, em que sentido tais conceitos representariam a realidade?

Esse problema surgiu imediatamente após a descoberta da teoria da relatividade restrita. Os conceitos de espaço e tempo pertenciam tanto à mecânica newtoniana como à teoria relativista. Todavia, espaço e tempo, na mecânica de Newton, eram conceitos independentes, enquanto na teoria da relatividade eles foram inter-relacionados pela transformação de Lorentz. Nesse caso particular, pôde-se mostrar que as afirmações da teoria da relatividade aproximam-se das asserções newtonianas, na medida em que todas as velocidades, no sistema considerado, são pequenas quando comparadas com a velocidade da luz. Pôde-se disso concluir que os conceitos newtonianos não podem ser aplicados a eventos em que ocorram velocidades comparáveis em grandeza à velocidade da luz. Dessa maneira, encontrou-se, por fim, uma limitação essencial na mecânica newtoniana, limitação essa que não poderia ser percebida a partir de seu conjunto coerente de conceitos nem, tampouco, por simples observações feitas em sistemas mecânicos.

A relação entre dois conjuntos distintos e coerentes de conceitos sempre requer, portanto, uma investigação deveras cuidadosa. Antes de entrarmos na discussão geral sobre a estrutura de qualquer desses conjuntos fechados e coerentes de conceitos e sobre os possíveis inter-

relacionamentos entre conceitos, faremos uma breve descrição daqueles conjuntos de conceitos que, até agora, foram definidos em física. Podemos distinguir quatro sistemas que já atingiram sua forma final.

O *primeiro sistema*, a mecânica newtoniana, já foi aqui discutido. E ele muito satisfatório na descrição de todo sistema mecânico, como igualmente na descrição do movimento dos fluidos e das vibrações dos corpos elásticos; a mecânica de Newton compreende, portanto, também a estática, a acústica e a hidrodinâmica.

O *segundo sistema* fechado de conceitos formou-se durante o século XIX em conexão com a teoria do calor. Embora essa teoria tenha, por fim, podido se ligar à mecânica através do desenvolvimento da mecânica estatística, não seria realista considerá-la como parte da mecânica newtoniana. De fato, a teoria fenomenológica do calor utiliza conceitos como calor, calor específico, entropia, energia livre, etc., conceitos que não encontram correspondência em outros ramos da física. Se, partindo dessa descrição fenomenológica, se passa a uma interpretação estatística, considerando-se o calor como energia distribuída estatisticamente entre os muitos graus de liberdade, devidos à estrutura atômica da matéria, então perde o calor sua ligação com a mecânica newtoniana e com a eletrodinâ- mica e, também, com os outros ramos da física. O conceito central da interpretação estatística é o de probabilidade, que está intimamente relacionado com o conceito de entropia na teoria fenomenológica. Além do conceito de probabilidade, a teoria estatística do calor requer o conceito de energia. Mas, em física, qualquer conjunto coerente de axiomas e conceitos terá, necessariamente, que contar com os conceitos de energia, momento linear e momento angular, com a complementação das correspondentes leis de conservação que, sob certas condições, estarão em vigor. Isso assim será se esse conjunto coerente de conceitos tiver por objetivo descrever certas características da Natureza de forma correta, a qualquer tempo e em qualquer lugar; em outras palavras, características que não dependem de qualquer localização espacial ou temporal ou, como dizem os matemáticos, características que são *invariantes* por translações quaisquer do espaço e do tempo, rotações espaciais e, também, pela transformação de Galileu ou, então, do ponto de vista relativista, pela transformação de Lorentz. A teoria do calor pode, portanto, ser combinada com qualquer dos outros sistemas fechados de conceitos.

O *terceiro sistema* fechado de conceitos e axiomas teve sua origem nos fenômenos elétricos e magnéticos, e encontrou sua forma final na primeira década do século XX, através dos trabalhos de Lorentz, Einstein e Minkowski. Esse sistema compreende a eletrodinâmica, a relatividade restrita, a óptica e o magnetismo, e nele pode-se incluir também a teoria de de Broglie das ondas de matéria, para todos os diferentes tipos de partículas elementares, mas não a mecânica ondulatória de Schrödinger.

Finalmente, o *quarto sistema* coerente é, essencialmente, a teoria quântica como foi ela descrita nos dois primeiros capítulos deste livro. Seu conceito central é a função de probabilidade ou, então, a "matriz estatística", como os matemáticos a chamam, também conhecida como "matriz densidade". Esse sistema compreende as mecânicas quântica e ondulatória, a teoria dos espectros atômicos, a química e a teoria de outras propriedades da matéria como condutividade elétrica, ferromagnetismo, etc...

As relações entre esses quatro conjuntos de conceitos podem ser indicadas da seguinte maneira: o primeiro conjunto está contido no terceiro (como caso limite em que a velocidade da luz é considerada infinitamente grande) e, por outro lado, está contido no quarto conjunto (no limite em que a constante de Planck é considerada infinitamente pequena). O primeiro conjunto e, parcialmente, o terceiro pertencem ao quarto conjunto, em seus papéis *a priori* na descrição das experiências. O segundo conjunto pode ser relacionado, sem dificuldade maior, com qualquer dos outros três e é especialmente importante em sua relação com o quarto conjunto. A existência independente do terceiro e quarto conjuntos sugere a existência de um quinto conjunto, do qual o primeiro, terceiro e quarto seriam casos limites. Esse quinto conjunto será, provavelmente, encontrado algum dia em conexão com a teoria das partículas elementares.

Omitimos, dessa lista, o conjunto de conceitos relacionados com a teoria da relatividade geral, pelo fato dele não ter, possivelmente, atingido ainda sua forma final. Gostaríamos, todavia, de realçar que se trata de um conjunto de conceitos flagrantemente distinto dos quatro outros.

Após esse esboço ligeiro, talvez possamos retornar a uma questão mais geral, a saber, o que se deveria considerar como traços característicos de um tal sistema fechado de axiomas e definições. O traço mais importante talvez seja a possibilidade de para ele se encontrar uma representação matemática consistente. Essa representação terá, certamente, que garantir que o sistema esteja livre de contradições. Ele, então, estará apto, dentro de seu campo de aplicação, a enfrentar o crivo experimental. A grande variedade de fenômenos nesse campo corresponderia às numerosas soluções das equações presentes na representação matemática da teoria. Observemos, aqui, que as limitações na aplicabilidade dessa teoria não podem, em geral, ser inferidas dos próprios conceitos. Os conceitos, via de regra, não são precisamente definidos em sua ligação com a Natureza, apesar da definição precisa, presente em suas possíveis relações. Tais limitações terão que ser, portanto, descobertas experimentalmente, ao se constatar, por essa via, que os conceitos teóricos não permitem uma descrição completa dos fenômenos observados.

Temos agora, após essa breve análise da estrutura da física contemporânea, como discutir a relação entre a física e outros ramos da ciência natural. Comecemos pelo seu vizinho mais próximo, a química. É um fato

indubitável que, através da teoria quântica, as duas ciências fizeram uma união feliz. Todavia, há cem anos, elas se encontravam bem distantes uma da outra, seus métodos de pesquisa eram bastante diversos e, mais ainda, os conceitos da química não encontravam correspondência na física. Conceitos como valência, atividade química, solubilidade e volatilidade tinham um caráter basicamente qualitativo e a química mal pertencia ao rol das ciências exatas. Uma vez desenvolvida a termodinâmica, por volta dos meados do século passado, cientistas começaram a aplicá-la aos processos químicos e, desde então, a pesquisa científica nesse campo derivou da esperança de reduzir as leis da química à mecânica dos átomos. Deve-se, nesse ponto, realçar o fato de que isso não se mostrou possível dentro do arcabouço da mecânica newtoniana. Ora, a fim de propiciar uma descrição quantitativa das leis da química, havia que se formular um sistema bem mais amplo de conceitos para a física atômica. Isso foi conseguido pela teoria quântica que, afinal, tem suas raízes tanto na química quanto na física atômica. Daí foi fácil se perceber que as leis da química não tinham como ser reduzidas a uma "mecânica newtoniana das partículas atômicas", pelo fato dos elementos químicos exibirem, em seu comportamento, um grau de estabilidade completamente ausente nos sistemas mecânicos. Mas foi somente com o advento da teoria de Bohr, em 1913, que se entendeu a impossibilidade de se construir uma "química newtoniana". Quanto ao resultado final, pode-se dizer que os conceitos da química são, em parte, complementares aos conceitos mecânicos. Se soubermos que um átomo está em seu estado estacionário de energia mais baixa, estado que determina suas propriedades químicas, não podemos ao mesmo tempo falar acerca do movimento dos elétrons no átomo.

O relacionamento atual entre biologia, por um lado, e física e química, por outro, pode ser visto como muito semelhante ao que existia entre química e física há cem anos*. Os métodos da biologia diferem daqueles da física e química, os conceitos biológicos sendo de caráter mais qualitativo que os das ciências exatas. Conceitos como vida, órgão, célula, função de um órgão, percepção não encontram correspondência em física e química. Por outro lado, a maior parte dos avanços em biologia, durante os últimos cem anos, foram conseguidos pela aplicação da química e física ao organismo vivo e toda a tendência da biologia, em nosso tempo, é explicar os fenômenos biológicos com base nas leis físicas e químicas. Mas fica a dúvida latente: será justificada essa esperança?

Assim como no caso da química, aprende-se de experiências biológicas simples que os organismos vivos possuem um grau de estabilidade que as estruturas altamente complexas - formadas por diversos tipos de moléculas - não poderiam ter baseando-se apenas nas leis da física ou da química. Pode-se, portanto, concluir que algo de novo deva ser acrescen

* N.T. Vide Apêndice a respeito ao fim deste volume: "Da Biologia Teórica".

tado àquelas leis, antes que se consiga compreender completamente os fenômenos biológicos.

A respeito dessa última questão, dois pontos de vista bem diversos têm sido discutidos, com frequência, na literatura da ciência biológica. Um deles refere-se à teoria da evolução de Darwin em sua relação com a genética moderna. De acordo com essa teoria, o único conceito a ser acrescentado aos da física e química, a fim de se entender o fenômeno da vida, é o conceito de *história.* Esse enorme intervalo de tempo, cerca - *grosso modo* - de quatro bilhões de anos, que se passou desde a formação deste planeta, possibilitou à Natureza tentar um número quase ilimitado de variedades de estruturas de grupos de moléculas. Entre essas estruturas, surgiram algumas que tinham como duplicar a si mesmas, fazendo uso de grupos menores presentes na matéria circunvizinha, estruturas que, portanto, poderiam ser criadas em grande número. Mudanças acidentais, nas estruturas existentes, viriam enriquecer o acervo. E estruturas distintas iriam competir na aquisição de material da matéria circundante e, dessa maneira, seguindo o esquema da *sobrevivência do mais apto,* teria ocorrido a evolução dos organismos vivos. Observemos que, indubitavelmente, essa teoria tem muito de verdadeiro e muitos biólogos acreditam que se terá, pela introdução dos conceitos de história e evolução, no conjunto consistente de conceitos físicos e químicos, uma base teórica amplamente suficiente para se explicar todos os fenômenos biológicos. Um dos argumentos freqüen- temente utilizado em defesa dessa teoria ressalta que em todas as circunstâncias em que as leis da física e química foram testadas em organismos vivos elas se saíram muito bem; definitivamente, não parece haver lugar algum em que uma "força vital", algo distinto das forças da física, possa comparecer.

Por outro lado, esse argumento perdeu muito de seu peso com a presença da teoria quântica. Desde que os conceitos de física e química passaram a formar um sistema fechado e coerente, vale dizer, aquele da teoria quântica, é necessário que toda vez que esses conceitos forem utilizados a fim de descrever certos fenômenos as leis com eles relacionadas sejam válidas também. Portanto, cada vez que se trate organismos vivos como sistemas físico-químicos, esses organismos devem agir como tal. A única pergunta que nos permite aprender algo sobre a adequação desse primeiro ponto de vista é se, verdadeiramente, os conceitos físico- químicos propiciam uma descrição *completa* desses organismos. Há biólogos que a respondem na negativa e que, em geral, favorecem um outro ponto de vista, que será exposto a seguir.

Esse segundo ponto de vista pode, talvez, ser enunciado nos seguintes termos: é deveras difícil se entender de que maneira conceitos como percepção, função de um órgão, afeto possam pertencer ao conjunto consistente de conceitos da teoria quântica, esses combinados com o conceito de história. Por outro lado, esses conceitos mencionados são,

como muitos outros, indispensáveis em uma descrição completa da vida, mesmo quando, por um momento, pomos de lado a humanidade pelo fato de apresentar novos problemas além da biologia. Portanto, para um entendimento da vida, será provavelmente necessário ir-se além da teoria quântica a fim de construir um novo conjunto coerente de conceitos, o qual teria a física e química como "casos limites"; a história seria parte essencial desse novo conjunto e conceitos como percepção, adaptação e afeição também lhe pertenceriam. Se esse ponto de vista for correto, a combinação do darwinismo com a física e química não seria suficiente para explicar a vida orgânica; mas ainda seria verdadeiro afirmar que os organismos vivos podem, em boa medida, ser considerados como sistemas físico-químicos (como "máquinas", no pensar de Descartes e Laplace) e, se fossem assim tratados, reagiriam como tal. Poder-se-ia, ao mesmo tempo, admitir - conforme sugestão feita por Bohr - que o nosso conhecimento, da vida de uma célula, seja complementar ao conhecimento completo de sua estrutura molecular. Considerando-se que um conhecimento completo dessa estrutura poderia, possivelmente, ser somente conseguido por cirurgias que conduziriam à destruição da vida celular, é logicamente possível que a vida não permita uma determinação completa de sua estrutura físico-química subjacente. Pois bem, mesmo quem espose o segundo ponto de vista, iria provavelmente recomendar que, na pesquisa biológica, nenhum outro método que não fosse aquele seguido nas décadas passadas deveria ser utilizado: tentar explicar, tanto quanto possível, com base nas leis físico-químicas conhecidas, e descrever o comportamento dos organismos vivos cuidadosamente e sem preconceitos teóricos.

Pode-se dizer que o primeiro dos pontos de vista é o mais aceito entre os biólogos modernos; mas a evidência experimental presentemente disponível não é suficiente para decidir a favor de uma das duas atitudes. A preferência demonstrada, por muitos biólogos, pela primeira delas talvez possa ser devida à "partição" cartesiana, que tão profundamente penetrou no espírito humano durante os séculos passados. Como a "coisa pensante" de Descartes fora confinada aos humanos, ao "Eu", os animais não receberam uma alma e, assim, foram relegados exclusivamente à "coisa extensa". Nessa maneira de pensar, o comportamento dos animais pode ser cientificamente entendido, esse é o argumento, nos mesmos termos da matéria em geral e as leis da física e química, reforçadas pelo conceito de história, seriam suficientes para explicar esse comportamento. E é somente quando a "coisa pensante" é chamada a intervir que surge uma nova situação a exigir conceitos inteiramente novos. Mas a "partição" cartesiana, repetimos, é uma simplificação exagerada e, como tal, perigosa, e portanto é bem possível que o segundo ponto de vista seja o correto.

Pondo-se de lado essa questão, pois de fato não há ainda como decidir entre as duas posições, nós obviamente continuamos muito longe de poder exibir um conjunto, consistente e fechado, de conceitos apto a explicar os

fenômenos biológicos. Em biologia, o grau de complexidade é tão desencorajador que, presentemente, não se pode imaginar qualquer conjunto de conceitos em que a inter-relação entre eles seja tão bem definida a ponto de permitir uma correspondente representação matemática.

Se, em nossa procura, formos além da biologia e incluirmos a psicologia na discussão, dificilmente então poder-se-á acreditar que os conceitos da física e química, e de evolução, possam juntos ser suficientes para explicar os fatos. Nesse ponto, a presença da teoria quântica veio mudar nossa atitude em relação ao que se acreditava no século passado. Durante aquele tempo, alguns cientistas inclinavam-se a supor que os fenômenos da mente humana poderiam, por fim, ser explicados pela aplicação da física e química ao funcionamento do cérebro. Observemos que, do ponto de vista da teoria quântica, não há justificação para tal expectativa. Não seria de se esperar, apesar do fato dos eventos físicos no cérebro estarem ligados aos fenômenos psíquicos, que esses eventos sejam suficientes para explicar esse tipo de fenômeno. Por outro lado, jamais duvidaríamos que o cérebro humano aja como um sistema físico-químico, se tratado cientificamente como tal; mas, para um entendimento dos fenômenos psíquicos, deveríamos partir do fato de que a mente humana tem, no processo científico da psicologia, o duplo papel de objeto e sujeito.

Se pensarmos a respeito dos diferentes conjuntos de conceitos que o passado nos legou ou mesmo naqueles que, porventura, tempos futuros virão nos revelar - frutos da tentativa de encontrarmos nosso caminho no mundo, através da ciência –, perceberemos que tais conjuntos parecem ser *ordenados* por uma participação crescente do elemento subjetivo no conjunto. A física clássica pode ser considerada como aquela idealização na qual podemos falar sobre o mundo como algo completamente separado de nós mesmos. Os primeiros três conjuntos, já mencionados neste capítulo, correspondem a tal idealização. E somente o primeiro se ajusta inteiramente ao conceito *a priori* da filosofia de Kant. Quanto ao quarto conjunto, aquele da teoria quântica, nele comparece o homem como o "sujeito" da ciência, trazido à cena pelas perguntas que terá que colocar sobre a Natureza, nos termos *a priori* da ciência humana. A teoria quântica não permite uma descrição inteiramente objetiva da Natureza. Em biologia, pode ser importante, para que se tenha um entendimento completo, que as perguntas sejam feitas pela espécie *homem*, que pertence, ela mesma, à categoria dos organismos vivos; isso quer dizer, em outras palavras, que já *sabemos* o que seja a vida, mesmo antes de defini-la cientificamente. Mas, talvez, não devamos fazer especulações sobre a possível estrutura de conjuntos de conceitos ainda inexistentes.

Se compararmos aquela ordem, mencionada no começo do parágrafo anterior, com as classificações mais antigas da aurora rutilante da ciência natural perceberemos que nós, agora, dividimos o mundo não em grupos

de diferentes objetos mas, sim, em grupos de diferentes conexões. Naqueles tempos remotos da ciência natural, eram considerados como grupos distintos, por exemplo, as plantas, animais e homens. Esses objetos eram agrupados diferentemente, pelo fato de terem naturezas diversas, por serem constituídos de matérias distintas e determinados em seu comportamento por forças diferentes. Ora, nós todos sabemos que se trata sempre da mesma matéria, os mesmos e variados compostos químicos a compor qualquer tipo de objeto que a Natureza exibe, seja ele mineral, vegetal ou animal, sendo basicamente as mesmas as forças que agem entre diferentes partes de matéria em qualquer tipo de objeto. Assim, a distinção a ser feita diz respeito ao tipo de conexão que seja, basicamente, a mais importante em um dado fenômeno. Por exemplo, quando falamos sobre a ação das forças químicas, queremos dizer um tipo de relação que supera em complexidade ou que é bem distinta da que é expressa na mecânica newtoniana. O mundo, assim, nos aparece como um complexo tecido de fenômenos, no qual conexões de tipos diversos alternam-se ou se sobrepõem ou combinam-se e, em consequência, determinam a tessitura do todo.

Ao representarmos um grupo de conexões por um sistema fechado e coerente de conceitos, axiomas, definições e leis que, por sua vez, será representado por um esquema matemático, nós, de fato, isolamos e idealizamos esse grupo de conexões com o propósito de elucidação. Mas, mesmo que tenhamos atingido, por esse meio, plena claridade, não saberemos quão precisamente o conjunto de conceitos descreverá a Realidade.

Tais idealizações podem ser consideradas como parte da linguagem humana, tendo nascido do relacionamento entre nós e o mundo, resposta humana ao desafio da Natureza. Nesse sentido, elas podem ser comparadas aos diferentes estilos que a arte exibe, digamos, na arquitetura ou na música. Um estilo de arte pode também ser definido por um conjunto formal de regras que são aplicadas ao objeto dessa particular arte. Tais regras não poderão, talvez, ser representadas, *stricto sensu*, por um conjunto de conceitos e de equações matemáticas, embora seus elementos fundamentais estejam bem de perto relacionados com entidades básicas da matemática. Igualdade e diversidade, repetição e simetria estarão provavelmente presentes e certas estruturas de grupo (no sentido matemático do termo) terão um papel fundamental tanto em arte quanto em matemática. Frequentemente, foi somente o trabalho de muitas gerações que possibilitou o surgimento de um sistema formal mais tarde chamado estilo de arte, desde o seu começo simples às formas mais elaboradas. Concentra-se o interesse do artista nesse sistema de regras a partir de um simples processo de cristalização onde o objeto da arte adquire, pela participação do artista, as formas variadas que se originaram dos primeiros conceitos formais desse estilo. Após sua ultimação, desvanece-se esse interesse pois a palavra

"interesse" significa estar com alguma coisa, participar de um processo de vida; mas esse processo já chegara a seu fim. Aqui, mais uma vez, a questão de em que medida as regras formais de um estilo representam a realidade da vida, que a arte pretende revelar, não pode ser decidida com base nas próprias regras. A arte é sempre uma idealização; o ideal diverge da realidade - pelo menos da realidade das sombras, como diria Platão - mas a idealização faz-se necessária à compreensão.

Essa comparação que fizemos entre os diferentes conjuntos de conceitos na ciência natural e estilos diversos em arte talvez possa parecer bem pouco verossímil àqueles que têm por certo que os diferentes estilos de arte são criações um tanto arbitrárias do espírito humano. Eles, provavelmente, argumentariam que, na ciência natural, esses diversos conjuntos de conceitos representam de fato a realidade objetiva e nos foram revelados pela Natureza e, assim, não são de forma alguma arbitrários, sendo consequência necessária do nosso gradual e crescente conhecimento experimental da Natureza. A esse respeito, a maior parte dos cientistas estarão de acordo; mas será mesmo que os diferentes estilos de arte sejam um produto arbitrário do pensamento humano? Aqui, mais uma vez, não devemos ser enganados pela "partição" cartesiana. Ora, o estilo surge, por assim dizer, do "conflito" entre "nós" e o mundo ou, mais especificamente, entre o espírito da época e o artista contemporâneo. O espírito de uma época é, provavelmente, um fato tão objetivo quanto qualquer fato na ciência natural e ele revela certos aspectos do mundo que independem do tempo e são, nesse sentido, eternos. O artista, assim, procura, por seu trabalho, tornar compreensíveis tais aspectos e, nessa tentativa, cria formas de estilo em sua arte.

Os dois processos, portanto, o da ciência e aquele da arte, não são muito diferentes um do outro. Tanto a ciência quanto a arte construíram, no correr dos séculos, uma linguagem que veio permitir que possamos falar sobre as partes mais recônditas da Realidade; e os conjuntos consistentes de conceitos da ciência, assim como os estilos de arte, são como palavras ou grupos de palavras diferentes nessa mesma linguagem.

Capítulo VII

A TEORIA DA RELATIVIDADE

No domínio da física moderna, a teoria da relatividade sempre desempenhou um papel assaz importante. Foi nessa teoria que se reconheceu, pela primeira vez, a necessidade de uma mudança nos princípios fundamentais da física. Assim, uma discussão daqueles problemas que foram levantados e parcialmente resolvidos pela teoria da relatividade está essencialmente vinculada ao tratamento dispensado às implicações filosóficas da física moderna. Pode-se, em certo sentido, dizer que - contrariamente ao que ocorreu com a teoria quântica - a teoria da relatividade teve um desenvolvimento muito rápido, do reconhecimento de suas dificuldades à solução final. A repetição da experiência de Michelson, por Morley e Miller em 1904, foi a primeira evidência definitiva da impossibilidade de se detectar o movimento de translação da Terra por métodos ópticos, o artigo decisivo de Einstein aparecendo menos de dois anos depois. Por outro lado, a experiência de Morley e Miller e o artigo de Einstein foram somente os estágios finais de um desenvolvimento que se iniciara já há algum tempo e que pode ser intitulado de "eletrodinâmica dos corpos em movimento".

Evidentemente, a eletrodinâmica dos corpos em movimento já fora um campo importante da física e engenharia, desde o tempo em que foram construídos os motores elétricos. Uma séria dificuldade, todavia, tornara- se manifesta, nesse assunto, pela descoberta feita por Maxwell da natureza eletromagnética das ondas luminosas. Diferiam essas ondas, de uma maneira essencial, das outras ondas, por exemplo, das ondas sonoras: as luminosas poderiam, pelo que parecia, propagar-se no vácuo. Quando uma sineta toca em um recipiente, onde se fez vácuo, som algum é ouvido no exterior. Mas a luz atravessa facilmente o volume esvaziado. Assim, admitiu-se que as ondas luminosas pudessem ser consideradas como ondas elásticas de uma substância bem leve e rarefeita, batizada de *éter*, que não poderia ser vista nem sentida, e que permearia o vazio, como também o espaço preenchido por matéria, ar e vidro, por exemplo. A ideia de que as ondas eletromagnéticas pudessem ter uma realidade própria, independente da presença de corpos de qualquer tipo, não ocorreu naquele tempo aos físicos. Visto que essa substância hipotética, o éter, seria capaz de penetrar

em qualquer tipo de matéria, levantou-se a seguinte pergunta: Que acontecerá se a matéria for posta em movimento? Participará o éter desse movimento e, se esse for o caso, como se propagará a luz no éter que se move?

Experiências que são relevantes, na busca de uma resposta a essa pergunta, são bem difíceis, pela razão seguinte: as velocidades de corpos materiais são, usualmente, muito pequenas em comparação com a velocidade da luz. Portanto, o movimento desses corpos só pode dar lugar a efeitos, muito pequenos, que são proporcionais ao quociente da velocidade do corpo pela velocidade da luz, ou a uma potência maior dessa razão. Várias experiências executadas por Wilson, Rowland, Roentgen e Eichen- wald e Fizeau vieram permitir a medida de tais efeitos com uma precisão que corresponde à primeira potência daquele quociente. A teoria dos elétrons, desenvolvida por Lorentz em 1895, mostrou-se capaz de explicar esses efeitos de maneira muito satisfatória. E eis que a experiência de Michelson, Morley e Miller veio criar nova e inesperada situação.

Discutiremos essa experiência detalhadamente. A fim de se conseguir efeitos maiores, o que viria permitir resultados mais precisos, a melhor alternativa foi fazer experiências com corpos em alta velocidade. A Terra se move ao redor do Sol com velocidade de cerca de 30 km/s. Se o éter estiver em repouso em relação ao Sol e não se mover com a Terra, então a aceleração do éter em relação ao nosso planeta seria sentida numa mudança da velocidade da luz. Essa velocidade seria diferente dependendo se a luz se propagasse paralela ou perpendicularmente à direção de movimento do éter. Mesmo que o éter se movesse parcialmente junto com a Terra, haveria algum efeito devido ao que podemos chamar de “vento de éter”, efeito que provavelmente dependeria da altitude, acima do nível do mar, em que a experiência fosse executada. Uma estimativa do efeito procurado mostrou que ele seria muito pequeno, por ser proporcional ao quadrado do quociente da velocidade da Terra pela velocidade da luz e, portanto, que deveriam ser feitas experiências de interferência de dois feixes de luz, um paralelo e outro perpendicular ao movimento da Terra. A primeira experiência, nessa linha, executada por Michelson em 1881, não foi suficientemente precisa. Mas mesmo repetições ulteriores não revelaram sinal algum do efeito esperado. Em particular, as experiências de Morley e Miller, em 1904, puderam ser consideradas como prova definitiva da não ocorrência de um efeito na magnitude prevista.

Esse último resultado, por estranho que fosse, levou a um outro ponto que já fora discutido pelos físicos. Na mecânica newtoniana, ocorre um certo “princípio da relatividade” (o “princípio da relatividade de Galileu”) que pode ser descrito nos seguintes termos: Se, em um dado sistema de referência, o movimento dos corpos satisfizer as leis newtonia- nas, então isso será igualmente válido em qualquer referencial que esteja em movimento uniforme, sem rotação, com respeito ao primeiro. Em outras

palavras, um sistema de referência, em movimento de translação uniforme, não produzirá efeito mecânico algum e, portanto, seu movimento não poderá ser detectado por efeitos desse tipo.

Um tal principio da relatividade - assim pensavam os físicos - não poderia valer em óptica ou eletrodinâmica. Se o primeiro sistema de referência estiver em repouso em relação ao éter, os demais sistemas, que estivessem em movimento de translação uniforme com respeito ao primeiro, estariam em movimento em relação ao éter, movimento esse que deveria transparecer pelos efeitos do tipo considerado por Michelson. O resultado negativo da experiência de Morley e Miller, em 1904, veio revivescer a ideia de que o princípio da relatividade da mecânica newtoniana pudesse também valer na eletrodinâmica.

Por outro lado, havia uma antiga experiência, feita por Fizeau, em 1851, que parecia contradizer definitivamente o principio da relatividade. Fizeau medira a velocidade da luz em um líquido em movimento. Fosse verdadeiro aquele princípio, a velocidade seria necessariamente a soma da velocidade do líquido e da velocidade da luz no líquido em repouso. Isso, todavia, não ocorreu. A experiência de Fizeau mostrou que a velocidade total da luz era um tanto menor.

Mesmo assim, os resultados negativos das experiências mais recentes para detectar o movimento *em relação ao éter* inspiraram físicos teóricos e matemáticos, daquele tempo, a procurar interpretações matemáticas que reconciliassem a equação de ondas da propagação da luz com o princípio da relatividade.

Em 1904, Lorentz sugeriu uma transformação matemática que satisfazia aqueles requisitos. Para esse fim, ele teve que introduzir a hipótese de que corpos em movimento se contraíam, na direção do movimento, por um fator numérico dependente da velocidade da luz, e admitir também que, em diferentes referenciais, haveria diferentes tempos “aparentes” que, de muitas maneiras, tomariam lugar do tempo “real”. Ele pôde, desse modo, apresentar algo semelhante ao princípio da relatividade de Galileu: a velocidade “aparente” da luz é a mesma nos diferentes sistemas de referência (cada um deles movendo-se, em relação ao outro, em movimento de translação uniforme). Ideias semelhantes já tinham sido discutidas por Poincaré, Fitzgerald e outros físicos.

O passo decisivo foi, todavia, tomado por Einstein em um trabalho seu, datado de 1905*, no qual ele estabelecia o tempo “aparente” de Lorentz como sendo o tempo “real” e abolia o que Lorentz chamara de tempo “real”. Isso foi uma mudança que tocou nos fundamentos mais profundos da física: mudança inesperada e assaz radical que requereu toda a coragem de um jovem e revolucionário gênio. Para dar esse passo, na representação matemática da Natureza, fazia-se necessária, tão-somente, a

* N.T. Vide Apêndice a respeito ao fim deste volume: “Da Teoria da Relatividade Restrita”.

aplicação consistente da transformação de Lorentz. Mas, por força dessa nova interpretação, mudara a estrutura de espaço e tempo e muitos problemas da física foram vistos sob nova luz. O "éter", por exemplo, pôde também ser abolido. Com efeito, visto que todos os sistemas de referência que se movem em translação uniforme, um em relação ao outro, são, no novo ponto de vista, equivalentes para descrever a Natureza, não há sentido em se afirmar a existência de uma substância, o "éter", que estaria em repouso somente com respeito a um desses sistemas. Uma tal substância é, de fato, desnecessária, sendo muito mais simples afirmar-se que as ondas eletromagnéticas se propagam através do vácuo e que, ademais, os campos eletromagnéticos têm uma realidade própria, podendo existir no "vazio".

Mas a mudança decisiva teve lugar na estrutura do espaço e tempo. É muito difícil descrever-se essa mudança nos termos da linguagem comum sem fazer uso da matemática, pois essas palavras tão comuns, "espaço" e "tempo", referem-se à estrutura do espaço e tempo, em nossa visão quotidiana, que é de fato uma idealização e supersimplifícação da estrutura real. Mesmo assim, tentaremos descrever essa nova estrutura e, talvez, possamos fazê-lo da seguinte maneira:

Quando fazemos uso do termo "passado", estamos incluindo todos aqueles eventos que poderíamos conhecer, pelo menos em princípio, sobre os quais, por assim dizer, poderíamos ter ouvido falar. Analogamente, consubstanciamos, na palavra "futuro", todos aqueles eventos que poderíamos, em princípio, influenciar ou, possivelmente, tentar modificar ou, mesmo, prevenir. Não é fácil, para quem não seja físico, perceber por que razão essa definição dos termos "passado" e "futuro" deveria ser a mais conveniente. Mas é fácil de ver que ela corresponde bem precisamente ao nosso uso comum desses termos. Se as utilizamos à maneira da definição acima, o resultado de muitas experiências indica que o conteúdo desses termos independe do estado de movimento, ou de qualquer outro atributo, do observador. Podemos, pois, dizer que a definição não varia em relação ao movimento do observador. Esse resultado é válido tanto na mecânica newtoniana, quanto na teoria da relatividade de Einstein.

Há, todavia, uma diferença. Na mecânica de Newton, supõe-se que futuro e passado estejam separados por um intervalo de tempo, infinitamente pequeno, que é considerado como sendo o "presente momento". Já na teoria da relatividade, aprende-se que a situação é outra: futuro e passado estão separados por um intervalo de tempo finito cuja extensão dependerá da distância espacial ao observador. Qualquer ação só poderá se propagar com uma velocidade menor ou igual à velocidade da luz. Assim sendo, um observador não poderá, em um dado instante de tempo, conhecer ou mesmo influenciar qualquer evento, espacialmente distante, que ocorra entre dois tempos característicos, definidos a seguir. O primeiro deles é o instante em que um sinal luminoso é emitido da posição do evento, a fim de alcançar o

observador no instante da observação. O outro é o instante em que um sinal luminoso, emitido pelo observador no instante da observação, chega ao local do evento considerado. Aqui, o intervalo temporal entre esses dois instantes pode ser considerado como pertencendo ao "presente", para o observador no instante da observação. Qualquer evento que ocorra entre os dois instantes característicos pode ser chamado de "simultâneo" com o ato de observação.

O uso da expressão "pode ser chamado" sugere uma ambiguidade no que diz respeito ao termo "simultâneo", o que se deve ao fato de que esse termo foi cunhado com base na experiência da vida quotidiana, onde a velocidade da luz pode sempre ser considerada como infinitamente grande. De fato, em física esse termo pode ser, também, definido de uma maneira ligeiramente diferente e Einstein, em seus trabalhos, fez uso dessa segunda definição. Quando dois eventos ocorrem simultaneamente, em um mesmo ponto espacial, dizemos então que eles coincidem; essa última palavra está completamente livre de qualquer ambiguidade. Imaginemos, agora, três pontos espacialmente distintos, situados em uma mesma reta, onde o ponto mediano seja equidistante dos dois outros. Se ocorrerem dois eventos, um em cada ponto extremo, em instantes de tempo tais que sinais luminosos, emitidos por ocasião da ocorrência desses eventos, coincidam ao alcançar o ponto mediano, poderemos então definir os dois eventos como *simultâneos.* Essa definição é, claramente, mais restrita que a primeira por nós considerada. Uma de suas consequências mais importantes é que quando dois eventos são simultâneos, do ponto de vista de um observador, eles poderão não o ser para um outro observador que esteja em um movimento de translação uniforme relativamente ao primeiro. A ligação entre as duas definições pode ser estabelecida ao se observar que toda vez que dois eventos são simultâneos, no primeiro significado desse termo, poderemos sempre encontrar um referencial em que eles serão igualmente simultâneos, na segunda acepção do termo.

A primeira definição do termo "simultâneo" corresponde mais de perto a seu uso na vida quotidiana, já que a questão de se saber se dois acontecimentos na vida ordinária são ou não simultâneos não depende da estrutura conceituai. Mas em ambas definições relativísticas, o termo adquiriu uma precisão que falta à linguagem de todos os dias. Na teoria quântica, tiveram os físicos que aprender, um tanto cedo, que os termos da física clássica descrevem a Natureza só imprecisamente e que seu uso sofre a limitação decorrente das leis quânticas, devendo portanto ser judiciosa-mente utilizados. Na teoria da relatividade, os físicos tentaram modificar o sentido atribuído aos termos da física clássica, a fim de tomá-los mais precisos e, isso, de maneira a melhor ajustá-los à nova situação experimental.

A estrutura, de espaço e tempo, revelada pela teoria da relatividade deu lugar a muitas implicações em diferentes setores da física. Assim, por exemplo, a eletrodinâmica dos corpos em movimento pôde ser deduzida, de

imediato, do princípio da relatividade. Esse princípio, pela sua ampla generalidade, tem o *status* de uma lei da Natureza que diz respeito não somente à eletrodinâmica dos corpos em movimento e à mecânica, mas a qualquer grupo de leis: as leis da física exibem a mesma forma em todos os sistemas de referência que difiram um do outro somente por um movimento de translação uniforme. Em outras palavras, elas são invariantes em sua forma, frente à transformação de Lorentz.

Possivelmente, a consequência mais importante do princípio da relatividade seja a inércia da energia ou, em outras palavras, a equivalência entre massa e energia. Pelo fato da velocidade da luz ser uma velocidade limite, que jamais pode ser alcançada por nenhum corpo material, é simples de se entender que é mais difícil se acelerar um corpo que já esteja se movendo com grande rapidez do que um corpo em repouso. Assim, a inércia aumenta com a energia cinética. Mas, de uma maneira bastante geral, qualquer tipo de energia, de acordo com a teoria da relatividade, contribuirá para a inércia, isto é, para a massa; e a massa que corresponde a uma dada quantidade de energia é exatamente essa energia dividida pelo quadrado da velocidade da luz. Assim, portanto, toda energia carrega consigo uma massa; mas mesmo uma energia elevada dará lugar somente a uma massa muito pequena: essa é a razão pela qual a relação entre massa e energia não tinha sido observada há mais tempo. As duas leis de conservação, da massa e da carga elétrica, perdem sua validade própria, em separado, e combinam- se para dar lugar a uma única lei que pode ser denominada de lei da conservação da energia ou massa. Há cinquenta anos, quando a teoria da relatividade foi formulada, a hipótese da equivalência entre massa e energia foi recebida como uma revolução profunda na física de então, havendo ademais escassa evidência experimental a seu respeito. Em nossos tempos, constata-se em um grande número de experiências que partículas elementares podem ser criadas a expensas da sua energia cinética, em processos de colisão e, igualmente, que tais partículas podem ser aniquiladas dando lugar a radiações eletromagnéticas; a transformação de energia em massa e vice-versa, portanto, nada tem de fantástico. O enorme desprendimento de energia em uma explosão nuclear é uma outra prova e assaz espetacular da correção da famosa fórmula de Einstein, entre energia e massa. Mas talvez possamos fazer aqui uma digressão de natureza histórica e crítica.

Já se disse algumas vezes que as enormes quantidades de energia, produzidas nas explosões nucleares, são devidas à transmutação direta da massa em energia e que é tão-somente com base na teoria da relatividade que se pode predizer a grandeza dessas energias. Isso é, todavia, um mal-entendido. A imensa quantidade de energia disponível, em um núcleo atômico, já fora conhecida desde as experiências de Becquerel, Mme. Curie e Rutherford, dos decaimentos radioativos. Qualquer núcleo ao decair, por exemplo, o rádio, produz uma quantidade de calor cerca de um milhão de vezes maior do que o calor desprendido em uma reação química envolvendo

a mesma quantidade de material. A fonte de energia, no processo de fissão do urânio, é exatamente a mesma do que a do decaimento alfa do rádio, sendo em sua maior parte devida à repulsão eletrostática entre as duas porções em que o núcleo atômico é fragmentado. Assim, a energia desprendida em uma explosão nuclear provém diretamente dessa fonte e não pode ser obtida da transmutação da massa em energia. O número de partículas elementares de massa de repouso não nula não diminui durante a explosão. Mas é um fato verdadeiro que as energias de ligação das partículas, em um núcleo atômico, estão presentes nas massas desses núcleos e, assim, o desprendimento de energia está, dessa maneira indireta, também relacionado com a mudança nas massas nucleares. A equivalência entre massa e energia, além de sua grande importância em física, levantou problemas que dizem respeito a questões filosóficas muito antigas. Muitos sistemas filosóficos do passado tiveram por tese que substância ou matéria não pode ser destruída. Na física moderna, todavia, um grande número de experiências mostraram que as partículas elementares, por exemplo, pósitrons e elétrons, podem ser aniquiladas ou, então, transmutadas em radiação. Significaria isso que esses antigos sistemas filosóficos teriam sido invalidados pelas experimentações modernas e que falsos seriam os argumentos neles aduzidos?

A nosso ver, isso seria certamente uma conclusão precipitada e igualmente injustificada, pois os termos “substância” e “matéria”, na filosofia antiga ou medieval, não podem simplesmente ser identificados com o termo “massa” da física moderna. Se quiséssemos expressar nossa experiência de hoje na linguagem das antigas filosofias, teríamos que considerar massa e energia como duas formas diversas da mesma “substância” e, assim, manter-se-ia a ideia da indestrutibilidade da “matéria”.

Por outro lado, dificilmente poderemos dizer que se ganhe muito ao se expressar o conhecimento moderno em uma linguagem antiga. Os sistemas filosóficos do passado foram construídos do acervo de conhecimentos existentes em sua época e das linhas de pensamento que esses conhecimentos propiciaram. Não se deveria, certamente, esperar que os filósofos de muitos séculos atrás pudessem ter previsto o desenvolvimento da física moderna ou da teoria da relatividade. Assim, os conceitos a que os filósofos foram conduzidos, no processo de clarificação intelectual, há muito tempo, não podem de forma alguma ser adaptados a fenômenos que só podem ser observados através de instrumentos elaborados de nosso tempo.

Mas antes de nos lançarmos à discussão das implicações filosóficas da teoria da relatividade, devemos descrever seu desenvolvimento ulterior.

O “éter”, aquela substância hipotética a que já nos referimos, que teve um papel tão importante nas discussões originais sobre as teorias de Maxwell, no século XIX, foi - como já dissemos - abolida pela teoria da relatividade. Esse fato é algumas vezes descrito como significando que se abandonou a ideia de espaço absoluto. Uma tal afirmação, todavia, deve

ser recebida com a maior cautela. Por um lado, é verdade que não se pode indicar uma estrutura conceituai especial em que o éter esteja em repouso e que faria jus à condição de "espaço absoluto". Seria falso, no entanto, dizer-se que o espaço perdeu então todas as suas propriedades físicas. As equações de movimento para corpos materiais e para campos de força não têm a mesma forma em um referencial "normal" e em outro que tenha um movimento de rotação, ou um movimento não uniforme, em relação àquele "normal". A existência de forças centrífugas, em um sistema dotado de um movimento de rotação, prova - no que diz respeito à teoria da relatividade de 1905 e 1906 - a existência de propriedades físicas do espaço que permitem estabelecer a distinção entre referenciais com e sem rotação.

Isso pode parecer pouco satisfatório de um ponto de vista filosófico, pois seria preferível se associar propriedades físicas somente a entidades físicas como corpos materiais e campos, e não ao espaço livre. Mas, pelo menos no que diz respeito à teoria dos processos eletromagnéticos e dos movimentos mecânicos, a existência de propriedades físicas do espaço vazio é simplesmente uma descrição de fatos irretorquíveis.

Uma análise cuidadosa dessa situação, feita em 1916, levou Eins- tein a uma extensão de grande importância da teoria da relatividade (a "restrita"), que tomou a denominação de *relatividade geral.* Antes de partirmos para uma descrição das ideias principais dessa teoria, poderá ser útil dizermos algumas palavras sobre o grau de certeza que poderemos ter sobre a validade dessas duas divisões da teoria da relatividade. A teoria de 1905 e 1906 baseia-se em um grande número de fatos experimentais bem estabelecidos: nas experiências de Michelson e Morley, e outras similares, na equivalência entre massa e energia em inúmeros processos radioativos, na dependência da vida-média de substâncias radioativas em sua velocidade e assim por diante. Essa teoria, portanto, pertence aos sólidos alicerces da física moderna e não pode ser posta atualmente em dúvida.

No que diz respeito à relatividade geral, a evidência experimental é muito menos convincente, pois os dados são assaz escassos. Há somente umas poucas observações astronômicas que confirmam a correção das hipóteses que lastreiam a teoria*. Pode-se, portanto, dizer que a relatividade geral é mais hipotética que a "restrita".

A pedra angular da teoria da relatividade geral é a relação entre *inércia* e *gravidade.* Experiências muito cuidadosas mostraram que a massa de um corpo, como fonte de gravidade, é exatamente proporcional à massa dita inercial que mede a inércia desse corpo. Mesmo as experiências mais precisas jamais mostraram qualquer desvio dessa lei. Se essa lei tiver,

*N.T. Vide Apêndice a respeito ao fim deste volume: "Da Confirmação Experimental da Teoria da Relatividade Geral".

de fato, validade geral, as forças gravitacionais poderão ser postas no mesmo nível das forças centrífugas ou das outras forças que ocorrem em reação à inércia. Como as forças centrífugas tiveram que ser consideradas como devidas às propriedades físicas do espaço vazio, conforme discutido antes, Einstein abraçou a hipótese de que também as forças gravitacionais fossem devidas às propriedades do espaço livre. Esse foi um passo realmente muito importante a exigir, de pronto, um segundo passo de igual importância. Se, portanto, a gravitação estiver ligada às propriedades do espaço, essas propriedades deverão ser causadas ou influenciadas pelas massas. As forças centrífugas, em um sistema em rotação, deverão ser produzidas pela rotação (relativa ao sistema) de massas possivelmente assaz distantes.

A fim de levar avante o programa esboçado nessas poucas sentenças, Einstein teve que relacionar as ideias físicas subjacentes com o esquema matemático da geometria mais geral construída por Riemann. Visto que as propriedades do espaço pareciam variar continuamente com as forças gravitacionais, a geometria desse espaço foi comparada à geometria das superfícies curvas, onde a curvatura varia continuamente, a linha reta da geometria euclidiana sendo substituída por uma curva dita *geodésica*, a linha de menor comprimento. Como resultado final, Einstein pôde exibir uma formulação matemática da relação entre a distribuição de massas e os parâmetros que especificam a nova geometria. Essa teoria descreve os fatos comuns sobre a gravitação. Se, por um lado, a relatividade geral dá lugar à teoria newtoniana da gravitação (no caso de campos gravitacionais fracos e de distribuição estática de massas), ela ademais prediz alguns efeitos bastante interessantes que estão bem no limite das possibilidades experimentais de medida. Assim, por exemplo, a ação exercida pela gravidade sobre a luz. Quando luz monocromática é emitida por uma estrela, os *quanta* de luz perdem energia ao serem defletidos pelo campo gravitacional da estrela, o resultado sendo um deslocamento das raias espectrais de emissão para o vermelho. Ainda não existe nenhuma evidência experimental segura acerca do deslocamento para o vermelho, como mostrou claramente a análise feita sobre as experiências de Freundlich a respeito. Por outro lado, seria também prematuro concluir-se que a predição de Einstein não será corroborada experimentalmente. Segundo essa predição, um feixe de luz ao passar perto do Sol é defletido pelo seu campo gravitacional. A deflexão encontrada experimentalmente por Freundlich tem a ordem de magnitude correta; mas ainda não se sabe se o valor experimental obtido concorda com a predição feita por Einstein. A maior evidência da validade da teoria da relatividade geral parece ser a precessão no movimento orbital do planeta Mercúrio, que aparentemente está de acordo com o valor predito pela teoria.

Embora a base experimental da relatividade geral ainda seja um tanto reduzida, a teoria traz consigo ideias da maior importância. Durante o extenso período que vai dos matemáticos da Grécia Antiga ao século XIX, a

geometria euclidiana foi considerada como a única possível; os axiomas de Euclides foram encarados como a base de qualquer estrutura geométrica, base que não admitia a menor sombra de dúvida. Mesmo assim, no século XIX, os matemáticos Bolyai e Lobachevsky, Gauss e Riemann perceberam que outras geometrias poderiam ser criadas no mesmo nível de precisão matemática da euclidiana; assim, entre as geometrias inventadas, saber-se qual delas seria a correta, na descrição da Natureza, tornou-se uma questão empírica. E foi somente pelo trabalho de Einstein que o problema pôde realmente ser retomado pelos físicos. A geometria adotada na relatividade geral não se restringiu somente ao espaço tridimensional, pois dizia respeito à estrutura quadridimensional espaço-temporal. A teoria estabeleceu uma relação entre essa geometria (dita riemanniana) e a distribuição de massas no Universo. Ela, portanto, levantou - de maneira inteiramente nova - velhos problemas acerca do comportamento do espaço e tempo nas dimensões astronômicas; e a teoria tinha respostas a sugerir que poderiam ser verificadas experimentalmente.

Em consequência, foram retomados velhos problemas filosóficos que tinham ocupado mentes humanas desde os primeiros tempos da filosofia e da ciência. O espaço é finito ou infinito? Que havia antes do começo do tempo? Que acontecerá após a terminação do tempo? Ou será que não houve começo e nem tampouco haverá fim? Essas perguntas, como é de se esperar, tiveram diferentes respostas nas diversas filosofias e religiões. Assim, por exemplo, na filosofia de Aristóteles, o espaço ocupado pelo Universo era admitido como sendo finito (embora fosse infinitamente divisível). Mais ainda, o espaço era devido à extensão dos corpos, dependendo ele da presença dos corpos, a ausência desses acarretando a inexistência do espaço. O Universo consistiria da Terra, Lua, Sol e estrelas do firmamento: um número finito de corpos. E, além da esfera estelar, não haveria mais espaço: portanto, o espaço ocupado pelo universo seria forçosamente finito.

Na filosofia de Emmanuel Kant, essa última asserção pertencia ao que ele chamava de “antinomias”, quer dizer, às questões que não podem ser respondidas, pois dois argumentos distintos conduzem a resultados opostos. Segundo Kant, o espaço não pode ser finito, por ser isso intelectualmente inconcebível; pois, em qualquer ponto do espaço a que chegássemos, haveria sempre uma continuação mais além. Por outro lado, o espaço não pode ser infinito, pois o espaço é algo que podemos imaginar (ou, então, a palavra “espaço” não teria sido cunhada) e não podemos imaginá-lo com extensão infinita. Nessa segunda tese, o argumento kantiano não foi reproduzido *verbatim*. A sentença “o espaço é infinito” tem para nós todos uma conotação negativa: não poderemos chegar a seu fim. Para Kant, porém, a frase significa que a infinitude do espaço *é* e ela “existe” em um sentido que dificilmente conseguiremos exibir. Ele conclui, então, que não se pode apresentar uma resposta racional à questão da finitude ou

infinitude do espaço, pois o Universo como um todo não pode ser o objeto de nossa experiência.

Situação semelhante ocorre com respeito ao problema da infinitude do tempo. Nas *Confissões* de S. Agostinho, por exemplo, a questão toma a seguinte forma: Que fazia Deus antes da criação do mundo? S. Agostinho não era de se satisfazer com a resposta jocosa: Deus estava ocupado em preparar o Inferno para aqueles que fazem perguntas tolas. Para ele, tratava-se de uma resposta tola e procurou fazer uma análise racional do problema. Somente para nós o tempo escoa; e assim esperamos o futuro; este acaba por tornar-se presente e dele nos lembraremos como passado. Mas Deus está fora do tempo: um milênio é para Ele como um dia; e um dia como se fosse mil anos. O tempo veio junto com o Universo e a ele pertence; assim, o tempo inexistiu antes da sua Criação. P ara Deus, o curso inteiro do Universo é apreendido de uma vez só. Não houve tempo antes da Criação. Observemos que, obviamente, o uso do verbo "criar", nessas afirmações, revela de imediato todas as dificuldades essenciais. Essa palavra, como é usualmente compreendida, significa que alguma coisa, que não era, veio a ser; e, nesse sentido, ela pressupõe o conceito de tempo. É, portanto, impossível definir-se racionalmente qual seria o sentido da frase "o tempo foi criado". Essa situação lembra-nos mais uma vez da lição, muitas vezes discutida, que se aprende na física moderna: toda palavra ou conceito, por mais claro que pareça, tem aplicação limitada.

Na teoria da relatividade geral, essas questões sobre a infinitude do espaço e tempo podem ser levantadas e parcialmente respondidas de maneira empírica. Se a teoria estiver correta na relação que propõe entre a geometria quadridimensional do espaço-tempo e a distribuição das massas no Universo, as observações astronômicas sobre a distribuição das galáxias poderão nos informar acerca da geometria do Universo como um todo. Poderemos, pelo menos, construir "modelos" do Universo, visões cos- mológicas cujas consequências serão confrontadas com os dados empíricos.

No presente estágio da astronomia, não podemos decidir definitiva- mente entre diferentes modelos possíveis. Pode ser que o espaço ocupado pelo Universo seja finito. Isso não significa que o Universo deva terminar em algum lugar mas, sim, que prosseguindo-se mais e mais, em uma direção qualquer, retornar-se-ia ao ponto de partida: um Universo fechado. Essa situação é semelhante à que ocorre na superfície da Terra onde, partindo-se de um ponto qualquer na direção leste, chegaremos por fim ao ponto inicial pelo oeste.

Com respeito ao tempo, ele parece ter tido seu começo. Muitos dados empíricos indicam que a origem do Universo tenha ocorrido há cerca de quatro bilhões de anos*; tais evidências parecem pelo menos sugerir que, naquele passado remoto, toda a matéria do Universo estaria con

* N.T. Presentemente, esse valor é estimado em cerca de 12 bilhões de anos.

centrada em um espaço muito menor que o atual e que o Universo, desde então, foi se expandindo com diferentes velocidades. Essa "data" passada e aproximada de quatro bilhões de anos é inferida de várias e diferentes observações (por exemplo, da idade de meteoritos, de minerais terrestres, etc.) e, assim, seria difícil encontrar-se uma interpretação essencialmente diversa dessa ideia de uma origem para o Universo. Se a ideia fosse correta, isso significaria que, após essa origem, o conceito de tempo passaria por mudanças essenciais. No estado presente das observações astronômicas, as perguntas que se colocam acerca da geometria do espaço-tempo, em grande escala, ainda não podem ser respondidas com um grau razoável de segurança. Mas é extremamente interessante imaginar-se que essas perguntas poderão eventualmente ser respondidas com base em dados experimentais seguros. Enquanto isso, podemos dizer que a teoria da relatividade geral repousa sobre uma base experimental bem estreita e, portanto, deve ser considerada como muito menos segura que a teoria da relatividade restrita, esta expressa pela transformação de Lorentz.

Apesar de termos limitado nossa discussão sobre a teoria da relatividade restrita, não há dúvida de que ela deu lugar a mudanças profundas sobre nossa maneira de pensar acerca da estrutura do espaço e tempo. O aspecto mais espantoso dessas mudanças talvez tenha sido não a sua natureza peculiar, mas sim o fato delas terem ocorrido. A estrutura do espaço e tempo que Newton ofereceu, como base à sua descrição matemática da Natureza, era simples e consistente, e correspondia muito de perto ao uso dos conceitos de espaço e tempo da vida quotidiana. Essa correspondência era de fato tão próxima que as definições newtonianas puderam ser consideradas como a formulação matematicamente precisa desses conceitos diários. Antes do advento da relatividade restrita, aceitava-se como evidente que eventos poderiam ser ordenados no tempo, independentemente de suas localizações espaciais. Ora, nós bem sabemos agora que essa maneira de pensar decorre de nossa vivência diária, pelo fato da velocidade da luz ser imensamente maior que qualquer outra que conheçamos na prática; claramente, essa origem não foi percebida na época. E mesmo sabendo sobre ela, não é coisa simples imaginar-se que a ordenação temporal de eventos dependa de suas localizações.

A filosofia de Kant, posteriormente, chamou atenção ao fato de que os conceitos de espaço e tempo dizem respeito à nossa relação com a Natureza e não à Natureza em si; e que não teríamos como descrevê-la sem fazer uso desses conceitos. Consequentemente, podemos dizer que esses conceitos são, em algum sentido, *a priori*, por serem condição para o entendimento de nossa experiência e não, primordialmente, um resultado dessa experiência; ademais, era crença geral que se tratava de conceitos da maior solidez, imunes à corrosão dos séculos e, portanto, a novas experimentações. Assim, pois, a necessidade de modificá-los veio como grande surpresa. E foi quando, pela primeira vez, os cientistas aprenderam

quão cautelosos deveriam ser ao aplicar conceitos da vida diária à elaboração refinada da ciência experimental moderna. Mesmo a formulação precisa e consistente desses conceitos, através da linguagem matemática da mecânica newtoniana, ou a cuidadosa análise kantiana, não se mostraram consistentes frente a uma análise crítica alicerçada em experiências extremamente precisas. Aquele aviso de cautela mostrou-se, mais tarde, extremamente útil no desenvolvimento da física moderna e teria sido ainda muito mais difícil entender-se a teoria quântica, não fosse o sucesso da primeira teoria da relatividade que ensinou aos físicos a se precaverem do uso indevido de conceitos da vida comum ou da física clássica.

Capítulo VIII

CRÍTICAS E CONTRAPROPOSTAS À INTERPRETAÇÃO DE COPENHAGUE DA TEORIA QUÂNTICA

A interpretação de Copenhague da teoria quântica levou os físicos a se afastarem bastante dos pontos de vista singelos do materialismo que prevaleceu, durante o século XIX, na ciência natural. Considerando-se que a maneira de ver materialista não somente estivera intrinsecamente ligada à ciência daquele período, como fora também analisada sistematicamente em alguns sistemas filosóficos, chegando mesmo a influenciar de perto o "homem da rua", não deverá causar espanto que muitas tentativas tenham sido feitas para criticar a interpretação de Copenhague, a fim de substituí-la por outra mais condizente com os conceitos da física clássica e da filosofia materialista.

Essas tentativas podem ser classificadas em três grupos distintos. O primeiro deles não procura modificar a interpretação de Copenhague no que diz respeito às predições dos resultados experimentais; seu objetivo é mudar sua linguagem a fim de aproximá-la da física clássica: em outras palavras, ele tenta mudar a filosofia sem tocar na física. Alguns artigos de autoria de participantes desse grupo restringem sua concordância, com respeito às previsões experimentais da interpretação de Copenhague, a todas aquelas experiências até então realizadas ou que pertençam à física atômica usual.

O segundo grupo compreende que a interpretação de Copenhague é a única adequada, pelo fato dos resultados experimentais corroborarem, em todas as instâncias, as predições daquela interpretação. Assim, os artigos originados nesse grupo procuram, em alguma medida, modificar a teoria quântica em certos pontos críticos.

Finalmente, o último desses grupos já expressa sua insatisfação generalizada com os resultados da interpretação de Copenhague e especialmente com suas conclusões filosóficas sem, todavia, fazer contrapropostas definidas. Artigos de Einstein, von Laue e Schrödinger pertencem a esse grupo que, historicamente, foi o primeiro dos três.

No entanto, todos os oponentes da interpretação de Copenhague estão de acordo sobre um ponto. Segundo eles, seria desejável retornar-se

ao conceito de realidade da física clássica ou, para fazermos uso de um termo filosófico mais geral, à *ontologia do materialismo.* Eles prefeririam voltar à ideia de um mundo real objetivo, em que mesmo as partes mais diminutas existissem objetivamente, no mesmo sentido que existem pedras e árvores - independentemente de se as observamos ou não.

Isso, todavia, é impossível ou, pelo menos, não é inteiramente possível, devido à natureza dos fenômenos atômicos, conforme foi discutido em alguns dos capítulos anteriores. Acreditamos que não faça parte de nossa tarefa formular nossos votos sobre como os fenômenos atômicos devem ser. Nada podemos fazer além de tentar entendê-los.

Ao se analisar os trabalhos do primeiro grupo, é importante compreender-se, antes de mais nada, que suas interpretações não podem ser refutadas experimentalmente, pois elas somente repetem a interpretação de Copenhague em linguagem diferente. De um ponto de vista estritamente positivista pode-se mesmo dizer que não estamos aqui lidando com contrapropostas à interpretação de Copenhague, mas sim com sua reprodução exata em linguagem diversa. Portanto, só podemos pôr em dúvida a conveniência dessa outra linguagem. Um grupo de contrapropostas faz uso de "variáveis ocultas". Posto que as leis quânticas, em geral, determinam os resultados de uma experiência somente de maneira estatística, haveria a tendência, do ponto de vista clássico, de se pensar que existiriam variáveis ocultas, a escapar da observação em uma experiência ordinária, mas que determinariam o resultado da experiência à maneira clássica causal. Assim, em alguns trabalhos, seus proponentes procuram construir tais variáveis dentro da estrutura da mecânica quântica.

Seguindo essa linha, Bohm, por exemplo, apresentou uma contraproposta à interpretação de Copenhague que, recentemente, foi em alguma medida também retomada por de Broglie. A interpretação proposta por Bohm* foi apresentada em detalhe e, assim, pode servir de base a nossas discussões. Bohm considera as partículas elementares como estruturas "objetivamente reais", tal como os pontos materiais na mecânica newtoniana. As ondas no espaço de configuração são, a seu ver, também "objetivamente reais", como os campos elétricos. O espaço de configuração é, em geral, um espaço de muitas dimensões, estas associadas às diferentes coordenadas espaciais de todas as partículas que compõem o sistema. Aqui encontramos a primeira dificuldade: que significa a afirmação de que as ondas no espaço de configuração são "reais"? Esse espaço é um espaço assaz abstrato. A palavra "real" remonta à palavra latina *res* que significa "coisa"; mas as coisas residem no espaço tridimensional ordinário e não em um espaço de configuração abstrato. As ondas, em um espaço de configuração, podem ser qualificadas de "objetivas" se com isso se quer dizer que

* N.T. Vide Apêndice a respeito ao fim deste volume: "Das Interpretações da Mecânica Quântica".

essas ondas são independentes de qualquer observador; mas dificilmente se poderá chamá-las de "reais", a menos que se queira mudar o sentido do termo. Bohm, a seguir, define as trajetórias possíveis das partículas como sendo as curvas perpendiculares às superfícies de fase constante. Qual dessas curvas seja a trajetória "real", isso, segundo ele, vai depender da história do sistema físico e também do aparelho de medida, e não se pode decidir a respeito sem se conhecer mais sobre o sistema e aparelho de medida do que efetivamente pode ser conhecido. Sua conclusão é de que a história, de fato, contém as "variáveis ocultas" e, consequentemente, a "trajetória real" e, isso, mesmo antes da experiência ter começado.

Uma consequência dessa interpretação é, como realçou Pauli, que os elétrons - no estado fundamental de diversos átomos - deveriam estar em repouso e, assim, sem executar qualquer movimento ao redor do núcleo. Isso parece estar em contradição com os resultados experimentais, pois medidas das velocidades dos elétrons no estado fundamental (usando-se, por exemplo, o efeito Compton) revelam sempre uma distribuição de velocidades nesse estado, distribuição que é dada - em conformidade com as regras da mecânica quântica - pelo quadrado da função de onda no espaço dos momentos lineares. Mas, nesse ponto, Bohm pode argumentar que as leis ordinárias não mais podem ser utilizadas para se avaliar o resultado da medida. Ele concorda que a avaliação usual da medida conduziria, de fato, a uma distribuição de velocidades; todavia, quando se leva em conta a teoria quântica para o aparelho de medida - especialmente pela introdução *ad hoc* de potenciais quânticos muito estranhos, de sua autoria - é então permissível dizer-se que os elétrons, no estado fundamental, estão "realmente" sempre em repouso. Nas medidas da posição de uma partícula, Bohm aceita a interpretação usual das experiências, rejeitando-a todavia nas medidas de velocidades. A esse preço, Bohm considera-se capaz de afirmar o seguinte: "Nós não precisamos abandonar, no domínio da teoria quântica, a descrição precisa, racional e objetiva de sistemas individuais". Ora, essa descrição objetiva, no entanto, revela-se como algo do tipo de uma "superestrutura ideológica" que pouco tem a ver com a realidade física imediata; isso, pois, as variáveis ocultas da interpretação de Bohm são de um tal tipo que, se a teoria quântica não for modificada, elas jamais poderão participar da descrição de processos reais.

A fim de escapar de tal dificuldade, Bohm de fato exprime a esperança de que, em experiências futuras, no domínio das partículas elementares, as variáveis ocultas possam ainda desempenhar seu papel de entidades físicas e, assim, provar a invalidez da teoria quântica. Quando ouvia mencionarem essas estranhas esperanças, Bohr costumava dizer que elas lhe pareciam ser estruturalmente semelhantes à seguinte sentença: "Ora, podemos nutrir a esperança de que, um dia, possa ocorrer que, às vezes, 2 X 2 = 5, pois isso seria assaz vantajoso para nossas finanças". Mas, de fato, a realização dessas expectativas viria destruir tanto a teoria

quântica como também a interpretação de Bohm. Certamente, é preciso ao mesmo tempo chamar-se atenção ao fato de que a analogia, há pouco mencionada, embora completa, não representa um argumento logicamente compulsório, a impossibilitar uma eventual alteração futura da teoria quântica, à maneira preconizada por Bohm. Com efeito, não seria fundamentalmente impossível imaginar-se, por exemplo, que uma futura extensão da lógica matemática possa atribuir um certo sentido à asserção de que, em casos excepcionais, se tenha 2 X 2 = 5; e poderia mesmo ser possível que essa extensão da matemática mostrasse sua utilidade no campo da economia. Mas, apesar disso, estamos de fato convencidos, mesmo sem razões lógicas imperiosas, de que tais mudanças em matemática não nos trariam qualquer melhora financeira. Assim, é muito difícil se entender de que maneira as propostas matemáticas que o trabalho de Bohm indica, como uma possível realização de suas esperanças, poderiam ser utilizadas na descrição de fenômenos físicos.

Se ignorarmos essa eventual alteração da teoria quântica, então, como já observamos a respeito, a linguagem de Bohm nada diz, sobre física, que difira dos enunciados da interpretação de Copenhague. Portanto, o problema que resta se refere à conveniência da linguagem por ele adotada. Além da objeção já feita que, ao falar das trajetórias de partículas, nos defrontamos com uma “superestrutura ideológica” supérflua, fazemos questão especial de mencionar aqui que a linguagem utilizada por Bohm destrói a simetria entre posição e velocidade, implícita na teoria quântica: nas medidas de posição, Bohm aceita a interpretação usual, rejeitando-a todavia nas que dizem respeito à velocidade ou momento linear. Visto que as propriedades de simetria englobam sempre o que há de mais essencial em uma teoria, é difícil se perceber o que se ganharia ao omiti-las da linguagem correspondente. Assim, portanto, não se pode considerar a contraproposta de Bohm, à interpretação de Copenhague, como uma melhora de fato.

Objeção semelhante pode ser levantada, de forma um tanto diferente, contra as interpretações estatísticas introduzidas por Bopp e, em uma linha ligeiramente diferente, por Fenyes. Bopp considera a criação ou aniquilação de uma partícula como o processo fundamental da teoria quântica, a partícula sendo algo “real” no sentido clássico da palavra, isto é, no sentido da ontologia materialista, e as leis da teoria quântica são consideradas como um caso especial da estatística de correlação para tais fenômenos de criação e aniquilação. Essa interpretação, que contém muitas observações interessantes sobre as leis matemáticas da teoria quântica, pode ser desenvolvida de maneira a levar, no que toca às consequências físicas, às mesmas conclusões da interpretação de Copenhague. Até então, ela é, no sentido positivista, isomorfa à de Copenhague, o que ocorre também com a de Bohm. Mas a linguagem utilizada na interpretação de Bopp destrói a simetria entre ondas e partículas o que, por seu lado, é um atributo característico da formulação matemática da teoria quântica. Desde 1928,

Jordan, Klein e Wigner mostraram que essa formulação matemática pode ser interpretada não somente como uma quantização do movimento das partículas mas, também, como uma quantização das ondas tridimensionais. Não há, portanto, razão alguma para se considerar essas ondas materiais como menos "reais" que as partículas. A simetria onda-partícula poderia ser assegurada, na formulação de Bopp, somente se a correspondente estatística de correlação fosse também desenvolvida para ondas materiais no espaço e tempo; e se, ademais, fosse deixada em aberto a questão de se partículas e ondas devam, ou não, ser consideradas como realidades "de fato".

A hipótese de que as partículas são reais, no sentido da ontologia materialista, sempre conduzirá à tentação de se considerar desvios na validade do princípio de indeterminação como "basicamente" possíveis. Fenyes, por exemplo, afirma que "a existência do princípio de indeterminação (que ele associa a certas relações estatísticas) de forma alguma torna impossível a medida simultânea, com precisão arbitrária, da posição e velocidade". Fenyes, todavia, não revela a maneira pela qual tais medidas poderiam ser conduzidas na prática e, portanto, suas considerações parecem restringir-se ao domínio da matemática abstrata.

Por outro lado, Weizel – cujas contrapropostas à interpretação de Copenhague são aparentadas às de Bohm e de Fenyes - relaciona as "variáveis ocultas" a um novo tipo de partícula, introduzida *ad hoc,* o "zeron", que aliás não é observável. No entanto, um tal conceito corre o perigo de fazer com que a interação entre partículas reais e zerons dissipe a energia entre os muitos graus de liberdade do campo de zeron, a consequência sendo que a termodinâmica tornar-se-ia um caos. Weizel não esclareceu como ele espera evitar tal perigo.

O ponto de vista esposado, em todo o grupo de trabalhos até o momento mencionados, pode talvez ser melhor definido se relembrarmos uma discussão semelhante que ocorreu na teoria da relatividade restrita. Aqueles que estavam insatisfeitos com a negativa de Einstein de aceitar o "éter" e, também, espaço e tempo absolutos, poderiam então argumentar assim: a inexistência do espaço absoluto e do tempo absoluto não é, de forma alguma, provada pela teoria da relatividade restrita; mostrou-se tão- somente que o espaço e tempo verdadeiros não aparecem diretamente em qualquer experiência ordinária; todavia, se esse aspecto das leis da Natureza tiver sido levado em conta corretamente e se, em consequência, os tempos "aparentes" corretos foram introduzidos para sistemas de coordenadas em movimento, não haveria argumento algum contra a hipótese de um espaço absoluto; e seria mesmo plausível admitir-se que o centro de gravidade de nossa galáxia esteja (pelo menos aproximadamente) em repouso no espaço absoluto. Os críticos da teoria da relatividade restrita poderiam, também, dizer que seria de se esperar que medidas futuras viessem permitir a definição de espaço absoluto, sem ambiguidade (isto é,

da "variável oculta" da teoria da relatividade restrita) e essa teoria estaria, assim, refutada.

Vê-se, de imediato, que esse argumento não pode ser refutado experimentalmente, pois ele, até então, nada afirmou que difira das assertivas relativistas. Uma tal interpretação, todavia, viria destruir - pela linguagem utilizada - a propriedade decisiva de simetria exibida pela teoria da relatividade restrita, a saber, a invariância e, por esse motivo, mostra-se inadequada.

A analogia com a teoria quântica é evidente. As leis quânticas são tais que as "variáveis ocultas", inventadas *ad hoc*, jamais poderão ser observadas. Caso introduzamos essas variáveis, como entidades fictícias, na interpretação da teoria, teremos destruído aquelas propriedades de simetria decisivas.

O trabalho de Blochinzev e Alexandrov difere inteiramente, em seu enunciado do problema, daqueles que discutimos até agora. Esses autores, declaradamente e desde o começo, restringem suas objeções à interpretação de Copenhague ao lado filosófico de sua formulação. A física é, por eles, aceita sem reservas.

Mesmo assim, a exteriorização da polêmica não deixa de ser mais áspera: "Entre as diferentes tendências idealistas, na física contemporânea, a mais reacionária é a assim chamada escola de Copenhague. O presente artigo tem por propósito desmascarar as especulações idealistas e agnósticas dessa escola, no que diz respeito aos problemas básicos da física quântica", assim escreve Blochinzev em sua introdução. A aspereza da polêmica revela que não temos aqui a ver somente com a ciência mas, também, com uma profissão de fé, a uma adesão a um certo credo. Seu objetivo é expresso, na parte final, através de uma citação de Lenin: "Por mais maravilhosa que seja, do ponto de vista do intelecto humano comum, a transformação de um "éter" imponderável em matéria pesante; por mais estranho que pareça que os elétrons só têm massa de origem eletromagnética; por mais inusitada que seja a restrição das leis mecânicas de movimento a tão-somente um único domínio de fenômenos naturais e sua subordinação às leis mais profundas dos fenômenos eletromagnéticos, e assim por diante - tudo isso não passa de mais uma confirmação do materialismo dialético". Essa última afirmação parece tornar menos interessante a discussão de Blochinzev sobre a relação entre a teoria quântica e a filosofia do materialismo dialético, na medida em que aquela asserção parece rebaixar a discussão ao nível de um julgamento encenado, onde a sentença já é conhecida de antemão. Mesmo assim, é importante conseguir-se uma clarificação completa sobre os argumentos apresentados por Blochinzev e Alexandrov.

Sendo o objetivo desses autores salvar a ontologia materialista, o ataque dirige-se principalmente contra a introdução do observador na interpretação da teoria quântica. Assim, escreve Alexandrov: "Na teoria

quântica temos, portanto, que entender por resultado de uma medida somente o efeito objetivo da interação do elétron com um objeto apropriado. A menção ao observador deve ser evitada e devemos tratar de condições objetivas e de efeitos objetivos. Uma grandeza física é uma característica objetiva do fenômeno, mas não o resultado de uma observação experimental". Assim, de acordo com Alexandrov, a função de onda no espaço de configuração caracteriza o estado objetivo do elétron.

Em sua apresentação, Alexandrov parece não ter se apercebido do fato de que o formalismo da teoria quântica não permite o mesmo grau de objetivação que no caso da física clássica. Assim, por exemplo, se a interação de um sistema com o aparelho de medida for tratada, de acordo com a mecânica quântica, como um todo, e se ambos forem considerados como separados do resto do mundo, então o formalismo da teoria quântica não levará, via de regra, a um resultado definido; ele não conduzirá, por exemplo, ao enegrecimento de uma placa fotográfica em um dado ponto. Se, então, procurarmos salvar o "efeito objetivo" de Alexandrov declarando que, "na realidade", a placa foi enegrecida em um dado ponto, após a interação, pode-se replicar que o tratamento quântico do sistema fechado - consistindo do elétron, aparelho de medida e a placa sensível - não mais está sendo aplicado. Esse caráter "de ser fato" de um fenômeno (este passível de uma descrição em termos de conceitos da vida diária) não aparece, por si só, no formalismo da teoria quântica, surgindo na interpretação de Copenhague pela introdução do observador. É claro que o aparecimento do observador não deve ser interpretado como implicando que atributos subjetivos de algum tipo venham comparecer na descrição da Natureza. O observador restringe sua função ao registro de decisões, isto é, a processos no espaço e tempo, e não importa se o observador seja uma máquina ou um ser humano; mas esse registro, isto é, a transição do "possível" ao "real", é aqui absolutamente necessário e não pode ser omitido da interpretação da teoria quântica. Nesse ponto, a teoria quântica está intrinsecamente ligada à termodinâmica, isso no sentido de que cada ato de observação é, por sua própria natureza, um *processo irreversível*, é somente através de tais processos irreversíveis que o formalismo da teoria quântica pode ser associado de maneira consistente com eventos reais no espaço e tempo. E essa irreversibilidade é, mais uma vez - quando projetada na representação matemática dos fenômenos - uma consequência do conhecimento incompleto do sistema por parte do observador e, dentro dessa limitação, não é completamente objetiva.

Blochinzev formula a situação de maneira ligeiramente diferente da de Alexandrov: "Na mecânica quântica descrevemos não um estado da partícula em si, mas sim o fato de que a partícula pertence a esse ou aquele *ensemble* estatístico. Essa pertinência é completamente objetiva e independe das afirmações feitas pelo observador". Tais formulações, todavia, levam-nos muito longe - provavelmente longe demais - da ontologia

materialista. A fim de esclarecer esse ponto, é útil relembrar como o pertencer a um *ensemble* estatístico é usado na interpretação da termodinâmica clássica. Se um observador determinou a temperatura de um sistema e pretende tirar, de seus resultados, conclusões sobre os movimentos moleculares no sistema, ele está capacitado a dizer que o sistema nada mais é que uma amostra extraída de um *ensemble* canônico e, assim, ele poderá considerá-lo como podendo ter diferentes energias. "Na realidade" - assim concluiríamos em física clássica - o sistema tem somente uma energia, em um dado instante de tempo, nenhuma das outras sendo fisicamente realizáveis. O observador enganou-se se quis considerar, como possível, uma outra energia naquele instante. O *ensemble* canônico contém informações, não somente sobre o próprio sistema como também sobre o conhecimento incompleto que o observador tem sobre ele. Se, na teoria quântica, Blochinzev procura tratar como completamente "objetiva", a pertinência de um sistema a um *ensemble*, ele fez uso da palavra "objetiva" em um sentido diverso daquele utilizado na física clássica. Isso porque, em física clássica, esse pertencer significa, como já foi dito, asserções não somente sobre o próprio sistema como também acerca do grau de conhecimento que o observador tem sobre o sistema. Há uma exceção a fazer, em teoria quântica, sobre essa assertiva. Se, em teoria quântica, o *ensemble* for caracterizado por uma única função de onda, no espaço de configuração (e não, como é usual, pela matriz densidade), estamos em uma situação especial (o assim chamado "caso puro") em que a descrição pode ser caracterizada, em um certo sentido, de objetiva e na qual o elemento de conhecimento incompleto não ocorre imediatamente. Mas visto que cada medida reintroduz (devido a suas características irreversíveis) o elemento de conhecimento incompleto, a situação não seria fundamentalmente diversa.

Acima de tudo, essas formulações nos mostram quão difícil é a tentativa de se inserir novas ideias em um velho sistema de conceitos associado a uma filosofia já passada - ou, fazendo-se uso de uma metáfora antiga, quando se procura encher velhas garrafas com vinho novo. Tais tentativas são sempre descorçoantes, pelo fato de nos levarem erroneamente a nos ocupar, o tempo todo, com as rachaduras inevitáveis das velhas garrafas ao invés de provarmos o vinho novo. Claramente, não podemos esperar que os pensadores, que há um século apresentaram os fundamentos do materialismo dialético, pudessem prever o desenvolvimento da teoria quântica. Seria realmente inacreditável que seus conceitos de matéria e realidade pudessem se adaptar aos resultados da técnica experimental refinada de nossos dias.

Talvez devamos acrescentar, nesse ponto, algumas observações de caráter geral sobre a atitude do cientista frente a um credo, seja esse de natureza religiosa ou política. A diferença fundamental, entre os credos religioso e político - a saber, que o último se refere à realidade material

imediata do mundo que nos cerca, enquanto o primeiro tem por objeto uma outra realidade, além do mundo material - não é de maior importância para a questão que nos preocupa: a aceitação de um credo. Do que dissemos, poder-se-ia inferir que o cientista nunca deveria confiar em doutrinas especiais, jamais confinando sua maneira de pensar a uma filosofia afastada do seu trabalho científico. Ele deveria estar sempre pronto a revisar os fundamentos de seu conhecimento, frente a uma nova experiência. Essas exigências, todavia, revelar-se-iam uma simplificação simplória da condição de vida de todos nós, por duas razões. A primeira delas é que a estrutura do pensamento humano é determinada, da infância à juventude, por ideias e sentimentos que tivemos ou recebemos naqueles tempos e, também, pela presença de personalidades fortes que nos influenciaram. Essa estrutura mental, assim desenvolvida, tornar-se-á parte integrante de toda nossa atividade futura e poderá, em consequência, trazer-nos dificuldades em nos adaptarmos a maneiras inteiramente novas de pensar. A segunda razão é que pertencemos a uma comunidade, a uma sociedade. Essa comunidade encontra sua coesão na comunhão de ideias, em uma mesma escala de valores éticos e por uma linguagem coincidente no que diz respeito aos muitos e diversos problemas da vida. A coincidência das ideias poderá ser apoiada pela autoridade de uma igreja, de um partido ou pelo governo e, mesmo que isso não aconteça, poderá permanecer a dificuldade do afastamento do consenso sem isso dar lugar a conflitos com a comunidade. Mesmo que o meio comunitário não seja repressivo, o pensamento científico poderá conflitar com as ideias prevalentes. Assim sendo, seria descabido exigir-se que o cientista, por força de ofício, fosse desleal à sua comunidade, que fosse ele privado da segurança de a ela pertencer; por outro lado, seria igualmente tolo esperar-se que as ideias vigentes, que do ponto de vista científico são sempre simplificações, devessem mudar imediatamente com o progresso do conhecimento cientifico.

Assim, nesse ponto, parece que se revive (mesmo em nossos tempos) o velho problema da “verdade dupla” que caracterizou a história do Cristianismo em fins da Idade Média. Havia, nessa época, uma doutrina bastante discutível segundo a qual a “religião positiva” - qualquer que fosse a forma que ela pudesse tomar - viria ao encontro de uma necessidade indispensável na vida do povo, enquanto o homem de ciência, por outro lado, procuraria a verdade real às costas da religião, por assim dizer, e somente assim. Em outras palavras, “a ciência é esotérica”: ela está restrita a uns poucos iniciados. Apesar de, em nossos tempos, as doutrinas políticas e atividades sociais assumirem, em alguns países, o papel da “religião positiva”, o problema permanece ainda essencialmente o mesmo. A primeira exigência do cientista será sempre a manutenção de sua integridade intelectual, enquanto por seu lado a comunidade pretenderá frequentemente que ele - devido à invariabilidade da ciência - pelo menos espere

umas poucas décadas antes de tomar públicas suas posições dissidentes. Não há, provavelmente, nenhuma solução simples para essa situação, se a tolerância por si só não bastar. Podemos, todavia, consolar-nos de que, afinal, se trata de um velho problema, inerente à condição humana.

Retornando, agora, às contrapropostas à interpretação de Copenhague, discutiremos o segundo grupo de propostas aventadas, que procuraram modificar a teoria quântica de maneira a chegar a uma interpretação filosófica diversa. A tentativa mais cuidadosa, nessa direção, foi feita por Janossy, que compreendeu que a validade rigorosa da mecânica quântica compele-nos ao afastamento do conceito de realidade da física clássica. Ele procura, portanto, modificar a mecânica quântica de tal maneira que, embora muitos de seus resultados sejam mantidos, sua estrutura fique mais próxima da física clássica. Seu ponto de ataque diz respeito ao que se chama de "redução dos pacotes de ondas", isto é, ao fato de que a função de onda (ou, mais geralmente, a função de probabilidade) varia descontinua- mente quando o observador toma conhecimento do resultado de uma experiência. Observa Janossy que essa "redução" não pode ser deduzida das equações diferenciais, presentes no formalismo matemático da teoria, e ele acredita que possa daí concluir a existência de uma contradição na interpretação usual. É bem sabido que a "redução dos pacotes de ondas" sempre comparece, na interpretação de Copenhague, quando se completa a transição do possível ao real. A função de probabilidade, que cobria uma vasta gama de possibilidades, é abruptamente reduzida a uma outra bem mais estreita, pelo fato da experiência ter chegado a um resultado definido, vale dizer, que um certo evento efetivamente ocorreu. No formalismo, essa "redução" requer que a usualmente chamada "interferência de probabilidades", o fenômeno mais característico da teoria quântica, seja destruída pelas interações - parcialmente indefiníveis, e irreversíveis - entre o aparelho de medida e o resto do mundo. Janossy tenta, então, modificar a mecânica quântica pela introdução, nas equações matemáticas, de termos ditos de "amortecimento", isso sendo feito de tal maneira que os termos de interferência desapareçam após um tempo finito. Mesmo que isso corresponda à realidade -e não há razão para se supor, com base nas experiências realizadas, que assim seja - ainda restariam algumas consequências alarmantes de uma tal interpretação, que o próprio Janossy levanta (por exemplo, ondas que se propagam com velocidade maior que a da luz; a reversão, na ordenação do tempo, de causa e efeito, etc.). Assim, portanto, dificilmente estaríamos propensos a sacrificar a simplicidade da teoria quântica por esse tipo de ponto de vista, a menos que a isso fôssemos compelidos por evidências experimentais seguras.

Entre os outros oponentes do que, às vezes, se chama de interpretação "ortodoxa" da teoria quântica, Schrödinger adota uma posição especial pelo fato de atribuir a condição de "realidade objetiva" não às partículas mas às ondas, não aceitando ele interpretar as ondas como "ondas de

probabilidade somente". Em seu trabalho intitulado "Existem Saltos Quânticos?", ele procura negar por completo a existência de saltos quânticos (alias, pode-se questionar a adequação do termo "salto quântico", nesse contexto, e substituí-lo por uma palavra menos provocadora, por exemplo, "descontinuidade"). Ora, esse trabalho de Schrödinger contém, primeiramente, alguns enganos sobre a interpretação usual. Ele passa por cima do fato de que somente as ondas no espaço de configuração (ou "matrizes de transformação") são ondas de probabilidades na interpretação usual, o mesmo não ocorrendo com as ondas materiais tridimensionais e as de radiação. Essas últimas possuem tanta "realidade" quanto as partículas; essas ondas não têm nenhuma relação direta com as ondas de probabilidade, a elas estando associadas densidades contínuas de energia e momento linear, tal como ocorre no campo eletromagnético na teoria de Maxwell. Schrödinger, portanto, realça corretamente que, a esse respeito, os processos podem ser concebidos como sendo mais contínuos do que usualmente o são. Essa interpretação, todavia, não remove por si só o elemento de descontinuidade sempre presente nos fenômenos atômicos; qualquer tela de cintilação ou contador Geiger exibe imediatamente esse elemento. Na interpretação usual da teoria quântica, ele comparece na transição do possível ao real. Schrödinger, no entanto, não apresenta nenhuma contraproposta de como pretenda introduzir o elemento de descontinuidade - sempre observado nos fenômenos da física atômica – de uma maneira diversa daquela da interpretação usual.

Finalmente, as críticas expressas por Einstein, von Laue e outros, em diversos artigos, concentram-se na questão de se a interpretação de Copenhague permite, ou não, uma descrição única e objetiva dos fenômenos físicos. Seus argumentos básicos podem ser assim descritos: o esquema matemático da teoria quântica parece propiciar uma descrição perfeitamente adequada no que diz respeito aos atributos estatísticos dos fenômenos atômicos. Mas, mesmo que as afirmações dessa teoria acerca da probabilidade de ocorrência de fenômenos atômicos sejam de fato corretas, a interpretação usual não permite a descrição do que realmente acontece independentemente das observações, ou entre duas delas. Mas alguma coisa deve ter acontecido, sobre isso não há dúvida; essa "alguma coisa" não precisa ser descrita, seja em termos de elétrons, ondas ou *quanta* de luz mas, a menos que ela seja descrita de um alguma maneira, a tarefa da física não está terminada. Não se pode admitir que essa "alguma coisa" diga respeito somente ao ato de observação. O físico deve postular, em sua ciência, que ele está estudando um mundo que não construiu, o qual estará sempre presente e basicamente inalterado, mesmo em sua ausência. A interpretação de Copenhague, portanto, não oferece um entendimento real dos fenômenos atômicos. Eis, em suma, os pontos de vista esposados por Einstein, Laue e outros.

Ora, vê-se facilmente que aquilo que essa critica exige é, mais uma vez, a velha ontologia materialista. Mas qual poderá ser a resposta, do ponto de vista da interpretação de Copenhague?

Bem, podemos dizer que a física é uma parte da ciência e, como tal, visa a descrição e entendimento da Natureza. Qualquer tipo de entendimento, científico ou não, depende de nossa linguagem, da comunicação de ideias. E toda descrição de fenômenos, experiências e de seus resultados depende da linguagem de que se faça uso, o único meio possível de comunicação. Os termos utilizados nessa linguagem representam conceitos da vida quotidiana que, através da evolução da terminologia da física, puderam ser refinados e, assim, dar lugar aos conceitos da física clássica. Esses últimos são as únicas ferramentas de que dispomos para nos expressar, sem ambiguidade, sobre eventos, experimentações e seus resultados. Se, portanto, o físico for solicitado a apresentar uma descrição do que realmente acontece em suas experiências, as palavras "descrição", "realmente" e "acontece" podem somente se referir a suas acepções da vida diária ou, então, da física clássica. Tão logo o físico abandonasse essa última base conceituai, ver-se-ia impossibilitado de se exprimir sem ambiguidades e não teria como prosseguir em seu trabalho científico. Portanto, toda afirmação sobre o que "realmente ocorreu" é uma assertiva feita com base nos conceitos da física clássica e, assim - devido à termodinâmica estatística e às relações de incerteza - é algo, por sua própria natureza, incompleto no que se refere aos detalhes dos fenômenos atômicos pesquisados. Exigir-se que se "descreva o que ocorre" em um processo quântico, entre duas observações sucessivas, é uma contradição *in adjecto** pois a palavra "descrever" diz respeito ao uso de conceitos clássicos, enquanto, por outro lado, esses conceitos perdem sua validade no intervalo entre as observações; eles só se aplicam no momento da observação.

Dever-se-ia notar, nesse ponto, que a interpretação de Copenhague não é, de forma alguma, positivista. Isso, pois, enquanto o positivismo toma as percepções sensoriais do observador como elementos básicos da realidade, a interpretação de Copenhague considera as coisas e processos (passíveis de uma descrição clássica), isto é, o real, como o fundamento de toda interpretação física.

Vemos, ao mesmo tempo, que a natureza estatística das leis da física microscópica não pode ser evitada, pois todo conhecimento do "real" é – devido às leis quânticas – um conhecimento incompleto por si mesmo.

A ontologia do materialismo repousava na ilusão de que o sentido da existência, a "realidade" direta, do Universo que nos cerca, pudesse ser extrapolado para o domínio atômico. Essa extrapolação mostrou-se, todavia, impossível.

* N.T. Isto é, uma contradição em termos.

Podemos inserir, aqui, algumas observações a respeito da estrutura formal de todas as contrapropostas à interpretação de Copenhague apresentadas até agora. Em todas elas, sentiram-se seus autores compelidos a sacrificar as propriedades essenciais de simetria que a teoria quântica exibe (por exemplo, a simetria entre ondas e partículas, ou entre posição e velocidade). Assim, poderemos bem supor que a interpretação de Copenhague não pode ser posta de lado se essas propriedades de simetria - a exemplo da invariância de Lorentz na teoria da relatividade - forem uma característica genuína da Natureza; e todas as experiências realizadas até agora corroboram esse ponto de vista.

Capítulo IX

A TEORIA QUÂNTICA E A ESTRUTURA DA MATÉRIA

O conceito de matéria passou por muitas metamorfoses ao longo da história do pensamento humano. Os diversos sistemas filosóficos lhe legaram significados distintos e todas essas diferentes acepções, em maior ou menor grau, subsistem em nossa concepção atual da palavra "matéria"*.

A antiga filosofia grega, de Tales de Mileto aos Atomistas, ao procurar descobrir um princípio de unificação dentro da mutabilidade universal de todas as coisas, criou o conceito de matéria cósmica, vale dizer, a substância universal que passaria por todas essas transformações, da qual todas as coisas emergiriam para depois a ela retornar. Essa matéria primordial era, em parte, identificada com algum tipo específico de matéria, como, por exemplo, água, ar ou fogo; mas isso só parcialmente, pois a matéria primeira não ostentaria atributo algum, exceto ser o material do qual todas as coisas seriam feitas.

Mais tarde, na filosofia de Aristóteles, a matéria foi imaginada na relação entre forma e matéria. Tudo o que percebemos no mundo dos fenômenos, à nossa volta, é matéria que encontrou sua forma. A matéria não é uma realidade por si mesma mas só uma possibilidade, uma *potentia;* somente a forma lhe dará existência. Em um processo natural, a "essência" (para usar a expressão aristotélica) passa de mera possibilidade à realidade, pela presença da forma. A matéria aristotélica certamente não é uma matéria específica, como água ou ar, nem tampouco o vazio; ela é um tipo de substrato corpóreo indefinido, que tem em si a possibilidade de vir-a- ser ao se consubstanciar na forma. Exemplos típicos dessa relação entre matéria e forma, na filosofia de Aristóteles, são os processos biológicos, nos quais a matéria toma forma a fim de tornar-se um organismo vivo, e a atividade criadora e formadora do homem. A estátua existe potencialmente no mármore disforme antes do artista libertá-la.

Então, muito tempo depois, a partir da filosofia de Descartes, a matéria foi, em primeiro lugar, encarada como sendo o oposto do espírito:

* N.T. Matéria: do latim *matéria, materies*; originalmente significando "madeira de construção" e, depois, "matéria".

pensava-se em termos desses dois aspectos complementares do mundo, "matéria" e "espírito" ou, como colocava Descartes, a *res extensa* e a *res cogitans.* Desde que os novos princípios metodológicos da ciência natural, sobretudo na mecânica, excluíram toda possibilidade de que os fenômenos concretos fossem devidos a forças espirituais, a matéria pôde ser considerada como tendo uma realidade própria, independente do espírito e de qualquer força sobrenatural. Naqueles tempos, a "matéria" era entendida como "matéria formada", o processo de formação sendo interpretado como proveniente de uma cadeia causal de interações mecânicas; o conceito de matéria perdeu sua ligação com a "alma vegetativa" da filosofia de Aristóteles e, assim, o dualismo entre matéria e forma tornou-se irrelevante. Em nosso uso atual da palavra "matéria", a conceituação originada em Descartes é de longe a componente mais forte.

Enfim, na ciência natural do século XIX, um outro dualismo teve sua importância, a saber, o dualismo entre força e matéria: a matéria é aquilo sobre a qual forças podem agir e, por outro lado, a matéria pode produzir forças. Assim, por exemplo, a matéria produz a força da gravidade e essa força age sobre ela. Matéria e força são dois aspectos claramente distintos do mundo concreto. Na medida em que essas forças possam ser formadoras, isto é, materializantes, essa distinção se aproxima da diferenciação, entre matéria e forma, da escola aristotélica. Por outro lado, nos mais recentes desenvolvimentos da física moderna, essa distinção entre matéria e força desapareceu por completo, pois todo campo de forças contém energias e, por esse fato, é uma forma de matéria. A cada campo de forças corresponde um tipo específico de partículas elementares, que ostentam essencialmente os mesmos atributos que todas as outras unidades atômicas da matéria.

Quando a ciência natural investiga o problema da matéria, seu caminho será basicamente o estudo das formas de matéria. A infinita variedade e mutabilidade dessas formas deverá ser o objeto imediato da investigação e esforços serão envidados na procura de leis naturais, de princípios de unificação, que possam servir de guia através desse domínio imenso.

Eis porque a ciência natural - e especialmente a física - concentrou sua análise, por um longo período, na estrutura da matéria e nas forças responsáveis por essa estrutura.

Desde os tempos de Galileu, o método fundamental da ciência da Natureza tem sido a experimentação. Esse método tomou possível passar- se de uma vivência geral à experimentação específica, na qual fenômenos característicos são selecionados e por meio dos quais suas "leis" podem ser estudadas de maneira mais direta que por uma vivência experimental mais genérica. Caso se desejasse estudar a estrutura da matéria, ter-se-ia que realizar experiências com a matéria. Ter-se-ia, então, que submetê-la a condições extremas a fim de estudar suas transmutações, na esperança de

descobrir as características fundamentais da matéria que persistem apesar de todas as mudanças aparentes.

Na aurora da ciência natural moderna, foi esse o objetivo da química, tentativa que conduziu logo ao conceito de elemento químico. Uma substância que não pudesse ser dissolvida ou decomposta pelos meios ao alcance do químico como, por exemplo, ebulição, combustão, dissolução, mistura com outras substâncias, etc. foi chamada de "elemento". A introdução desse conceito constituiu-se no primeiro e mais importante passo na rota do entendimento da estrutura da matéria. Dessa maneira, a enorme variedade de substâncias foi por fim reduzida a um número relativamente pequeno de substâncias fundamentais, os "elementos", e conseguiu-se assim estabelecer uma certa ordem entre os diversos fenômenos químicos. A palavra "átomo" foi então utilizada para designar a menor unidade de matéria pertencente ao elemento químico e a menor porção possível de um composto químico pôde ser descrita como um pequeno aglomerado de diferentes átomos. A menor porção do elemento ferro, por exemplo, seria um átomo e, a menor porção de água, a molécula d'água, essa consistindo de um átomo de oxigênio e dois de hidrogênio.

O passo seguinte, quase da mesma importância, foi a descoberta da conservação da massa nas reações químicas. Quando, por exemplo, o elemento carbono se transforma, por combustão, no dióxido de carbono, a massa desse último é igual à soma das massas do carbono e oxigênio antes da reação. Foi essa descoberta que propiciou um entendimento quantitativo do conceito de matéria: a matéria poderia, independentemente de suas propriedades químicas, ser medida por sua massa.

Durante o período que se seguiu, sobretudo no século XIX, alguns novos elementos foram descobertos (em nossos tempos, o número de elementos ultrapassou uma centena). Essa evolução mostrou bem claramente que o conceito de elemento químico ainda não atingira o ponto que viesse propiciar a compreensão da unidade da matéria, isto é, o átomo. Não mais se mostrava satisfatória a crença na existência de uma ampla pluralidade de instâncias de matéria, qualitativamente diversas e sem relação aparente entre elas.

Em começos do século XIX, descobriram-se evidências que vinham demonstrar uma relação entre os diferentes elementos, pelo fato de que as massas atômicas, dos diversos elementos, pareciam frequentemente ser múltiplos inteiros de uma unidade bem menor, bem próxima da massa atômica do hidrogênio. Por outro lado, a semelhança no comportamento químico de certos elementos foi mais uma sugestão no mesmo sentido. Todavia, foi somente com a descoberta de forças muito mais fortes do que as que intervêm nos processos químicos que se pôde estabelecer realmente a relação entre os diferentes elementos e, assim, propiciar uma unificação mais estreita da matéria.

Essas forças foram, de fato, encontradas no processo radioativo descoberto, em 1896, por Becquerel. Pesquisas sucessivas conduzidas por Mme. Curie, Rutherford e outros vieram revelar a transmutação de elementos no processo radioativo. Nesse processo, eram emitidas partículas alfa, fragmentos atômicos cuja energia era cerca de um milhão de vezes maior que aquela desprendida, por uma partícula atômica, em uma reação química. Assim, portanto, as partículas alfa podiam ser utilizadas como novas ferramentas na investigação da estrutura interna do átomo. As experiências de Rutherford, de espalhamento de partículas alfa, conduziram ao modelo do núcleo atômico, por ele proposto em 1911. A característica mais importante desse bem conhecido modelo é a divisão do átomo em duas partes distintas, a saber, o núcleo atômico e as camadas eletrônicas que o circundam. O núcleo ocupa, no centro do átomo, uma fração extremamente pequena do espaço ocupado pelo átomo (seu raio é cerca de uma centena de milhares de vezes menor que o do átomo), mas nele se concentra quase toda a massa atômica. Sua carga elétrica positiva, múltiplo inteiro da chamada carga elementar, determina o número de elétrons periféricos (o átomo, como um todo, deve ser eletricamente neutro) e, também, as formas de suas órbitas.

A distinção entre núcleo e camadas eletrônicas propiciou, de imediato, uma explicação adequada do fato de que, na química, os elementos químicos são os elementos últimos de matéria e que forças consideravelmente maiores seriam necessárias para se transformar elementos uns nos outros. A ligação química, entre átomos vizinhos, é devida a uma interação das camadas eletrônicas, as energias dessas interações sendo comparativamente pequenas. Um elétron que seja acelerado, em um tubo de descarga, por um potencial de uns poucos volts, ganha energia bastante para excitar as camadas eletrônicas de modo a fazê-las emitir radiação ou, mesmo, para romper a ligação química de uma molécula. Mas o comportamento químico de um átomo, embora ele decorra do procedimento das camadas eletrônicas, é determinado pela carga do núcleo. Portanto, para se mudar as propriedades químicas, é necessário transmutar o núcleo e isso requer energias cerca de um milhão de vezes maiores.

Entretanto, se o modelo nuclear do átomo fosse pensado como um sistema que obedecesse a mecânica newtoniana, esse modelo não poderia explicar a estabilidade dos átomos. Como já observado, em um dos capítulos anteriores, foi somente pela aplicação da teoria quântica a esse modelo, através do trabalho de Bohr, que se pôde justificar o fato de que, por exemplo, um átomo de carbono - após ter interagido com outros átomos, ou após ter emitido radiação - continua sempre sendo o mesmo átomo de carbono, com as mesmas camadas eletrônicas de antes. Essa estabilidade pôde ser explicada simplesmente por aquelas características da teoria quântica que impedem uma descrição objetiva simples, no espaço e tempo, da estrutura atômica.

Conseguiu-se, dessa maneira, uma primeira base para o entendimento da natureza da matéria. As propriedades dos átomos, químicas e outras, podiam, então, ser explicadas aplicando-se o esquema matemático da teoria quântica às camadas eletrônicas. A partir desse ponto de partida, podia-se tentar estender o estudo da estrutura da matéria em duas direções opostas: seja estudar a interação entre átomos, sua relação com unidades maiores de matéria como as moléculas, cristais ou objetos biológicos; seja procurar chegar, através da investigação do núcleo atômico e de seus componentes, à unidade última da matéria. A pesquisa desenvolveu-se ao longo de ambas as linhas, durante as décadas passadas e, veremos, nas páginas que seguem, o papel que desempenhou a teoria quântica nessas duas linhas de trabalho.

As forças entre átomos vizinhos são, basicamente, de origem elétrica: atração entre cargas opostas e repulsão no caso de cargas de mesmo sinal; os elétrons são atraídos pelo núcleo mas repelindo-se uns aos outros. Essas forças, todavia, não seguem as leis da mecânica newtoniana mas, sim, as da mecânica quântica.

Isso conduz a dois tipos distintos de ligação entre átomos. Em um caso, o elétron de um átomo passa para o outro átomo, a fim de, por exemplo, acabar de encher uma camada eletrônica quase totalmente fechada. Nesse caso, os dois átomos ficam, ao fim do processo, eletricamente carregados e tornam-se o que os físicos chamam de *íons* e, visto que suas cargas são opostas, eles atraem um ao outro. No segundo caso, um elétron pertence (de uma maneira que é bem característica da teoria quântica) a ambos os átomos. Fazendo-se uso da imagem de órbita eletrônica, poder-se-ia dizer que o elétron transita em volta de ambos os núcleos, passando um tempo comparável a girar em tomo de cada um deles. Esse segundo tipo corresponde ao que os químicos chamam de *ligação de valência.*

Esses dois tipos de forças, que podem ocorrer conjuntamente, de diferentes maneiras, dão lugar à formação de aglomerados diversos de átomos e parecem ser, por fim, responsáveis por todas as estruturas complexas da matéria macroscópica massiva, estudadas em física e química. A formação de compostos químicos ocorre através da formação de pequenos conglomerados fechados de átomos diferentes, sendo cada um deles uma molécula do composto. A formação de cristais deve-se aos arranjos de átomos em reticulados regulares. Os metais são formados quando os átomos estão empacotados tão densamente que seus elétrons exteriores espirram de suas camadas e passam a vagar através do pedaço de metal inteiro. O magnetismo de algumas substâncias, especialmente de alguns metais, é devido ao movimento de rotação de elétrons individuais nesses metais; e assim por diante.

Em todos esses casos, o dualismo entre matéria e força ainda pode ser retido, pois podemos considerar núcleos e elétrons como fragmentos de

matéria que são mantidos juntos por meio das forças eletromagnéticas.

Enquanto a física e a química chegaram a uma união quase completa, no que diz respeito à estrutura da matéria, a biologia lida com estruturas consideravelmente mais complexas e de um tipo um tanto diferente. É verdade que, apesar da unidade do organismo vivo, certamente não se pode fazer uma distinção estrita entre matéria viva e matéria inanimada. O desenvolvimento da biologia forneceu-nos um grande número de exemplos, onde se pode ver que funções biológicas específicas são cumpridas por moléculas grandes e especiais, ou por aglomerados e cadeias de tais moléculas, e a biologia moderna tem demonstrado uma crescente tendência de explicar os processos biológicos como sendo consequências das leis da física e química. Todavia, o tipo de estabilidade exibido pelo organismo vivo é de natureza um tanto diversa da estabilidade de átomos e cristais: pois ela é mais uma estabilidade de reação ou de função do que uma estabilidade de forma. Não pode haver dúvida de que as leis da teoria quântica desempenham um papel importante no entendimento dos fenómenos biológicos. Assim, por exemplo, essas forças quânticas específicas, que podem ser descritas somente imprecisamente pelo conceito de valência química, são essenciais para o entendimento das grandes moléculas orgânicas e de suas diversas configurações geométricas; as experiências sobre as mutações biológicas provocadas por irradiações mostram tanto a relevância das leis estatísticas quânticas como, também, a existência de mecanismos amplificadores. A analogia estreita entre o funcionamento de nosso sistema nervoso e dos modernos computadores realça mais uma vez a importância de processos elementares isolados no organismo vivo. Mesmo assim, tudo isso não constitui prova de que a física e química, acrescidas do conceito de evolução, possam no futuro oferecer uma descrição completa do organismo vivo. Os processos biológicos devem ser tratados, pelo experimentador, com cautela maior que naqueles da física e química. Como Bohr observou, bem pode ocorrer que uma descrição do organismo vivo, que seria considerada completa, do ponto de vista do físico, seja realmente inviável pelo fato de requerer experimentações que interfeririam de forma demasiadamente intensa com as funções biológicas. Essa situação, Bohr a descreveu dizendo que, em biologia, nós temos a ver com manifestações de possibilidades, nessa Natureza a que pertencemos, ao invés de resultados de experiências que possamos realizar. A situação de complementariedade, a que alude essa formulação, é vista como uma tendência nos métodos de pesquisa da biologia moderna, a qual, por um lado, faz uso intenso de todos os métodos e resultados da física e química e, por outro, baseia-se em conceitos que se referem àquelas características da matéria viva que não dizem respeito à física e química; por exemplo, o conceito de vida.

Fizemos, até aqui, uma análise da estrutura da matéria seguindo uma única direção: do átomo às estruturas mais complexas, de muitos átomos;

da física atômica à física do estado sólido, à química e à biologia. Agora, faz-se necessário percorrermos a rota inversa e seguir a linha de pesquisa que vai da periferia eletrônica do átomo ao seu núcleo e, dele, às partículas elementares que o compõem. Essa é a via que, provavelmente, conduzirá a um entendimento acerca da unidade da matéria. Aqui, não há por que temer destruir, pela experimentação, características essenciais dos sistemas estudados. Quando nos propomos a tarefa de explorar a unidade última da matéria, podemos expô-la a forças as mais intensas, às condições as mais extremas, a fim de verificar se, de fato, qualquer matéria pode ser transmutada em outra.

O primeiro passo nesta direção foi a análise experimental do núcleo atômico. No período inicial dessas pesquisas aproximadamente durante as três primeiras décadas deste século, as únicas ferramentas disponíveis foram as partículas alfa emitidas por corpos radioativos. Por esse meio, conseguiu Rutherford, em 1919, a transmutação de núcleos de elementos leves; ele pôde, por exemplo, transformar um núcleo de nitrogênio em um de oxigênio, acrescentando uma partícula alfa ao núcleo de nitrogênio e, ao mesmo tempo, dele arrancando um próton. Foi esse o primeiro exemplo de processos, em escala nuclear, que fez lembrar as reações químicas, e que conduziu à transmutação artificial de elementos. O segundo progresso substancial foi, como é bem conhecido, acelerar prótons, em laboratório, a energias suficientemente altas para causar transmutações nucleares, isso por intermédio de equipamentos de alta-tensão. Para esse fim, requerem-se voltagens de cerca de um milhão de volts e conseguiram, Cockcroft e Walton, em sua primeira experiência decisiva, transmutar núcleos de lítio em hélio. Essa descoberta abriu uma linha de pesquisa, inteiramente nova, que fez jus à denominação de *física nuclear* e que logo conduziu a um entendimento qualitativo da estrutura do núcleo atômico.

A estrutura do núcleo mostrou ser de fato muito simples. O núcleo atômico consiste tão-somente de dois tipos de partículas elementares. Uma delas, o próton, é, simplesmente, o núcleo do hidrogênio; a outra, o nêutron, é uma partícula de massa aproximadamente igual à do próton, sendo porém, como sugere seu nome, eletricamente neutra. Todo núcleo pode ser caracterizado pelo número de prótons e nêutrons que o compõem. O do carbono comum, por exemplo, consiste de 6 prótons e 6 nêutrons. Há, todavia, outras espécies de núcleos de carbono, menos abundantes na Natureza (ditos isótopos dos primeiros) que são compostos de 6 prótons e 7 nêutrons, etc. Assim, finalmente, chegou-se a uma descrição da matéria que, ao invés de um grande número de elementos químicos diversos, se resume em três unidades fundamentais: próton, nêutron e elétron. Toda matéria consiste de átomos e, portanto, é edificada a partir dessas três “pedras fundamentais”. Aqui, ainda não se atingira a unidade da matéria mas, certamente, um passo largo na busca da unificação e – o que talvez seja mais importante - sua simplificação. Havia ainda, certamente, um longo

caminho a percorrer, do conhecimento experimental das duas "pedras fundamentais", que compõem o núcleo, a um entendimento completo de sua estrutura. A questão, aqui, era um tanto diversa do problema correspondente nas camadas atômicas mais externas, que tinha sido resolvido no meio da década dos vinte. No caso das camadas eletrônicas dos átomos, as forças entre as partículas eram conhecidas com grande precisão, enquanto que as leis dinâmicas ainda tinham que ser descobertas, como realmente o foram na mecânica quântica. No núcleo atômico, as leis dinâmicas, no que se refere a seus constituintes, poderiam muito bem ser supostas aquelas da mecânica quântica, mas - esse era o problema - as forças entre as partículas não eram conhecidas de antemão: elas tinham que ser teoricamente deduzidas das propriedades dos núcleos, reveladas experimentalmente. Esse problema ainda não foi completamente resolvido. Essas forças, provavelmente, não têm forma tão simples quanto as forças eletrostáticas que operam nas camadas eletrônicas dos átomos e, em consequência, a dificuldade matemática de se derivar as propriedades nucleares, a partir de forças complicadas, como também a imprecisão das experiências, tornam o progresso difícil. Mesmo assim, pode-se dizer que um entendimento qualitativo da estrutura nuclear já foi definitivamente alcançado.

Assim, pois, restava ainda o problema final, a unidade da matéria. Pode-se, aqui, perguntar: serão essas "pedras fundamentais" da matéria - próton, nêutron e elétron - unidades últimas e indestrutíveis da matéria, átomos na acepção de Demócrito, sem relação alguma entre si exceto por suas interações, ou serão elas, tão-somente, formas diversas do mesmo tipo de matéria? E podem essas três "pedrinhas" transmutar-se uma na outra e, possivelmente, em outras formas de matéria também? Uma abordagem experimental desse problema requer forças e energias, que se concentrem sobre as partículas atômicas, muito maiores que as utilizadas na investigação do núcleo atômico. Visto que as energias acumuladas nos núcleos atômicos não são grandes bastante para nos fornecer uma ferramenta hábil, nessas experimentações os físicos são obrigados a contar com forças cósmicas ou, então, com a engenhosidade e habilidade dos técnicos.

De fato, progressos foram feitos nessas duas linhas. No primeiro, os físicos utilizaram o que se denomina radiação cósmica. Os campos eletromagnéticos, na superfície das estrelas, estendem-se por espaços imensos e podem, sob certas condições, acelerar partículas atômicas carregadas, elétrons e núcleos. Os núcleos, pelo fato de terem uma inércia bem maior, parecem ter uma chance melhor de permanecer, por um tempo bastante longo, nesse campo de aceleração e, quando finalmente deixam a superfície da estrela para atravessar os espaços interestelares, eles já passaram por diferenças de potencial da ordem de muitos bilhões de volts. Poderá mesmo ocorrer uma aceleração adicional, devida aos campos magnéticos entre as estrelas; de qualquer maneira, os núcleos parecem

ficar, por longo tempo, confinados ao espaço da galáxia, por ação de campos magnéticos variáveis e, por fim, eles enchem o espaço interestelar de radiação cósmica. Essa radiação, vinda do exterior, chega à Terra, e consiste de núcleos de praticamente todos os tipos, hidrogênio e hélio e muitos elementos mais pesados, com energias que vão, em uma avaliação um tanto grosseira, de uma centena de milhão, ou de um bilhão de elétron- volts, a valores (em casos um tanto raros) um milhão de vezes maiores. Quando as partículas dessa radiação cósmica penetram na atmosfera terrestre, elas colidem com átomos de nitrogênio e oxigênio ou, mesmo, podem se chocar com átomos em um equipamento exposto a essa radiação.

A outra linha de pesquisa enveredou pela construção de grandes aceleradores de partículas*, cujo protótipo foi construído por Lawrence na Califórnia, em começos da década dos trinta. A ideia básica do funcionamento dessas máquinas é manter – por intermédio de um campo magnético intenso - as partículas carregadas revolvendo em órbitas circulares um grande número de vezes, de modo que possam ser aceleradas, passo a passo, por campos elétricos, em suas revoluções. Aceleradores com energias que atingem centenas de milhões de elétron-volts estão em uso, presentemente, na Grã-Bretanha, e através da cooperação de doze países europeus, uma enorme máquina desse tipo está sendo construída em Genebra, no CERN**, e espera-se que ela atinja energias de até 25 bilhões de elétron-volts. As experiências realizadas por intermédio da radiação cósmica ou pelos grandes aceleradores revelaram novas e interessantes características da matéria. Além dos três tijolos fundamentais - elétron, próton e nêutron - novas partículas elementares foram descobertas, criadas em processos onde intervêm energias altíssimas e sobrevivendo por tempos curtíssimos. Essas novas partículas exibem propriedades semelhantes às antigas, salvo sua grande instabilidade: as mais estáveis têm vidas-médias de cerca de um milionésimo de segundo, e outras ainda bem menores. Presentemente, cerca de vinte e cinco novas partículas são conhecidas, a mais recente sendo o próton negativo.

Esses resultados parecem, à primeira vista, conduzir a um afastamento gradual da ideia de unidade da matéria, pois o número de unidades fundamentais vem aumentando***, aproximando-se de valores comparáveis ao número de elementos químicos. Isso, porém, não seria uma interpretação adequada, pois as experiências mostraram, também, que partículas podem ser criadas, a partir de outras, ou também pela energia cinética de partículas distintas e que elas podem de novo se desintegrar em outras partículas. As experiências, de fato, revelaram a completa mutabilidade da matéria. Todas as partículas elementares podem, a energias suficientemente

* N.T. Vide a esse respeito, Apêndice ao fim deste volume: “Aceleradores de Partículas”.

** N.T. Vide Apêndice intitulado “CERN”. É preciso lembrar que o livro foi escrito há 30

*** N.T. Vide a respeito o Apêndice ao fim deste livro: “Das Partículas Elementares”.

altas, transmutar-se em outras; elas podem ser criadas às custas de energia cinética e se aniquilar em energia, dando lugar, por exemplo, a radiações. Assim, temos aqui, de fato, a prova final da Unidade da Matéria. As partículas elementares, todas elas, são feitas da mesma substância, e a essa podemos chamar de energia ou matéria fundamental: elas são tão-somente formas distintas em que a matéria pode se revelar.

Se compararmos essa situação com os conceitos aristotélicos sobre matéria e forma, poderemos dizer que a matéria, em Aristóteles, como mera *potentia*, deveria ser comparada ao presente conceito de energia, que passa ao "real" após adquirir forma no momento em que se cria a partícula elementar.

A física moderna, é claro, não se satisfaz em exibir uma descrição meramente qualitativa da estrutura fundamental da matéria; é preciso que se tente obter, com base nas investigações experimentais cuidadosas, uma formulação matemática das leis naturais que determinam as "formas" de matéria, as partículas elementares e suas forças. Nesse setor da física, não se pode fazer uma distinção bem nítida entre matéria e força, pois cada partícula elementar não somente produz forças e sofre ação de forças mas é, igualmente, representante de um certo campo de forças. O dualismo onda- partícula, da teoria quântica, faz com que a mesma entidade se revele ora sob a forma de matéria ora sob a de força.

Todas as tentativas para se encontrar uma descrição matemática de leis que digam respeito às partículas elementares tomaram por base a teoria quântica dos campos. O trabalho teórico, sobre teorias desse tipo, data dos começos da década dos trinta. As primeiras investigações nessa linha, todavia, revelaram sérios problemas, provenientes da dificuldade de se combinar a teoria quântica à relatividade restrita. À primeira vista, parecia que essas duas teorias, por se referirem a aspectos tão diferentes da Natureza, não tinham praticamente nada a ver uma com a outra e que, assim, seria fácil de se satisfazer os requisitos de ambas, dentro de um mesmo formalismo matemático. Um exame mais judicioso, todavia, mostrou que as duas teorias interferem em um certo ponto, a partir do qual surgem todas as dificuldades.

A teoria da relatividade restrita revelou uma estrutura espaço- temporal um tanto diversa daquela que foi, em geral, admitida após o triunfo da mecânica newtoniana. O aspecto mais característico da nova estrutura do espaço-tempo é a existência de uma velocidade limite, que não pode ser ultrapassada por nenhum corpo material ou por sinal algum: a velocidade da luz. Como consequência disso, dois eventos - que ocorram em pontos afastados - não poderão ter relação causal alguma se forem produzidos em tempos tais que, um sinal luminoso partindo da posição de um deles, no momento em que ocorreu o evento, só alcance o local do outro após o segundo evento já ter acontecido; e vice-versa. Nesse caso, os dois eventos podem ser ditos simultâneos. Pelo fato de ação alguma, qualquer

que seja seu tipo, poder, partindo de um evento, em um ponto, alcançar o outro evento, em outro ponto, esses dois acontecimentos não guardam entre si nenhuma ligação causal.

Por essa razão, toda "ação a distância" do tipo, por exemplo, das forças gravitacionais na mecânica newtoniana não é compatível com a teoria da relatividade restrita. Essa teoria teve então que substituir ações daquele tipo por outras que agissem, de ponto a ponto, ou seja, partindo de um certo ponto até alcançar os pontos circunvizinhos infinitesimalmente próximos. A formulação matemática mais natural para expressar tais ações de contigüidade seria através de equações diferenciais parciais, para ondas ou campos, que fossem invariantes em sua forma frente às transformações de Lorentz. Tais equações excluem qualquer ação direta entre eventos "simultâneos".

Em consequência, a estrutura espaço-temporal expressa na relatividade restrita implicava uma fronteira de separação, infinitesimalmente estreita entre a região de simultaneidade, onde nenhuma ação poderia ser transmitida, e as outras regiões, nas quais poderiam ocorrer ações diretas de evento a evento.

Na mecânica quântica, por outro lado, as relações de incerteza impõem um limite máximo definido na precisão com que posição e momento linear, ou tempo e energia, podem ser medidos simultaneamente. Como uma separação infinitesimalmente estreita significa uma precisão infinita com respeito às posições no espaço-tempo, os momentos lineares ou as energias ficam completamente indeterminados ou, de fato, energias e momentos lineares arbitrariamente grandes deverão ocorrer com altíssima probabilidade. Assim, portanto, qualquer teoria que tente satisfazer os requisitos da relatividade restrita e também da teoria quântica conduzirá a inconsistências matemáticas, a *divergências*, na região de altas energias e momentos lineares. Essa sequência de conclusões talvez não pareça estritamente obrigatória, pois qualquer formalismo do tipo que ora consideramos é demasiadamente complexo para permitir uma previsão a seu respeito. Assim, não seria inconcebível que se pudesse construir uma teoria que evitasse o conflito entre a teoria quântica e a relatividade restrita. Mas, até o momento, todos os esquemas matemáticos que foram propostos conduziram, de fato, a divergências, quer dizer, a contradições matemáticas ou, então, deixaram de preencher os requisitos das duas teorias envolvidas. E pôde-se facilmente perceber que as dificuldades têm, realmente, sua origem na questão que discutimos.

É deveras interessante se ver de que maneira esquemas matemáticos convergentes não puderam satisfazer os requisitos das duas teorias. Assim, por exemplo, um dos esquemas, quando interpretado em termos de eventos reais, no espaço-tempo, conduziu a um tipo de reversão temporal: ele dava lugar a processos em que, repentinamente, em algum ponto do espaço, partículas eram criadas, cujas energias seriam providas, posteriormente,

por algum processo de colisão entre partículas elementares, em algum outro ponto. Os físicos estão convencidos, por suas experimentações, de que processos desse tipo não ocorrem na Natureza, pelo menos se os dois processos estiverem separados por distâncias mensuráveis no espaço- tempo. Já um outro esquema procurou evitar as divergências através de um processo matemático denominado *renormalização*: parecia exeqüível relegar-se as divergências a partes do formalismo, onde elas não pudessem interferir com o estabelecimento de relações bem definidas entre grandezas diretamente observadas. Realmente, esse esquema trouxe progressos substanciais na eletrodinâmica quântica, pelo fato de, por exemplo, ter dado conta de certos detalhes interessantes do espectro do átomo de hidrogênio*, até então inexplicados. Uma análise mais aprofundada, todavia, mostrou ser provável que aquelas quantidades que, na teoria quântica normal, devem ser interpretadas como probabilidades podem em certas circunstâncias tornar-se negativas, no formalismo da renormalização. E isso impediria o uso consistente do formalismo para sua descrição da matéria.

A solução final dessas dificuldades ainda não foi encontrada. Ela emergirá, algum dia, do acervo de dados experimentais, cada vez mais precisos, sobre as diferentes partículas elementares: sua criação e aniquilação e as forças entre elas. Na procura de possíveis soluções para tais questões, talvez se devesse lembrar que processos com reversão temporal (como aquele já mencionado) não poderiam ser excluídos experimentalmente se eles se restringissem somente a regiões extremamente pequenas do espaço-tempo e, assim, fora do alcance dos atuais equipamentos experimentais. É natural que se fique relutante em aceitar tais processos onde possam ocorrer reversões temporais mesmo que em um futuro estágio da física houvesse a possibilidade de se rastrear experimentalmente tais eventos da mesma maneira que se faria com os eventos atômicos comuns. Mas, nesse ponto, a análise da teoria quântica e da relatividade restrita talvez possa, mais uma vez, propiciar uma maneira de encarar o problema sob nova luz.

A teoria da relatividade restrita está ligada a uma constante universal da Natureza, a velocidade da luz. Essa constante determina a relação geométrica entre espaço e tempo, e está, portanto, implicitamente contida em qualquer lei natural que satisfaz os requisitos da invariância de Lorentz. Nossa linguagem comum e os conceitos da física clássica só podem ser aplicados a fenômenos para os quais a velocidade da luz possa ser considerada praticamente infinita.

Quando, em nossas experiências, lidamos com situações onde ocorrem velocidades próximas à da luz, devemos estar preparados para o

* N.T. O assim chamado *Lamb shift.*

aparecimento de resultados que não podem ser interpretados por conceitos da física clássica.

A teoria quântica, por sua vez, está vinculada a uma outra constante universal da Natureza: o *quantum* de ação de Planck. Uma descrição objetiva de eventos, no espaço e tempo, só é possível quando se lida com objetos ou processos em uma escala relativamente grande, frente à qual a constante de Planck pode ser considerada infinitamente pequena. Quando, todavia, as experimentações nos levam a situações em que o *quantum* de ação se torna essencial, defrontamo-nos com todas as dificuldades que provêm do uso dos conceitos comuns, conforme já discutimos em capítulos anteriores.

Acreditamos que deva haver uma terceira constante universal da Natureza. Isso é evidente por razões puramente dimensionais. As constantes universais determinam a escala da Natureza e são grandezas características que não podem ser reduzidas a outras. É preciso, pelo menos, três unidades fundamentais para se ter um conjunto completo de unidades. Isso pode ser visto muito facilmente fazendo-se uso de um sistema convencional de unidades, por exemplo, o C.G.S. (centímetro, grama, segundo). Uma unidade de comprimento, outra de tempo e uma de massa são suficientes para formar um sistema completo, mas se deve ter, pelo menos, três unidades. Poder-se-ia substituir as do C.G.S. por unidades de comprimento, velocidade e massa; ou, então, por unidades de comprimento, velocidade e energia, e assim por diante; mas pelo menos três unidades fundamentais serão necessárias. Ora, a velocidade da luz e a constante de Planck só provêm dessas duas unidades. Está, portanto, faltando uma unidade fundamental e somente uma teoria que contenha essa terceira peça poderá eventualmente determinar as massas e outros atributos das partículas elementares. A julgar pelos conhecimentos atuais sobre essas partículas, a maneira mais adequada de se introduzir essa terceira unidade seria pela hipótese de um *comprimento fundamental*, cujo valor deveria ser de cerca de IO^{-13} cm, isto é, um pouco menor que os raios dos núcleos leves. Quando, a partir dessas três unidades, se forma uma expressão que, dimensionalmente, corresponde a uma massa, seu valor tem a ordem de magnitude das massas das partículas elementares.

Se aceitarmos que as leis da Natureza contêm, *de fato*, uma terceira constante universal, da dimensão de um comprimento, de cerca de 10^{-13} cm, deveremos então novamente esperar que nossos conceitos comuns só possam ser aplicados a regiões, no espaço e tempo, que sejam grandes em comparação com essa nova constante universal. Deveríamos estar, novamente, preparados para a eclosão de fenômenos qualitativamente de novo tipo, quando as experimentações abordassem regiões, no espaço e tempo, menores que os raios nucleares. O fenômeno de reversão temporal, já mencionado e que, até agora, foi evocado tão-somente por considerações teóricas, como uma possibilidade matemática, poderia pertencer ao

domínio dessas regiões minúsculas. Se isso assim for, não se poderia, provavelmente, observá-lo de uma maneira que viesse permitir sua descrição em termos de conceitos da física clássica. E tais processos, provavelmente, até o ponto que pudessem ser observados e descritos classicamente, manteriam a ordenação temporal.

Mas todos esses problemas serão assunto para pesquisas futuras, em física atômica. Pode-se nutrir a esperança de que os esforços combinados de experiências em altíssimas energias e da análise matemática venham um dia a propiciar um entendimento completo da unidade da matéria. A expressão "entendimento completo" poderia aqui significar que as formas da matéria, no sentido que lhe é atribuído pela filosofia aristotélica, emergiriam como resultados, vale dizer, soluções de um esquema matemático fechado que representasse as leis naturais que incidem sobre a matéria.

Capítulo X

LINGUAGEM E REALIDADE NA FÍSICA MODERNA

Na história da ciência, descobertas e ideias novas sempre suscitaram debates na comunidade científica, com publicações polêmicas a criticar as novas ideias, mas tais críticas frequentemente servem de ajuda ao desenvolvimento do novo pensamento. Essas controvérsias, no entanto, jamais alcançaram antes o nível de violência a que elas chegaram depois da descoberta da teoria da relatividade restrita e, em grau menor, após a emergência da teoria quântica. Em ambos os casos, problemas científicos foram, finalmente, misturados com questões políticas e houve cientistas que recorreram a métodos políticos a fim de defender seus pontos de vista. Essa reação violenta ao desenvolvimento atual da física só pode ser entendida se tivermos em conta que os fundamentos dessa ciência se moviam para novos tempos; e essa nova rota gerava a impressão de que se esboçava o naufrágio da física. Ao mesmo tempo, essa reação significa, provavelmente, que ainda não se encontrara a linguagem correta que expressasse a nova situação e os pronunciamentos incorretos feitos, aqui e ali, no entusiasmo que se seguiu às novas descobertas, deram lugar a todo tipo de malentendidos. Trata-se aqui de um problema realmente fundamental: o progresso da técnica experimental de nossos tempos coloca, ao alcance da ciência, novos aspectos da Natureza que não podem ser descritos em termos de conceitos da vida diária. Pode-se, pois, perguntar: em que linguagem, então, deveriam eles ser descritos? Em física teórica, a primeira linguagem que emerge, no processo de clarificação científica, é usualmente uma linguagem matemática, um esquema matemático a permitir a predição dos resultados experimentais. O físico pode se dar por satisfeito de ter, à sua disposição, esse esquema matemático e, ademais, por saber como utilizá-lo na interpretação das experiências; mas ao expor seus resultados aos leigos em física esses só se contentarão se a explicação oferecida for vazada em termos de linguagem comum, a todos compreensível. Mas, mesmo para o físico, a capacidade de poder exibir uma exposição em linguagem simples constituir-se-á em um critério do grau de entendimento a que ele chegou. Nesse contexto, as seguintes perguntas são pertinentes: até que ponto uma tal exposição é possível? Pode-se falar do próprio átomo? Aqui defrontamo-

nos com um problema de linguagem e, ao mesmo tempo, de física e, assim, é nosso mister apresentar algumas observações a respeito da linguagem, em geral, e sobre a linguagem científica, em particular.

A espécie humana forjou sua linguagem, durante a era pré-histórica, tanto no propósito de exprimir suas intenções e ideias, como também para servir de base ao seu pensamento. Pouco sabemos sobre as várias etapas de sua elaboração mas, presentemente, a linguagem encerra um grande número de conceitos que se mostram um instrumento conveniente para uma descrição, mais ou menos precisa, dos acontecimentos da vida quotidiana. Esses conceitos foram adquiridos gradualmente, sem maior análise crítica, simplesmente pelo uso constante da linguagem; afinal, após empregarmos muito frequentemente uma palavra, acreditaremos saber, aproximadamente, o que ela significa. É fato bem conhecido que as palavras não são assim tão bem definidas como elas possam parecer à primeira vista: sua aplicabilidade tem um alcance limitado. Assim, por exemplo, podemos falar de um pedaço de ferro ou de um pedaço de madeira mas não podemos nos referir a um pedaço de água: a palavra "pedaço" não se aplica a substâncias líquidas. Para mencionar um outro exemplo, relembremos uma estorinha que Bohr gostava de contar, quando se discutia a limitação inerente às palavras: Um menininho entra em uma mercearia com uma pequena moeda na mão e, após entregá-la, faz o seu pedido: "Eu quero bombons sortidos". O merceeiro pega dois bombons e os entrega dizendo- lhe: "Tome aqui dois bombons. Faça você mesmo sua mistura". Um exemplo mais sério da dificuldade que subsiste na vinculação entre palavras e conceitos é o fato de que as palavras "vermelho" e "verde" são empregadas mesmo por daltônicos embora, para eles, o alcance dessas palavras seja bastante diverso do nosso.

A incerteza intrínseca presente no significado das palavras foi, é claro, reconhecida desde muito e, em consequência, trouxe a necessidade de definições ou - como indica a etimologia do termo "definição" - a delimitação do domínio de aplicabilidade das palavras utilizadas. As definições, todavia, não podem ser construídas senão a partir de outros conceitos, de sorte que, em última forma, é necessário se ter por base conceitos ditos "primitivos", em que não cabem análises e definições*.

O problema dos conceitos na linguagem comum foi um tema maior na filosofia grega, desde Sócrates cuja vida - a acreditar na representação artística que Platão oferece do seu mestre, nos *Diálogos* - foi dedicada à discussão constante acerca do conteúdo dos conceitos na linguagem comum e das limitações nos modos de expressão. A fim de propiciar base sólida ao conhecimento científico, Aristóteles teve por bem começar sua *Lógica* por uma análise das formas que a linguagem exibe, a estrutura

* N.T. Exemplo clássico disso é a axiomática da geometria euclidiana que devemos a D. Hilbert; ver Apêndice a respeito ao final deste livro: "Axiomática da Geometria Euclidiana".

formal das deduções e conclusões, essas independentemente de seu conteúdo. Dessa maneira, conseguiu ele atingir um grau de abstração e precisão que estivera ausente, até então, da filosofia grega, contribuindo assim imensamente para a clarificação e estabelecimento de uma ordem em nossos métodos de pensar. Aristóteles conseguiu, de fato, estabelecer as bases da linguagem científica.

Por outro lado, esta análise lógica da linguagem envolve o perigo de uma simplificação excessiva. Falando-se mais geralmente: em lógica, a atenção é focalizada em construções muito especiais, relações livres de ambiguidade entre premissas e deduções, enfim modos simples de raciocínio, pondo-se de lado todas as demais construções linguísticas. Essas construções podem surgir de associações entre significados diversos para um mesmo vocábulo; por exemplo, um sentido secundário de uma palavra, que só vagamente passe pela mente quando esta é ouvida, pode contribuir de maneira essencial para o conteúdo da sentença. O fato de que vocábulos possam desencadear, em nossa mente, imagens numerosas e semiconscientes pode ser utilizado para representar, na linguagem, partes da realidade de maneira muito mais clara do que as construções lógicas por si só propiciam. Eis porque é comum os poetas objetarem acerca da logicização da linguagem, a qual - se bem interpreto suas opiniões - pode tomá-la menos fecunda na criação poética. Talvez possamos, aqui, rememorar as palavras dirigidas por Mefistófeles ao jovem estudante, no *Fausto* de Goethe*:

O tempo esvai-se logo e deves bem gozá-lo,
A ordem e a disciplina ensinam a utilizá-lo.
Aconselho-te, então, meu jovem amigo,
A primeiro estudar a Lógica comigo,
Teu espírito estará por fim bem amestrado,
E em botas espanholas muitíssimo ajustado E
assim já poderá deslizar, num momento,
Nas estradas suaves de todo pensamento.
Não andarás indeciso a torto e a direito,
Erradio, a vagar, sem o menor proveito.
Aqui te ensinarão, durante muitos dias,
O que de um golpe só comumente fazias,
Qual comer e beber com liberdade, várias
Vezes. Uma! duas! três! quantas necessárias.
Na verdade isso ocorre em fábrica-pensante
Como do tecelão na máquina possante,
Onde um só pedal move mil filamentos,
Em que as peçazinhas vibram em movimentos,

* Tradução de Sílvio Meira (edição de 1976 da Abril S.A. Cultural e Industrial, São Paulo - SP; pp. 92 e 93).

Invisíveis os fios deslizam com pujança,
O filósofo sábio investiga e avança,
Demonstra que no mundo está tudo na ordem:
O primeiro era assim, o segundo também,
Então terceiro e quarto em seguida vêm.
Se o primeiro e segundo em ordem não se viam,
Terceiro e quarto então jamais se encontrariam.
Isso louvam estudantes em todos os rincões,
Mas nunca eles se tornam ao menos tecelões.
Quem quer investigar e a Vida desvendar,
O espírito abandona em primeiro lugar,
E exibe nas suas mãos apenas a matéria,
Infelizmente falta aquela força etérea.

Esta passagem, do *Fausto*, exibe uma descrição admirável da estrutura da linguagem e a estreiteza dos modos lógicos simples.

Por outro lado, a ciência está, forçosamente, baseada na linguagem como seu único meio de comunicação; nesse caso, onde a ausência de ambiguidade torna-se crucial, os modos lógicos encontram seu verdadeiro papel. A dificuldade característica, a esse respeito, pode ser descrita da maneira seguinte: na ciência natural, tenta-se do geral deduzir o particular e, assim, entender um dado fenômeno como consequência de leis simples e gerais. As leis gerais, uma vez formuladas, em linguagem apropriada, só poderiam conter um pequeno número de conceitos simples; caso contrário, elas não seriam nem simples nem tampouco gerais. Com base nesses conceitos primitivos, essas leis dariam lugar a uma variedade sem número de fenômenos possíveis, não em forma meramente qualitativa, mas sim com precisão completa, a propósito de qualquer detalhe. É evidente que os conceitos da linguagem comum, imprecisos e vagamente definidos, jamais poderiam dar lugar a tais deduções, múltiplas e precisas. Quando uma cadeia de conclusões decorre de premissas dadas, o número de elos possíveis, na cadeia considerada, dependerá da precisão dessas premissas. Assim, os conceitos nessas leis gerais terão que ser definidos, na ciência natural, com precisão completa e isso só poderá ser conseguido recorrendo-se a formulações abstratas da matemática.

Em outras ciências, a situação pode revelar-se um tanto semelhante, na medida em que haja necessidade de conceitos com razoável precisão; é o que ocorre, por exemplo, na ciência do Direito. Mas, nesse caso, o número de elos na cadeia de conclusões não necessita ser muito numeroso, nem muito alta a sua precisão e, em consequência, definições com exatidão satisfatória, em termos da linguagem comum, mostrar-se-ão suficientes.

Na física teórica, procura-se entender grupos de fenômenos através da introdução de símbolos matemáticos que são relacionados com fatos, vale dizer, com os resultados experimentais. A esses símbolos associam-se denominações que põem em evidência sua vinculação com a medida e,

dessa maneira, símbolos matemáticos são ligados à linguagem. Os símbolos são, depois, inter-relacionados por intermédio de um sistema rigoroso de definições e axiomas e, finalmente, as leis da Natureza são expressas mediante equações entre esses símbolos. A variedade infinita de soluções dessas equações corresponderá então à variedade sem número de fenômenos particulares que são possíveis nesse setor da Natureza. Assim se procedendo, o esquema matemático representará o conjunto de fenômenos, enquanto persistir a vinculação entre símbolos e medidas. É essa correlação que permitirá expressar as leis naturais nos termos da linguagem comum, pois as experimentações - consistindo de atos e observações - sempre poderão ser descritas em palavras da vida quotidiana.

Mesmo assim, no processo de evolução do conhecimento científico, ocorre em paralelo uma expansão correspondente da terminologia que a linguagem ostenta. Novos termos são criados e os mais antigos ganham um maior domínio de aplicabilidade ou, então, tomam significados distintos do uso comum. Termos como "energia", "eletricidade" e "entropia" são exemplos bem conhecidos. É dessa maneira que se desenvolveu uma linguagem científica, a qual poderá ser encarada como uma *extensão natural* da linguagem comum, uma adaptação aos novos campos do conhecimento científico.

Durante o século passado, alguns conceitos novos foram introduzidos em física e, em certos casos, muito tempo levou até que os cientistas os assimilassem. O conceito de "campo eletromagnético", por exemplo, que já estivera, dentro de certos limites, presente no trabalho experimental de Faraday e que, posteriormente, se tomou a base da teoria de Maxwell, não foi facilmente aceito pela maioria dos físicos que nesses tempos concentravam-se, em primeiro lugar, no estudo do movimento mecânico dos corpos materiais. A introdução daquele conceito envolveu, de fato, também uma mudança nas ideias científicas correspondentes. E transições desse tipo jamais são conseguidas facilmente.

Mesmo assim todos os conceitos que foram introduzidos até o final do século passado formavam um conjunto perfeitamente consistente, aplicável a um largo domínio de fenômenos. Esses novos conceitos, agregados aos anteriores, deram lugar a uma linguagem que não somente foi assimilada pelos físicos como também pelos técnicos e engenheiros que a utilizaram com sucesso em seu trabalho. À base dessas ideias fundamentais encontravam-se as hipóteses seguintes: l. a ordenação temporal dos fenômenos independe da sua ordem espacial; 2. a geometria euclidiana é válida no espaço "real"; 3. os fenômenos, no espaço e tempo, "acontecem" independentemente de serem observados ou não. A respeito desse último item, entenda-se que os experimentalistas não negavam que cada observação pudesse afetar o fenômeno pesquisado: todavia, era crença generalizada que se as experiências fossem cuidadosamente conduzidas, essa influência poderia ser feita arbitrariamente pequena. Isso, de fato, parecia

uma condição necessária para a preservação do ideal de objetividade, ideal que era considerado como a base de toda ciência da Natureza.

Eis então que a paz, que a física conhecia, foi rompida pela erupção da teoria quântica e da relatividade restrita, eclosão repentina mas vagarosa ao começo e, gradualmente, aumentando em intensidade, que veio abalar as bases da ciência natural. As primeiras discussões acaloradas tiveram por assunto os problemas do espaço e tempo que a teoria da relatividade levantara. Dever-se-ia considerar a contração de Lorentz, de corpos em movimento, como uma contração "real" ou só "aparente"? Poder-se-ia afirmar que a estrutura do espaço e tempo é realmente distinta do que se tinha admitido a seu respeito? Ou talvez, dever-se-ia somente dizer que os resultados experimentais poderiam ser relacionados matematicamente de modo a corresponder a essa nova estrutura, enquanto que, de fato, espaço e tempo - por serem a maneira necessária e universal pela qual percebemos as coisas - permaneceriam o que sempre foram? O problema, que realmente estava por trás dessas várias controvérsias, consistia no fato de que não havia linguagem alguma que pudesse ser consistentemente utilizada nessa nova situação. A linguagem comum baseara-se nas velhas concepções de espaço e tempo e era o único meio de comunicação, livre de ambiguidade, disponível na preparação das experiências e na colheita de seus dados. As experiências, todavia, mostraram que os velhos conceitos não tinham a ampla aplicabilidade que até então se admitira a seu respeito.

Para se interpretar a teoria da relatividade, o ponto de partida -o mais evidente - concentrou-se no reconhecimento de que, no limite de pequenas velocidades (pequenas em relação à velocidade da luz), a nova teoria praticamente se identificava com a antiga mecânica newtoniana. Em consequência, no domínio da mecânica relativística, tornou-se óbvio de que maneira os símbolos matemáticos deveriam ser relacionados com as medidas e, também, com os termos da linguagem comum; com efeito, foi somente através desse relacionamento que a transformação de Lorentz foi descoberta. Não havia, nesse domínio, ambiguidade alguma no tocante ao significado dos termos e dos símbolos matemáticos correspondentes. E, de fato, esse relacionamento mostrou-se suficiente para que a teoria fosse aplicada ao domínio inteiro da pesquisa experimental, onde a teoria da relatividade interviesse. E, portanto, as questões controversas sobre a condição de "realidade" ou de "aparência" da contração de Lorentz, ou acerca da definição de "simultaneidade" e assim por diante, não diziam respeito a fatos mas sim à linguagem utilizada.

Quanto à linguagem, percebeu-se gradualmente que não se deveria, talvez, insistir demasiado sobre certos princípios. Observemos que é sempre difícil encontrar-se critérios fidedignos que indiquem quais, e de que maneira, termos linguísticos devam ser empregados. Aqui, a solução é, por assim dizer, um compasso de espera, a fim de que a evolução da linguagem venha, no passar do tempo, a permitir um ajustamento à nova situação. Na

realidade, esse acordo ocorreu, em boa medida, na teoria da relatividade restrita durante os últimos cinquenta anos. A distinção entre a contração "real" e a "aparente", por exemplo, simplesmente desapareceu. O termo "simultâneo" é utilizado em observância à definição apresentada por Einstein, enquanto - no que toca à definição mais ampla - faz-se comumente uso da expressão "em um intervalo do tipo espaço".

Na teoria da relatividade geral, a ideia de se associar uma geometria não-euclidiana ao espaço real sofreu oposição considerável por parte de alguns filósofos, que argumentavam que o método todo, utilizado na preparação das experiências, pressupunha a geometria euclidiana.

De fato, se um técnico quiser preparar uma superfície perfeitamente plana, ele poderá fazê-lo da seguinte maneira. Para começar, ele fabricará três superfícies, do mesmo tamanho e, aproximadamente, planas. A seguir, procurará colocar duas delas em contato estreito uma com a outra e isso em diversas posições relativas. O grau em que esse contato é conseguido na extensão inteira das superfícies é uma medida da precisão com que elas possam ser consideradas "planas". O técnico somente dar-se-á por satisfeito se o contato entre duas delas quaisquer for completo em toda a sua extensão. Se isso ocorrer, pode-se mostrar matematicamente a validade da geometria euclidiana nas três superfícies. Dessa maneira - esse foi o argumento utilizado - a validade da geometria euclidiana foi simplesmente *construída* por intermédio de nossas próprias medidas.

Do ponto de vista da relatividade geral, é claro, pode-se replicar que esse argumento prova a validade da geometria euclidiana tão-somente em domínios de pequena extensão espacial, isto é, das dimensões do equipamento experimental. A precisão com que aquela geometria é válida, nesse domínio, é tão alta que o processo, acima mencionado, de se construir superfícies planas, poderá sempre ser realizado na prática. Os desvios, extremamente diminutos, da geometria euclidiana, que ainda persistem nos "pequenos domínios", não serão percebidos pois, de fato, as superfícies são feitas de material que não é estritamente rígido, permitindo assim pequenas deformações; por outro lado, o conceito de "contato" não pode ser definido com precisão absoluta. Para superfícies de dimensões astronômicas, o processo, que "nosso" técnico adotou, simplesmente não funcionaria; mas esse não é um problema que diz respeito à física experimental.

O ponto de partida óbvio para a interpretação física do esquema matemático da relatividade geral é, novamente, que a geometria é quase euclidiana para dimensões pequenas: a teoria tende à teoria clássica nesses domínios. Aqui, portanto, a inter-relação entre símbolos matemáticos resultados de medidas e conceitos da linguagem comum é desprovida de qualquer ambiguidade. Mesmo assim, pode-se falar de uma geometria não-euclidiana para grandes dimensões. De fato, bem antes da criação da teoria da relatividade geral, a possibilidade do espaço real ser descrito por uma

geometria não-euclidiana foi considerada por matemáticos, sobretudo por Gauss, em Gòttingen: fazendo medidas geodésicas muito precisas sobre um triângulo formado por três montanhas - Brocken (nas montanhas de Harz), Inselberg(na Turíngia) e Hohenhagen (perto de Göttingen) - conta- se que ele verificou mui cuidadosamente se a soma dos três ângulos perfazia, de fato, 180 graus; e, ademais, que ele considerava como possível um resultado diverso, o que evidenciaria um desvio relativamente à geometria euclidiana. Gauss, todavia, não pôde constatar desvio algum, dentro da precisão de suas medidas.

Na teoria da relatividade geral, a linguagem com a qual se descreve suas leis gerais é aquela da matemática e, para a descrição das experiências, pode-se utilizar os conceitos da linguagem comum, isso porque a geometria mantém, em boa aproximação, sua validade para dimensões pequenas.

Um problema bem mais complexo ocorre, na teoria quântica, no que diz respeito à utilização da linguagem. Aqui não se tem, de começo, nenhum critério simples para se correlacionar os símbolos matemáticos aos conceitos da linguagem quotidiana; e a única coisa que sabemos, como ponto de partida, é que os conceitos comuns não são aplicáveis ao estudo das estruturas atômicas. Aqui, novamente, a abordagem mais óbvia – para a interpretação física do formalismo - parece ser o fato de que o esquema matemático da mecânica quântica tende ao da mecânica clássica, para sistemas físicos com dimensões apreciavelmente maiores que as exibidas pelos átomos. Mas mesmo essa asserção só pode ser aceita com reservas. Pois, mesmo para tais sistemas, há numerosas soluções das equações quânticas que não encontram correspondência na física clássica. Nessas soluções, o fenômeno de "interferência das probabilidades" iria comparecer, conforme já foi discutido em capítulos anteriores, o que nada encontra de análogo em física clássica. Assim, portanto, mesmo no limite de grandes dimensões, a correlação – entre símbolos matemáticos, medidas experimentais e conceitos ordinários - está longe de ser trivial. A fim de se obter um tal inter-relacionamento, livre de ambiguidades, deve-se levarem conta um outro aspecto do problema. É preciso se ter em mente que o sistema físico, que está sendo tratado pelos métodos da mecânica quântica, é, de fato, somente parte de um sistema muito maior (eventualmente, o mundo inteiro) e que ele está interagindo com o resto desse sistema maior; deve-se aqui adicionar que as propriedades microscópicas do sistema maior são (pelo menos em boa medida) desconhecidas. Essa asserção é, indubitavelmente, uma descrição correta da situação de fato. Visto que o sistema físico não poderia ser o objeto de medidas e investigações teóricas, ele, de fato, não pertenceria ao mundo dos fenômenos, se não tivesse interação alguma com as outras partes do sistema maior, de que faz parte o observador. Tal interação, aliada ao desconhecimento das propriedades microscópicas do sistema maior, introduz então um novo elemento estatístico na descrição - quântica ou clássica - do sistema considerado. No caso limite de amplas

dimensões, esse elemento estatístico destrói os efeitos da "interferência de probabilidades" e isso, de tal maneira, que agora o esquema da mecânica quântica de fato tende ao clássico, no limite considerado. Nesse ponto, portanto, a correlação entre os símbolos matemáticos da teoria quântica e os conceitos da linguagem comum não exibe qualquer ambiguidade e ela revela-se suficiente para a interpretação das experiências. Os problemas remanescentes dizem respeito, de novo, à linguagem, ao invés dos fatos, pois faz parte do conceito de "fato" ser ele passível de uma descrição na linguagem quotidiana.

Observe-se que os problemas linguísticos são, nesse caso, realmente sérios. Nós, afinal, desejamos poder falar - de alguma maneira - sobre a estrutura dos átomos, digamos, e não somente acerca de "fatos", esses últimos sendo, por exemplo, manchas negras em uma chapa fotográfica ou gotículas d'água em uma câmara de Wilson. Mas não teremos como descrever a estrutura dos átomos na linguagem comum.

Essa análise pode, agora, ser levada avante por dois caminhos distintos. Podemos, por exemplo, indagar que linguagem, vinculada às estruturas atômicas, foi de fato desenvolvida entre os físicos, nos trinta anos que se passaram após o advento da mecânica quântica. Ou poderemos, então, descrever as tentativas para se definir uma linguagem científica precisa que corresponda ao esquema matemático.

No que diz respeito ao primeiro desses caminhos, pode-se dizer que o conceito de complementaridade, introduzido por Bohr na interpretação da teoria quântica, veio encorajar os físicos a utilizar uma linguagem ambígua ao invés de uma desprovida de ambiguidades, a fazer uso de conceitos clássicos, de maneira um tanto vaga, em conformidade com o principio de indeterminação, a aplicar em alternância conceitos clássicos distintos que, se usados simultaneamente, levariam a contradições. Estamos, pois, acostumados a falar de órbitas eletrônicas, de ondas materiais e densidades de carga, sobre energia e momento linear (e assim por diante), sempre cientes, todavia, do fato de que esses conceitos sempre exibem uma aplicabilidade assaz restrita. Quando esse emprego vago e não sistematizado da linguagem natural conduzir a dificuldades, o físico deverá retornar ao esquema matemático, à correlação consistente entre a formulação matemática e os dados experimentais.

Apesar de tudo, esse emprego impreciso da linguagem é, em muitos aspectos, deveras satisfatório, por nos fazer relembrar de um uso semelhante no falar quotidiano ou na linguagem poética. Com efeito, é de se perceber que a complementaridade não se restringe somente ao mundo atômico: com ela defrontar-nos-emos ao refletir acerca de uma decisão a tomar e os motivos para nossa escolha, ou quando quisermos escolher entre usufruir sensualmente da música e analisar sua estrutura. Por outro lado, quando os conceitos clássicos são utilizados dessa maneira, eles sempre retêm uma certa vagueza: adquirem eles, em seu relacionamento com a "realidade", o

mesmo tipo de conteúdo estatístico que está presente na termodinâmica, na interpretação estatística dessa fenomenologia. Assim, poderá ser útil apresentar-se uma breve discussão desses conceitos estatísticos da termodinâmica.

No que diz respeito ao conceito de "temperatura", na termodinâmica clássica, tem-se a impressão de que ela retrata um aspecto objetivo da realidade, uma propriedade objetiva da matéria. Na vida diária, é muito fácil definir-se, com ajuda de um termômetro, o que queremos dizer ao afirmarmos que um dado corpo está a uma certa temperatura. Quando, porém, procurarmos definir o que se poderia entender por temperatura de um átomo, colocamo-nos, mesmo na física clássica, em uma situação muito mais difícil. O que ocorre aqui é que não se pode correlacionar o conceito de "temperatura de um átomo" com uma propriedade bem definida desse átomo; mas se pode, pelo menos parcialmente, relacioná-lo à insuficiência de nosso conhecimento a respeito. Poderemos, por exemplo, inter- relacionar a magnitude da temperatura com certas probabilidades estatísticas sobre as propriedades do átomo, mas parece um tanto duvidoso que uma tal expectativa probabilística possa ser considerada objetiva. O conceito de "temperatura de um átomo" não está melhor definido que o conceito de "mistura", na estorinha de Bohr, do menino que quis comprar bombons sortidos.

Na teoria quântica, analogamente, todos os conceitos clássicos - quando aplicados ao átomo - encontram-se tão bem ou tão mal definidos como o de "temperatura de um átomo": eles estão correlacionados com certas expectativas estatísticas acerca das propriedades atômicas; somente em instâncias raras, a expectativa, isto é, a probabilidade correspondente, equivalerá à certeza. E, de novo, como no caso da termodinâmica estatística clássica, é difícil considerar-se essa expectativa como algo objetivo. Talvez se possa chamá-la de tendência ou possibilidade objetiva, uma potencialidade, a *potentia* no sentido da filosofia aristotélica. De fato, eu pessoalmente acredito que a linguagem que os físicos efetivamente utilizam, ao falar sobre fenômenos atômicos, sugere em suas mentes algo semelhante ao conceito de *potentia*. E os físicos, assim, foram gradualmente se habituando a falar, por exemplo, de órbitas eletrônicas, não como uma "realidade" mas sim como uma *potentia.* A linguagem acabou por encontrar seu ajustamento, pelo menos até certo ponto, a essa situação de fato. Ela retém, todavia, a imprecisão que lhe é peculiar, impossibilitando o uso dos esquemas lógicos usuais: defrontamo-nos aqui com uma linguagem apta a cintilar imagens em nossas mentes, seu uso sendo permeado pelo conhecimento de que essas imagens guardam só uma vaga relação com a "realidade", elas a representar tão-somente uma tendência na direção dessa "realidade".

Esse fato de que a linguagem utilizada pelos físicos peca por uma imprecisão que não temos como evitar conduziu então a tentativas de

definição de uma linguagem nova e precisa que obedecesse a certos esquemas lógicos, em plena conformidade com a formulação matemática da teoria quântica. O resultado dessas tentativas, da autoria de Birkhoff e Neumann*, e mais recentemente por parte de Weizsäcker, pode ser descrito dizendo-se que o esquema matemático da teoria quântica pode ser interpretado como uma extensão ou modificação da lógica clássica. É, em especial, um dos princípios fundamentais da lógica clássica que parece requerer uma nova concepção, como discutiremos a seguir. Na lógica clássica, supõe-se que, se uma afirmação tiver sentido, há então somente duas possibilidades a considerar, a saber, ela é correta ou, caso contrário, sua negação o será. Nas duas seguintes asserções, "nesta mansarda há uma mesa" e "não há uma mesa nesta mansarda", uma delas é verdadeira e, a outra, falsa. Aqui vigora o princípio do "terço excluído", *tertium non datur*. uma terceira possibilidade inexiste. Pode ocorrer, pela fragilidade de nosso conhecimento, que não saibamos decidir qual das duas assertivas, a afirmativa ou sua negativa, seja a correta; mas, de fato, somente uma delas é verdadeira.

Na teoria quântica, o "princípio do terço excluído" precisa ser modificado. Poderemos, todavia, adotar uma atitude contrária a qualquer alteração nesse princípio fundamental e argumentar, de pronto, que esse princípio é implicitamente admitido na linguagem comum e que é nessa linguagem que devemos nos expressar, mesmo que venhamos falar da eventual modificação da lógica que a rege. Seria, portanto, mergulhar na contradição, pretender descrever, na linguagem comum, um esquema lógico que a ela não se aplicasse. Todavia, como aponta Weizsäcker, pode- se distinguir diversos *níveis de linguagem.*

O primeiro deles refere-se a objetos, por exemplo, a átomos e elétrons. O segundo tem a ver com enunciados sobre objetos. O terceiro dirá respeito a enunciados acerca de enunciados sobre objetos e, assim, *ad infinitum.* Seria, então, possível se ter modos lógicos distintos para os diferentes níveis. Mas é verdade que, finalmente, teremos que retornar à linguagem comum e, em consequência, aos modos da lógica clássica. Weizsäcker, todavia, sugere que a lógica clássica possa ser um *a priori* da lógica quântica, da mesma maneira que a física clássica o é da teoria quântica. A lógica clássica estaria, assim, contida como alguma forma de caso limite da lógica quântica e, essa última, constituir-se-ia na tessitura lógica mais geral.

A possível modificação da lógica clássica, então, dirá respeito, em primeiro lugar, ao nível de pronunciamentos sobre objetos. Consideremos, por exemplo, um átomo movendo-se em uma caixa fechada que é dividida por uma parede em duas partes iguais. Suponhamos, também, que a parede

* N.T. Vide a respeito, Apêndice ao fim deste livro: "Da Abordagem de Garrett Birkhoff e John von Neumann".

divisória ostente um furo bem diminuto, mas que permita que o átomo passe de um lado para o outro. O átomo pode, então, de acordo com a lógica clássica, encontrar-se em uma das metades ou na outra. Não há uma terceira possibilidade: o princípio do terço excluído! Na teoria quântica, contudo, teremos que admitir - se quisermos fazer uso dos termos "átomo" e "caixa" - que ocorram outras possibilidades, misturas estranhas daquelas duas. Esse estado de coisas é necessário a fim de que se possa dar conta dos dados experimentais. Poder-se-ia, por exemplo, observar a luz espalhada pelo átomo. Três experiências poderiam então ser feitas: na primeira, o átomo encontra-se confinado à metade esquerda da caixa (por exemplo, fechou-se o furo na parede divisória) e mede-se a distribuição de intensidade da luz espalhada; na segunda, o átomo é confinado à porção direita e, de novo, a distribuição da luz espalhada é medida; finalmente, passa-se à situação em que o átomo se pode mover livremente através da caixa inteira e, novamente, se mede a distribuição da luz. Caso o átomo permanecesse sempre em uma divisão ou na outra, a distribuição de intensidade final seria uma mistura (de acordo com a fração de tempo despendida pelo átomo em cada uma dessas partes) das duas distribuições de intensidade anteriores. Isso, contudo, não é em geral experimentalmente verificado. A distribuição real é alterada pela "interferência das probabilidades", o que já discutimos anteriormente.

A fim de enfrentar tal situação, Weizsäcker introduziu o conceito de "grau de verdade". Para qualquer asserção simples, como no caso de uma alternativa como "o átomo está na divisão esquerda (ou na direita) da caixa", define-se um número complexo que dá a medida do seu "grau de verdade". Para o valor unidade, a assertiva é verdadeira e, para o valor nulo, ela é falsa. Outros valores são, contudo, possíveis. O valor absoluto daquele número complexo fornece a probabilidade de que a afirmação seja verdadeira; a soma das duas probabilidades associadas às duas partes, na alternativa - "direita" ou "esquerda", em nosso caso - é igual à unidade. Todavia, cada par de números complexos - que se refiram às duas possibilidades da alternativa - representa, de acordo com as definições de Weizsäcker, um "enunciado" que é certamente verdadeiro se os números tiverem exatamente esses valores; os dois números, por exemplo, serão suficientes para fixar a distribuição de intensidade da luz espalhada, em nossa experiência ideal. Se nos permitirmos, dessa maneira, o uso da palavra "enunciado", pode-se introduzir o termo "complementaridade" através da definição seguinte. Cada afirmação que não se identifique com nenhum dos dois enunciados alternativos - em nosso caso, com as assertivas "o átomo está na metade esquerda" ou "o átomo está na metade direita" – é dita ser complementar a esses enunciados. Para cada enunciado complementar, a questão de se o átomo está na porção direita ou esquerda não está decidida. Mas o qualificativo "não decidida" não deve ser entendido como significando "não conhecida". Isso pois, "não conhecida"

significaria uma situação diversa, em que o átomo, de fato, estaria à direita ou, então, à esquerda, a questão sendo, meramente, de não sabermos em qual. A qualificação "não decidida", por seu lado, diz respeito a uma situação diferente, somente expressável por um enunciado complementar.

Essa tessitura lógica, geral, cujos detalhes não podem ser apresentados aqui, corresponde precisamente ao formalismo matemático da teoria quântica. Essa estrutura lógica propicia as fundações de uma linguagem precisa que pode ser utilizada na descrição do átomo. A aplicação de uma tal linguagem, todavia, levanta alguns problemas difíceis e dois deles discutiremos aqui: a relação entre diferentes "níveis" de linguagem e suas consequências na ontologia subjacente.

Na lógica clássica, a relação entre diferentes níveis de linguagem é uma correspondência biunívoca. Os dois enunciados, "*O átomo está na metatade esquerda "* e *"é verdade que o átomo está na metade esquerda"* pertencem logicamente a níveis distintos. Em lógica clássica, todavia, eles são completamente equivalentes, isto é, os dois são verdadeiros ou então ambos são falsos. Não é possível que um seja falso e, o outro, verdadeiro. Contudo, no esquema lógico em que está presente a complementaridade, a relação (entre aqueles dois enunciados) torna-se mais complicada. Vejamos por quê. Para começar, a correção (ou incorreção) do primeiro deles ainda implica na correção (ou incorreção) do outro. A incorreção do segundo enunciado, todavia, não acarreta a incorreção do primeiro. Se o segundo for incorreto, fica em aberto se o átomo está, ou não, na metade esquerda: o átomo não precisa, necessariamente, estar na metade direita. Persiste, ainda, uma completa equivalência entre os dois níveis de linguagem, no exemplo citado, no que diz respeito à correção de um enunciado, mas não no que se refere à sua incorreção. Com base nesse tipo de inter-relação, pode-se entender a persistência das leis clássicas na teoria quântica: toda vez que o resultado de uma experimentação puder ser obtido pela aplicação de leis da física clássica, o resultado poderá, igualmente, ser deduzido da teoria quântica; e será confirmado experimentalmente.

O objetivo final dessa tentativa, empreendida por Weizsäcker, é aplicar também esses modos lógicos modificados a níveis mais altos da linguagem, questões que, todavia, não podem ser discutidas aqui.

O outro problema diz respeito à ontologia subjacente aos modos lógicos modificados. Se o par de números complexos representa um "enunciado", no sentido acima visto, deveria existir um "estado" ou uma "situação", na Natureza, na qual aquele enunciado seria correto. Nós usaremos a palavra "estado" nesse contexto. Os "estados" que correspondem a enunciados complementares, Weizsäcker os chama de "estados coexistentes". O termo "coexistente" descreve a situação corretamente: seria de fato difícil denominá-los "estados diferentes", isso pois cada estado contém, em algum grau, também os outros "estados coexistentes". Esse conceito de estado constituir-se-ia, então, na primeira definição que

diria respeito à ontologia da teoria quântica. Vê-se, de pronto, que esse uso da palavra "estado" (que adornamos com aspas) e, particularmente, da expressão "estado coexistente", é tão diferente da ontologia materialista usual que se pode pôr em dúvida o acerto dessa terminologia. Por outro lado, se considerarmos a palavra "estado" como descrevendo mais propriamente uma "potencialidade" do que uma "realidade" (poderíamos mesmo, sem mais nem menos, substituir "estado" por "potencialidade") torna-se bastante plausível o conceito de "potencialidades coexistentes", pois uma potencialidade pode superpor-se a outras potencialidades; em outras palavras, potencialidades distintas podem ter algo em comum.

Poderemos evitar todas essas diferentes definições e distinções, se restringirmos a linguagem à descrição de fatos, isto é, aos dados experimentais. Se, todavia, quisermos falar alguma coisa acerca das próprias partículas atômicas, deveremos utilizar o esquema matemático da teoria quântica (o único suplemento da linguagem natural) ou, então, combiná-lo com uma linguagem que faça uso da lógica modificada ou, mesmo, que não utilize nenhuma lógica bem definida. Nas experimentações com fenômenos atômicos, temos que lidar com coisas e fatos, com fenômenos que são tão reais quanto aqueles da vida quotidiana. Mas os próprios átomos e partículas elementares não exibem o mesmo tipo de realidade: eles dão lugar a um universo de potencialidades ou possibilidades ao invés de um mundo de coisas e fatos.

Capítulo XI

O PAPEL DA FÍSICA MODERNA NA EVOLUÇÃO ATUAL DO PENSAMENTO HUMANO

Nos capítulos precedentes, discutimos as implicações filosóficas da física moderna a fim de poder mostrar que esse ramo - o mais moderno da ciência natural – tangencia, em muitos pontos, velhas tendências do pensamento humano e que ele aborda, sob um novo ângulo, problemas muito antigos que o passado revelou. Sob um ponto de vista bastante geral, é provavelmente verdadeiro que, na história do pensamento humano, os desenvolvimentos mais fecundos frequentemente tiveram lugar naqueles pontos onde ocorreram convergências de duas linhas de pensamento distintas. Essas linhas talvez tenham tido suas raízes em setores bem diversos da cultura humana, em épocas distintas, em ambiências culturais e religiosas diferentes. Sendo assim, se essas linhas de fato se encontram em muitos pontos, isto é, se elas têm tanto em comum que possam dar lugar a uma interação real, pode-se então nutrir a esperança de que desenvolvimentos novos e interessantes venham a ocorrer. Falando do *nosso tempo,* pode-se afirmar que a física atômica, entre outros ramos da ciência moderna, tem de fato penetrado em sociedades com tradições culturais bastante diversas. Ela tem sido cultivada não somente na Europa e em países ocidentais, onde faz parte da atividade tradicional, nas ciências naturais, mas também no Oriente Próximo e em países como o Japão, China e Índia – com passados culturais bem distintos -e na Rússia, onde se estabeleceu um novo modo de pensar: uma nova maneira relacionada, em parte, a desenvolvimentos específicos da ciência na Europa do século XIX, como também a tradições inteiramente diferentes das da própria Rússia. Certamente, a discussão que faremos a seguir não será devotada à revelação de prognósticos sobre o resultado provável do encontro entre as ideias da física moderna e as tradições mais antigas, ainda vigentes. Mesmo assim, talvez se mostre possível definir-se pontos de convergência onde a interação entre ideias diversas venha a ocorrer.

Ao se considerar esse processo de expansão da física moderna, parece claro que não seria possível separá-la da penetração mais ampla da ciência natural, da indústria e engenharia, da medicina e de outras

atividades correlatas e, portanto, falando-se bem geralmente, não se pode divorciá-la da civilização dos nossos tempos, em todos os rincões do mundo. A física moderna é tão-somente um elo de uma longa cadeia de acontecimentos que foram se concatenando a partir de Roger Bacon, Galileu Galilei e Johannes Kepler, e reforçada pela aplicação prática da ciência natural nos séculos XVII e XVIII. A relação entre ciência natural e ciência aplicada foi, desde o começo, uma de colaboração mútua: os progressos da ciência aplicada - aperfeiçoamento do ferramental, invenção de novos equipamentos especializados - calçaram o caminho para a busca de um conhecimento empírico da Natureza, a cada passo mais preciso. E o progresso na compreensão da Natureza e, por fim, a formulação matemática das leis naturais, vieram propiciar novas técnicas - com base nos conhecimentos adquiridos - à ciência aplicada. Assim, por exemplo, a invenção do telescópio habilitou os astrônomos a medir o movimento das estrelas com precisão maior do que outrora. E, em consequência, fez-se possível um progresso considerável em astronomia e mecânica. Por outro lado, o conhecimento preciso das leis da mecânica foi do mais alto valor para o aperfeiçoamento de instrumentos mecânicos, construção de máquinas e assim por diante. A expansão ponderável dessa aliança da ciência à técnica ocorreu quando se soube pôr, à disposição do homem, algumas das forças da Natureza. A energia armazenada no carvão, por exemplo, podia ser utilizada para realizar parte do trabalho que o homem tinha que fazer. As indústrias que surgiram, graças a essas novas possibilidades, podiam, no começo, ser encaradas como uma continuação natural e expansão de velhos ofícios: em muitos casos, o trabalho das máquinas ainda lembrava as antigas manufaturas artesanais, enquanto que as indústrias químicas assemelhavam-se às tinturarias e farmácias do passado. O futuro, todavia, trouxe consigo o desenvolvimento de ramos inteiramente novos da indústria, que não encontravam correspondência nos ofícios de outrora: por exemplo, a engenharia elétrica. Ora bem: foi a penetração da ciência, nos domínios mais recônditos da Natureza, que veio permitir aos engenheiros a utilização de forças naturais que o passado mal conhecera; aqui, o conhecimento preciso dessas forças, em termos de uma formulação matemática das leis que as governam, veio propiciar base sólida para a construção de todo tipo de maquinário.

O enorme sucesso dessa associação, entre ciência básica e ciência aplicada, trouxe, em sua esteira, uma forte preponderância daquelas nações, estados e comunidades nas quais esse tipo de atividade humana tivera seu desenvolvimento maior. E, como consequência direta disso, esse gênero de atividade teve que ser assumido mesmo por países que, por tradição, não se sentiam naturalmente inclinados à vivência científica e técnica. Os modernos meios de comunicação e do comércio internacional acabaram, finalmente, por completar esse processo expansionista da civilização tecnológica. Sem sombra de dúvida, esse processo alterou

fundamentalmente as condições de vida neste planeta. E aprovêmo-lo ou não, quer o classifiquemos de progresso ou de involução, temos que compreender que ele já ultrapassou o ponto de retomo, escapando de qualquer tipo de controle humano. Poderemos, de certo modo, encará-lo como um processo biológico, em escala mundial, pelo qual estruturas ativas do organismo humano estabelecem-se, gradual e imperceptivelmente, sobre vastas porções de matéria e as transformam, a seu jeito, naquela condição que convém à crescente população humana.

A física moderna esteve presente nas etapas mais recentes desse desenvolvimento e sua façanha mais notória, a invenção das armas nucleares, revelou a essência desse tipo de evolução, da maneira, infelizmente, mais luminosa possível. Por um lado, essa sorte de desenvolvimento demonstrou, mui claramente, que as mudanças, ocorridas em consequência da aliança entre ciência e técnica, não podem somente ser encaradas de um ponto de vista otimista, o que justifica - pelo menos em parte - as posições assumidas por aqueles que, reiteradamente, levantaram seu brado de alerta contra os perigos dessa transformação radical de nossas condições naturais de vida. Por outro lado, mesmo as nações e indivíduos que procuraram se afastar desses perigos viram-se compelidos a manter sob estreita observação esses novos desenvolvimentos pois, obviamente, o predomínio político - em sua acepção militar - tem por base a posse de armas nucleares. Bem, é claro que, entre as tarefas deste livro, não se pode incluir uma discussão pormenorizada das implicações políticas da física nuclear. Mas, mesmo assim, podemos dizer umas poucas palavras acerca desses problemas pois eles são os primeiros a ser evocados no espírito dos leigos quando se menciona a física nuclear.

É evidente que a invenção dessas novas armas, especialmente as termonucleares, deu lugar a uma mudança fundamental na estrutura política do mundo. Não somente o conceito de nação independente, isto é, de Estado, passou por uma transformação decisiva, isso pelo fato de que qualquer nação que não esteja de posse dessas armas terá que depender, de alguma maneira, daqueles poucos países aptos a produzir os artefatos de guerra nuclear em vastas quantidades; mas ao mesmo tempo, também, uma escalada bélica, em larga escala, regada a bombas nucleares, tornou- se, praticamente, um tipo absurdo de suicídio. Eis por que se ouve, frequentemente, o ponto de vista bem otimista de que a guerra tornou-se inviável, que ela não ocorrerá de novo. Desgraçadamente, essa posição é demasiadamente otimista e simplória. Bem ao contrário, o absurdo de uma conflagração bélica, ao nível nuclear, pode, em primeira aproximação, constituir-se em incentivo para guerras localizadas, vale dizer, em pequena escala. Qualquer nação ou grupo político que esteja convencido de seus direitos históricos e morais, ao ponto de querer impor uma alteração no *status quo* poderá tomar como certo que o uso de armas convencionais, na consecução de seus objetivos, não envolverá maiores riscos; poderá supor

que o outro lado certamente não recorrerá a armas nucleares pois, evidentemente, esses inimigos - pelo fato de estarem nesse conflito incipiente, histórica e moralmente errados - não se arriscarão a um confronto em larga escala. Tal situação poderia, por outro lado, induzir outras nações a declarar que, no caso de ameaça iminente de violação de seus territórios, elas fariam uso de seu arsenal nuclear; e, assim, o perigo claramente subsistirá. Poderá bem ocorrer que, daqui há vinte ou trinta anos, o mundo em que vivemos venha a passar por mudanças tão grandes que o risco de uma conflagração em grande escala, com o emprego de todos os recursos bélicos de aniquilação que a tecnologia propicia, diminua consideravelmente ou, mesmo, desapareça. Todavia, esse novo caminho, que parece conduzir a esse novo estado de coisas, deverá ser palmilhado com a maior cautela. Aqui, devemos compreender que, como em todas as épocas passadas, o que é visto por um dos lados como histórica e moralmente justo, poderá para o outro parecer totalmente inaceitável. A manutenção do *status quo* nem sempre será a solução acertada; ao contrário, bem pode ser que seja muito mais importante a descoberta de meios pacíficos que permitam um ajustamento adequado às novas situações, enquanto que, em muitos casos, poderá ser extremamente difícil chegar-se a qualquer solução feliz. Assim, talvez não seja demasiadamente pessimista dizer-se que uma nova "grande guerra" somente poderá ser evitada se todos os diferentes grupos políticos estiverem prontos a renunciar a alguns de seus direitos mais óbvios em que, aparentemente, acreditam; isso, em vista do fato de que a velha questão do certo e errado poderá parecer essencialmente diversa quando julgada no referencial do outro grupo. Esse ponto de vista não é, certamente, novo; ele, de fato, nada mais é que uma aplicação daquela atitude humana que foi ensinada, através de muitos séculos, por algumas das grandes religiões.

A invenção das armas nucleares levantou, também, problemas inteiramente novos para a ciência e os cientistas. A influência política da ciência tornou-se consideravelmente mais forte do que jamais fora antes da segunda guerra mundial e esse fato fez com que pesasse sobre o cientista, em particular o físico nuclear, uma dupla responsabilidade. Ele poderá assumir ativamente uma posição administrativa em seu país, em conse- qüência da importância social da ciência: ele terá, eventualmente, que assumir responsabilidades frente a decisões da maior importância que ultrapassam de muito as de seu pequeno círculo universitário ao qual se acostumara. Por outro lado, poderá ele, voluntariamente, recusar-se a participar de decisões políticas: mesmo assim, ainda será responsável pelas soluções erradas que, possivelmente, poderia ter evitado, caso não tivesse se refugiado na sua vida serena de cientista. Obviamente, assim nos parece, é dever dos cientistas informar seus governos, em detalhe, sobre a destruição sem precedente que ocorreria em uma guerra que utilizasse armas termonucleares. Além disso, são os cientistas frequentemente

solicitados a subscrever resoluções solenes em favor da paz mundial; mas, a esse respeito, devo confessar que jamais pude ver qualquer utilidade em declarações desse tipo. Tais resoluções podem parecer um gesto bem-vindo de boa vontade. Todavia, quem quiser falar em favor da paz, sem enunciar precisamente as condições que devam lastreá-la, fica de pronto suspeito de advogar uma paz que será vantajosa ao grupo a que pertence: o que, de fato, esvaziaria seu propósito de qualquer mérito. Qualquer declaração honesta pela paz deve enumerar todos os sacrifícios que estamos dispostos a fazer a fim de preservá-la. Mas, em geral, os cientistas não têm autoridade bastante para fazer tais declarações.

Mas, ao mesmo tempo, o cientista pode fazer o melhor a fim de promover uma cooperação internacional em seu próprio campo de trabalho. A grande importância que muitos governos dão à pesquisa em física nuclear, na atualidade, e o fato de que o nível do trabalho científico mostra muita disparidade, entre diferentes países, favorece a colaboração internacional nesse domínio. Jovens cientistas, de muitos países, poderiam ter a possibilidade de se reunir em instituições de pesquisa, onde se fizesse presente uma atividade vigorosa no campo da física moderna, o trabalho em comum - na solução de problemas complexos - promovendo mútuo entendimento. Em um caso preciso, o do CERN*, vários países da Europa chegaram a um acordo para a edificação de um laboratório comum e para a construção, em um esforço combinado, de custosos equipamentos experimentais, para a pesquisa nuclear. Essa modalidade de cooperação, certamente, propiciará o estabelecimento, entre os cientistas da geração mais jovem, de uma atitude conjunta no que diz respeito aos problemas da ciência, atitude também conjunta em questões outras que as científicas. É difícil prever o que germinará dessas sementes que assim foram semeadas, quando esses cientistas retornarem a seus recantos, voltando novamente a compartilhar das suas tradições culturais. Todavia, dificilmente poder-se-á pôr em dúvida que a troca de ideias entre jovens cientistas de diferentes países (como também entre aqueles de gerações diversas em cada país) ajudará a abordar, sem tensões excessivas, o novo estado de coisas, no qual um certo equilíbrio é alcançado entre as forças tradicionais mais antigas e as necessidades inevitáveis da vida moderna. Há uma característica da ciência que a torna mais apropriada do que qualquer outra atividade para criar a primeira ligação sólida entre tradições culturais diferentes. Esse atributo reside no fato de que as decisões últimas, acerca do valor de um determinado trabalho científico, sobre o que está correto ou incorreto no trabalho em questão, não dependem de qualquer autoridade humana. Pode, às vezes, ocorrer que muitos anos se passem até que se conheça a

* N.T. Laboratório europeu, *Conseil Européen pour la Recherche Nucleáire,* mais conhecido por sua sigla: CERN. A respeito, veja-se o Apêndice correspondente ao fim deste livro.

solução de um problema, antes que se possa distinguir entre verdade e erro; mas, em definitivo, as questões decidir-se-ão e as decisões, a esse respeito, não serão tomadas por um grupo qualquer de cientistas mas sim pela própria Natureza. Eis por que as ideias científicas se disseminam entre aqueles que se interessam pela ciência de uma maneira que difere inteiramente da propagação das ideias políticas.

Enquanto as ideias políticas podem adquirir uma grande influência, entre as massas populares, simplesmente porque essas ideias correspondem ou pareçam corresponder aos interesses primordiais do povo, as ideias científicas difundir-se-ão somente pelo fato de serem verdadeiras.

Tudo que aqui foi dito sobre a cooperação internacional e troca de ideias aplica-se integralmente a qualquer domínio da física moderna, de forma alguma se confinando à física nuclear. A esse respeito, a física moderna é tão-somente um dos muitos ramos da ciência e mesmo que suas aplicações técnicas - as armas e a utilização pacífica da energia nuclear – lhe dêem um peso especial, não há razão alguma para se considerar a cooperação internacional, nesse ramo da ciência, como sendo muito mais importante que qualquer outro. Mas é necessário que discutamos, novamente, acerca das características da física moderna que diferem de forma essencial daquelas presentes no desenvolvimento anterior da ciência natural. E, com esse objetivo em vista, temos que retornar, ainda mais uma vez, à história européia desse desenvolvimento que teve lugar pela combinação da ciência e técnica.

Tem sido frequentemente discutida, entre historiadores, a seguinte questão: foi o progresso da ciência, após o século XVI, de alguma maneira uma consequência natural de tendências pregressas do pensamento humano? Pode-se argumentar, a respeito, que certas tendências presentes na filosofia cristã conduziram a uma concepção muito abstrata de Deus, colocando Deus tão alto acima do mundo que, em consequência, se adotou a atitude de considerá-Lo em Sua ausência, como se Ele não pertencesse a este mundo; e que a partição cartesiana pode ser vista como o estágio final desse desenvolvimento. Poder-se-ia, por outro lado, observar que todas as controvérsias teológicas, que ocorreram no século XVI, deram lugar a um descontentamento generalizado a respeito de questões que, realmente, não podiam ser decididas pela razão, disputas que ficavam expostas às lutas políticas da época; e que essa dissatisfação veio estimular o interesse sobre problemas que nada tinham a ver com as controvérsias teológicas. Também se poderia simplesmente se referir à ampla atividade, ao novo espírito que se fazia presente nas sociedades européias da Renascença. De uma maneira ou de outra, uma nova autoridade fazia sua aparição – ela completamente independente da religião, filosofia cristã e da Igreja - a saber, aquela da experimentação, do fato empírico. Pode-se traçar a origem dessa autoridade a velhas tendências filosóficas presentes, por exemplo, na

filosofia de William of Ockham* e Duns Scotus**, mas ela tornou-se uma força propulsora da atividade humana somente do século XVI em diante. Galileu não se satisfizera em somente *pensar* acerca de movimentos mecânicos, sobre o pêndulo e a pedra que cai: ele procurou ver, por experimentações, quantitativamente, como esses movimentos ocorriam. Essa nova atividade de testar a Natureza não teve certamente, em seus começos, a intenção de propiciar um desvio dos dogmas da religião cristã tradicional. Ao contrário, falava-se de duas modalidades de revelação de Deus: uma estava inscrita na Bíblia e a outra encontrava-se no livro da Natureza. As Santas Escrituras foram escritas pelo homem e, assim, estavam sujeitas a erro, enquanto que a Natureza era a expressão direta das intenções divinas.

Mas a ênfase atribuída à experiência não estava desligada de uma lenta e gradual modificação no que diz respeito ao conceito de realidade. Aquilo que, atualmente, chamamos de sentido simbólico das coisas, era, na Idade Média, de alguma maneira, a realidade primeira. E, naqueles tempos, o aspecto de realidade evoluiu para aquele que podemos perceber através de nossos sentidos. Aquilo que vemos e tocamos tornou-se a realidade primordial. E essa nova concepção de Realidade podia ser relacionada com uma nova atividade, a saber, podemos fazer nossas experimentações e ver como as coisas de fato *são*. A esse respeito, percebeu-se facilmente que essa nova atitude significava a passagem do espírito humano a um domínio imenso, repleto de novas possibilidades. E é, portanto, bastante inteligível que a Igreja de Roma tenha visto, nesse novo movimento de ideias, mais perigos que esperanças. O famoso processo contra Galileu Galilei, a propósito de seus pontos de vista sobre o sistema de Copérnico, marcou o começo de um conflito que perdurou por mais de um século. Nessa controvérsia, os adeptos da ciência natural podiam argumentar que as experimentações revelam uma verdade inegável; que não se pode admitir que qualquer autoridade humana arrogue-se o direito de decidir o que realmente ocorre na Natureza e que a decisão final a respeito caberá a ela e, nesse sentido, a Deus. Os representantes da religião tradicional, por seu lado, poderiam argumentar que, ao se dar tanta importância ao mundo material, àquilo que percebemos através dos nossos sentidos, corremos o risco de perder o contato com os valores essenciais da vida humana, justamente com aquela fração da realidade que se encontra além do mundo tangível. Os dois argumentos não admitiam convergência alguma e, assim, a questão não podia ser resolvida por qualquer tipo de acordo ou decisão.

Enquanto isso, a ciência natural procurou encontrar uma imagem mais ampla e clara do mundo material. Em física, essa imagem era para

* N.T. W. of Ockham, filósofo inglês (1300?–?1349); ver Apêndice ao fim deste volume.

** N.T. John Duns Scotus, teólogo escolástico escocês (1265?–1308?).

ser descrita em termos de conceitos que, atualmente, denominamos de conceitos da física clássica. O mundo consistiria de coisas distribuídas no espaço e tempo, as coisas consistindo de matéria e a matéria podendo dar lugar a forças e, também, sofrer sua ação. Os fenômenos decorreriam da interação entre matéria e forças, cada ocorrência sendo resultado e causa de outros eventos. Ao mesmo tempo, a atitude humana no que diz respeito à Natureza passou do contemplativo ao pragmático. Com efeito, não havia grande interesse pela Natureza como ela é; em lugar disso, perguntava-se o que se poderia fazer com ela. Assim, a ciência natural tornou-se uma ciência técnica: qualquer nova descoberta era vinculada, de pronto, à sua praticidade. Isso não se confinava à física somente, pois em química e biologia a atitude assumida foi essencialmente a mesma. E o sucesso dos novos métodos em medicina e na agricultura contribuiu de forma essencial à difusão das novas tendências.

Dessa maneira chegou-se, por fim, ao século XIX, durante o qual criou-se, para a ciência natural, uma moldura extremamente rígida, que veio dar forma não somente à ciência como também à mentalidade das grandes massas populares. Esse confinamento era mantido pelos conceitos fundamentais da física clássica: espaço, tempo, matéria e causalidade; aqui, o conceito de realidade dizia respeito a coisas e fenômenos que percebemos pelos nossos sentidos ou, então, àqueles que podemos observar graças à disponibilidade de instrumentos refinados que a ciência técnica veio propiciar. Chegamos, assim, ao primado da matéria: esta, a realidade primeira. O progresso da ciência foi encarado como uma cruzada aos domínios do mundo material. E *utilidade* a senha da época.

Por outro lado, essa moldura era de tal forma estreita e rígida que era difícil encontrar-se lugar, nessa delimitação abusiva, para muitos conceitos, de nossa linguagem comum, que sempre pertenceram à essência de sua substância; exemplificando: os conceitos de mente, alma e vida. A mente só poderia comparecer, na descrição geral, como um tipo de espelho do mundo material. E, quando estudavam os atributos desse espelho, na ciência da psicologia, os cientistas sempre padeceram da tentação - se eu puder levar avante essa comparação - de dar atenção às propriedades mecânicas às expensas das óticas. Mesmo aí, tentava-se aplicar os conceitos da física clássica, em primeiro lugar o de causalidade. Similarmente, a vida teria que ser entendida como um processo físico-químico, governado por leis naturais e completamente determinado pela causalidade. O conceito de evolução, devido a Darwin, fornece ampla evidência em apoio a essa interpretação. Particularmente difícil era encontrar-se, nesse arcabouço, lugar para aquelas frações de realidade que tinham sido objeto da religião tradicional e que, agora, pareciam mais ou menos pura imaginação. Assim, portanto, naquelas nações européias onde havia uma

predisposição de levar-se as ideias às suas últimas consequências desenvolveu-se uma hostilidade declarada da ciência contra a religião e, mesmo em outros países, ocorreu uma tendência, cada vez mais pronunciada, de indiferença sobre tais questões; dessa tendência, excluíram-se tão- somente os valores éticos da religião cristã, pelo menos temporariamente. A confiança no método científico e no pensamento racional substituíram todas as outras salvaguardas do espírito humano.

Retornando às contribuições da física moderna, pode-se dizer que a mudança mais importante que ocorreu, como consequência de suas descobertas, consistiu na dissolução desse esquema rígido de conceitos da ciência do século XIX. É claro que muitas tentativas tinham sido feitas antes do advento da física moderna, a fim de se sair desse esquema que, obviamente, por ser demasiadamente estreito, não viria propiciar um entendimento das partes essenciais da Realidade. Mas não era tarefa fácil se perceber o que estaria errado em conceitos fundamentais como matéria, espaço, tempo e causalidade, conceitos que tinham se mostrado extremamente bem-sucedidos através da história da ciência. Ora, somente a pesquisa experimental (através da utilização de equipamentos que a tecnologia poderia oferecer) e sua interpretação matemática teriam como prover a base para uma análise crítica - ou talvez se possa dizer que forçaram essa análise crítica - desses conceitos, o que trouxe como resultado a dissolução daquele esquema rígido.

Essa ruptura ocorreu em dois estágios distintos. O primeiro foi a descoberta feita na teoria da relatividade que mesmo conceitos fundamentais, como espaço e tempo poderiam ser modificados e, de fato, tinham mesmo que mudar, à luz das novas experimentações. Essa mudança não dizia respeito aos conceitos, um tanto vagos, de espaço e tempo presentes na linguagem comum; mas se referia, isso sim, a suas formulações exatas na linguagem precisa da mecânica newtoniana que, erroneamente, tinham sido aceitas como finais. O segundo estágio consistiu na discussão a respeito do conceito de matéria, que foi imposta por resultados experimentais acerca da estrutura atômica. A ideia da realidade da matéria foi provavelmente a componente mais forte naquele esquema rígido de conceitos que o século XIX nos legou; e essa ideia tinha, pelo menos, que ser modificada ante as novas evidências experimentais. E, como soe acontecer, os conceitos - na medida em que pertenciam à linguagem comum - permaneceram intactos. Não havia dificuldade alguma em se falar sobre a matéria ou acerca de fatos ou sobre a Realidade quando se descrevia as experimentações atômicas e seus resultados. Todavia, a extrapolação científica desses conceitos aos domínios mais recônditos da matéria não poderia se realizar da maneira singela sugerida pela física clássica, embora esta última tivesse determinado, aliás erroneamente, os pontos de vista gerais no que toca ao problema da matéria.

Esses novos resultados tinham, antes de mais nada, que ser considerados como um aviso muito sério contra a aplicação, um tanto forçada, de conceitos científicos a domínios em que eles nada tinham que dizer. Assim, por exemplo, a utilização de conceitos da física clássica, digamos, na química, foi um passo em falso. A lembrança dessas coisas passadas faz- nos, na atualidade, mais relutantes em admitir que os conceitos da física, mesmo aqueles da teoria quântica, possam com certeza ser aplicados na biologia ou em qualquer outro ramo da ciência natural. Nós, ao contrário, tentaremos manter as portas abertas à aparição de novos conceitos, mesmo naqueles domínios da ciência onde os conceitos anteriores vicejaram, propiciando o entendimento dos fenômenos pesquisados. Em particular, naquelas instâncias onde a utilização de antigos conceitos pareça um tanto forçada ou, mesmo, não completamente adequada ao problema abordado, tentaremos evitar qualquer conclusão apressada.

Além disso, uma das características mais importantes do desenvolvimento e análise da física moderna é a experiência a demonstrar que os conceitos da linguagem quotidiana, mesmo imprecisamente definidos como eles são, parecem exibir uma estabilidade maior na expansão do conhecimento que os termos precisos que a linguagem científica ostenta, decorrência de uma idealização a partir somente de grupos limitados de fenômenos. Isso, por si só, não é motivo para surpresa, pois os conceitos da linguagem natural são cunhados pela associação direta com a realidade: eles representam a Realidade. É bem verdade que eles não são bem definidos e podem, também, passar por transformações no correr dos séculos, da mesma forma que ocorre com o conceito de realidade; eles, todavia, jamais perderam sua ligação direta com a Realidade que espelhavam. Por seu lado, os conceitos científicos são idealizações; derivam eles de experimentações realizadas a custas de instrumentações refinadas e são precisados com base em axiomas e definições. Tão-somente através dessas definições precisas, torna-se viável ligar-se os conceitos a símbolos matemáticos e derivar-se, matematicamente, a variedade infinita de fenômenos possíveis no campo estudado. Todavia, através desse processo de idealizações e definições precisas, perde-se a ligação direta com a Realidade. Os conceitos ainda correspondem bem de perto à Realidade, naquele setor da Natureza que foi objeto da pesquisa. Mas pode-se perder a correspondência em outros setores que digam respeito a outros grupos de fenômenos.

Mantendo-se em mente a estabilidade intrínseca dos conceitos da linguagem natural, no processo do desenvolvimento científico, pode-se ver - pelos ensinamentos que a vivência da teoria quântica veio proporcionar - que nossa atitude frente a conceitos como espírito (mente), alma, vida ou Deus irá por força diferir da que prevaleceu no século XIX, pois esses conceitos pertencem à linguagem comum e, portanto, estão ligados diretamente à Realidade. É também verdade que iremos perceber que esses

conceitos não são bem definidos, no sentido científico, e que sua utilização pode levar a contradições diversas e que, enquanto isso, temos que aceitá- los em sua vagueza; mesmo assim, sabemos que eles tocam a Realidade. Talvez seja útil, nessa conexão, lembrar-nos que, mesmo na matemática, a mais exata das ciências, não podemos nos furtar ao uso de conceitos que envolvam contradições. Assim, por exemplo, é bem sabido que o conceito de *infinito* conduz a contradições que foram analisadas no passado, mas seria praticamente impossível construir-se as partes centrais da matemática na ausência desse conceito.

A tendência geral do pensamento humano, no século XIX, foi na direção de uma confiança crescente no método científico e no uso de termos racionais precisos, o que deu lugar a um ceticismo acerca daqueles conceitos da linguagem natural que não se encaixassem no esquema fechado do pensamento científico da época - por exemplo, aqueles da religião. A física moderna, de muitas maneiras, veio reforçar essa atitude cética; mas ela, ao mesmo tempo, endereçou-a contra a superestimação dos conceitos considerados precisos e, também, contra o próprio ceticismo. A atitude dubitativa, frente aos conceitos científicos precisos, não significa que se deva impor uma limitação exata a disciplinar o pensamento racional. Ao contrário, parece correto dizer-se que a habilidade humana de compreensão seja - em um certo sentido - ilimitada. Todavia, os conceitos científicos existentes sempre se espraiam somente por uma parte limitada da Realidade, enquanto a outra parte que não foi entendida é, por assim dizer, infinita. Sempre que procurarmos passar do conhecido ao desconhecido (que nutrimos a esperança de entender) poderemos ser obrigados, ao mesmo tempo, a atribuir um novo sentido à palavra “entender”. Sabemos que todo entendimento deve, em última consequência , basear-se na linguagem comum, pois é somente através dela que estaremos seguros de tocar a Realidade. E, assim, deveremos ser céticos a respeito de qualquer tipo de ceticismo acerca dessa linguagem natural e dos conceitos essenciais que ela revela. Portanto, deles poderemos fazer uso, o que outrora também ocorreu. Dessa maneira, a física moderna tenha, talvez, aberto a porta, possibilitando assim uma visão mais ampla sobre a relação entre mente humana e realidade.

Essa ciência moderna pode, então, penetrar - em nossos tempos - em outras regiões deste planeta, onde as tradições culturais tinham sido extensamente distintas daquelas da civilização européia. Naquelas regiões, o impacto dessa nova atividade científica e técnica deve fazer-se sentir ainda mais fortemente que na Europa, pois mudanças nas condições de vida que exigiram dois ou três séculos, entre os europeus, nelas ocorrerão dentro de umas poucas décadas. Poder-se-ia esperar que, em muitos lugares, essa nova atividade pudesse parecer um declínio das tradições que o passado legou: uma atitude bárbara e impiedosa que abala o equilíbrio delicado no qual repousa toda felicidade humana. Não há como fugir de tais conseqüên-

cias: elas precisam ser aceitas como um sinal do tempo. Mas, mesmo assim, a abertura da física moderna poderá propiciar, em certa medida, a reconciliação entre as tradições passadas e as novas linhas de pensamento. Por exemplo, a grande contribuição que o Japão trouxe no campo da física teórica, desde a última guerra, talvez possa ser vista como uma indicação de um certo relacionamento entre as ideias filosóficas da tradição do Extremo Oriente e o conteúdo filosófico da teoria quântica. É possível que seja mais fácil adaptar-se ao conceito quântico de realidade quando não se viveu o modo ingênuo do pensamento materialista, que ainda prevalecia na Europa nas primeiras décadas deste século.

É claro que essas observações não devem ser entendidas como uma subestimação dos danos que possam ser feitos ou que, de fato, foram feitos às antigas tradições culturais, como resultado do progresso tecnológico. Todavia, levando-se em conta que esse processo já há muito escapou a qualquer controle das forças humanas, devemos aceitá-lo como uma das características mais essenciais de nossos tempos, e, em consequência, deveremos procurar relacioná-lo com as concepções culturais e religiosas anteriores. Talvez o leitor me permita, neste ponto, contar uma pequena estória legada pela religião hasídica*. Era uma vez um rabino, famoso por sua sabedoria, a quem todos procuravam na necessidade de um conselho. Um dia um homem visitou-o, desesperado com todas as mudanças que ocorriam à sua volta, especialmente pelos males que sobrevinham do progresso técnico. “Todas essas coisas técnicas não prestam para nada, quando se considera os reais valores da vida, não é verdade?” perguntou o visitante. “Pode ser que assim seja”, respondeu o rabino, “mas quem souber adotar a atitude correta, poderá aprender de qualquer situação”. “Não”, retrucou a visita, “nada se pode aprender de coisas tolas como estradas de ferro, telefones ou telégrafos”. Mas o rabino persistiu: “Você está enganado. Uma ferrovia poderá ensinar-lhe que uns poucos segundos de atraso poderão pôr tudo a perder. O telégrafo poderá fazer-lhe entender que cada palavra conta e o telefone, que tudo o que falamos será ouvido em outro lugar”. O visitante compreendeu o sentido da lição e se foi.

Enfim, a ciência moderna penetra por aquelas grandes regiões do mundo de hoje onde as novas doutrinas se estabeleceram há somente umas poucas décadas, lastreando novas e poderosas sociedades. Lá, a ciência moderna entra em confronto tanto com as doutrinas que remontam a ideias filosóficas européias do século XIX (Hegel e Marx), como também com o fenômeno da crença inflexível. Considerando-se que a física moderna deverá ter um papel fundamental nesses países, devido à extensa gama de suas aplicações práticas, é difícil se evitar que a estreiteza dessas doutrinas seja sentida por aqueles que realmente entenderam a física moderna e seu

* N.T. Martin Buber: *Histórias do Rabi* (Editora Perspectiva, São Paulo, 1967).

significado filosófico. Em consequência, poderá ocorrer uma interação entre a ciência e os modos de pensar vigentes. É claro que não se deve exagerar o peso da ciência na sociedade; mas pode ser que a abertura da ciência moderna venha tornar mais fácil, mesmo para grupos numerosos de pessoas, o entendimento de que as doutrinas não são, possivelmente, tão importantes para a sociedade como outrora se presumira. Dessa maneira, a ciência moderna poderá propiciar uma atitude de tolerância e, assim, mostrar-se valiosa.

Por outro lado, o fenômeno das crenças inflexíveis leva muito mais peso que algumas das noções filosóficas especiais do século passado. Não podemos fechar os olhos ao fato de que a grande maioria das pessoas dificilmente dispõem de meios que lhes facultem julgamentos judiciosos a respeito da correção de certas ideias gerais importantes ou doutrinas. Assim, portanto, a palavra "crença" não significará, para essa maioria, "perceber a verdade de alguma coisa", mas será entendida como "aceitar- se isso como base de vida". Pode-se facilmente compreender que essa segunda modalidade de crença é muito mais firme, consideravelmente mais irredutível que a primeira, podendo persistir mesmo em face a evidências experimentais diretas em contrário e, assim, não poderá ser sacudida por novos conhecimentos científicos. A história das duas últimas décadas mostrou, por muitos exemplos, que essa segunda espécie de crença pode às vezes ser mantida até o absurdo e que somente desaparecerá com a morte do crente. Ciência e história ensinam-nos que esse tipo de crença pode trazer graves perigos para os que por ele optarem. Mas esse fato nada traz de prático, pois não se pode prever como evitar os perigos e, assim, essa modalidade de crença sempre esteve presente nas grandes correntes da história da humanidade. Se tomássemos por base a tradição científica do século XIX, certamente estaríamos propensos a nutrir a esperança de que toda crença devesse lastrear-se na análise racional de todo argumento apresentado, em seu exame criterioso. E, em consequência, essa crença que queima, na qual algumas verdades, reais ou aparentes, são tomadas como roteiro de vida, não teria como existir. É bem verdade que um levantamento cuidadoso, baseado em argumentos puramente racionais, pode salvar-nos de muitos enganos e perigos, pois essa análise permite reajustamentos a novas situações e isso parece ser uma condição necessária em nossa existência. Se relembrarmos nossa experiência em física moderna, é fácil perceber-se que deve sempre haver uma relação fundamental de complementaridade entre as atitudes deliberativa e decisória. Nas decisões práticas da vida, dificilmente poder-se-á passar em revista todos os argumentos favoráveis ou contrários a uma possível decisão; e, assim, teremos sempre que agir com base em evidências insuficientes. A decisão finalmente ocorre pondo-se de lado todos os argumentos - tanto os que foram entendidos, como também outros que teriam surgido em presença de um propósito de reflexão maior - podando-se qualquer

ponderação a respeito. A atitude decisória pode ser o resultado de uma deliberação mas, ao mesmo tempo, é a ela complementar: aquela atitude exclui a deliberação. Mesmo as decisões mais importantes da vida sempre contêm esse elemento inevitável de irracionalidade. A decisão, ela própria, é necessária, pois há que se ter algo onde se apoiar, algum princípio normativo a guiar as ações humanas. Sem uma posição firme, nossas atitudes perderiam em força. Assim, não se pode evitar que alguma verdade, real ou aparente, forme a base da vida. E esse fato deveria ser reconhecido no que diz respeito a pessoas cuja escolha diferiu da nossa.

Chegando agora a uma conclusão: a partir de tudo que dissemos sobre a ciência moderna, talvez possamos afirmar que a física moderna é tão-somente uma parte, mas muito característica, de um processo histórico geral que tende a uma unificação, a um alargamento do nosso mundo presente. Esse processo tenderia, por si só, a diminuir as tensões culturais e políticas que põem em perigo a nossa época. Ele, todavia, é acompanhado por um outro processo que age em sentido oposto. O fato de que as grandes massas populares tornaram-se conscientes desse processo de unificação conduz a uma instigação de todas as forças, nas comunidades culturais existentes, no sentido de assegurar a seus valores tradicionais o maior papel nesse estágio final unitário. Em consequência, crescem as tensões, e os dois processos, em competição, são de tal forma ligados um ao outro que qualquer intensificação nessa busca da unidade - por exemplo, através de novas conquistas técnicas - tomará mais acirrada a luta para influenciar o estado final. E, assim, aumenta a instabilidade dessa situação transitória. A física moderna, possivelmente, tem somente um papel secundário nesse processo difícil de unificação. Ela, porém, poderá ajudar, em dois pontos decisivos, a guiar essa evolução por caminhos menos tormentosos. *Primeiro*, ela mostra que o recurso às armas, nesse processo, seria fatalmente desastroso e, *segundo*, por sua atitude aberta, face a todos os tipos de conceitos, faz renascer a esperança de que, no estado final de unificação, tradições culturais distintas possam viver lado a lado, podendo mesmo combinar diferentes tentativas humanas em um novo equilíbrio entre pensamento e ação, entre atividade e meditação.

APÊNDICE

Do Efeito Fotoelétrico e da Teoria do Calor Específico dos Sólidos (Cap. II)

O efeito fotoelétrico, observado experimentalmente por Hertz (1887) e outros, encontrou sua interpretação teórica no trabalho de Einstein intitulado "Ponto de Vista Heurístico acerca da Produção e Transformação da Luz" (*Annalen der Physik* 17, 132-148/1905). A teoria do calor específico dos corpos sólidos aparece em seu trabalho "A Teoria de Planck da Radiação e a Teoria do Calor Específico", *Ann. d. Phys.* 22, 180-190 (1907). Ambos os trabalhos são apresentados de forma accessível na obra "The Einstein Decade (1905-1915)", de C. Lanczos, publicada por *Elek Science*, Londres, 1974, às páginas 127-129 e 145-147.

A Matéria Primordial (Cap. IV)

A partir de 1953, Heisenberg praticamente isolou-se da principal corrente de pesquisa, no campo da física das partículas elementares, ao insistir na formulação de uma teoria que não fizesse uso de constituintes elementares (não aceitando, portanto, a visão atomista de Demócrito) mas que descrevesse o comportamento da matéria em geral, a qual derivaria da matéria primordial, a que deu o nome, em alemão, de *Urmaterie.* As partículas observadas na Natureza seriam manifestações dessa matéria primeira, a qual obedeceria uma equação de campos, não linear, dotada de algumas simetrias que Heisenberg julgava básicas. Esse ponto de vista corresponderia ao conceito de estrutura da matéria defendido por Anaximandro. Para maiores detalhes, consulte-se a obra de Heisenberg intitulada *Introduction to the Unified Field Theory of Elementary Particles* (J. Wiley & Sons, EUA, 1966).

Da Biologia Teórica (Cap. VI)

A biologia teórica mudou muito nestes últimos vinte e cinco anos. Consulte-se, por exemplo, a obra *Theoretical Physics and Biology* (*Proc. of the First International Conference on Theoretical Physics and Biology*, Palais des Congrès, Versailles, 1967). Apesar de publicada há mais de quarenta anos, é altamente recomendável a leitura da conferência proferida por Niels Bohr, na Universidade de Bolonha, em memória a Luigi Galvani (1737-1798), intitulada "Biology and Atomic Physics" (V. *Atomic Physics and Human Knowledge*, J. Wiley & Sons, EUA, 1958).

Da Teoria da Relatividade Restrita (Cap. VII)

O trabalho de Einstein, de 1905, sobre a teoria restrita, intitulava-se "Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento" *(Ann. d. Phys.* 17, 891-921/1905). Uma descrição a respeito encontra-se no livro já citado, *The Einstein Decade (1905-1915)*, pp. 131-139.

Da Confirmação Experimental da Teoria da Relatividade Geral (Cap. VII)

O único tipo de teste até hoje realizado em laboratório terrestre faz uso do efeito Mòssbauer, e confirma a teoria da relatividade geral. Os erros dessa modalidade de experimentação são da mesma ordem de grandeza daqueles das experiências astronômicas. [R.A.]

Das Interpretações da Mecânica Quântica (Cap. VIII)

Sobre a interpretação devida a D. Bohm, pode-se consultar o capitulo "Hidden Variables in the Quantum Theory", de sua autoria, publicado na obra *Quantum Theory* (editor: D.R. Bates, Academic Press, EUA, 1962, vol. 3, pp. 345-387, especialmente pp. 350-351). Uma discussão entre o David herético e um ortodoxo (Prof. Maurice Pryce) está contida no livrinho *Quanta and Reality - A Symposium (* Meridian Books, EUA, 1962). E não pode ser esquecida sua obra *Causality and Chance in Modem Physics* (Routledge and Kegan Paul Ltd., Londres, 1957). Acerca de outras contrapropostas à interpretação de Copenhague, o leitor interessado poderá consultar os dois livros de Max Jammer: *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (McGraw-Hill, EUA, 1966) e *The Phitosophy of Quantum Mechanics* (J. Wiley & Sons, EUA, 1974).

CERN (Cap. IX)

Grande laboratório europeu, fundado em 1954, e localizado no cantão de Genebra, na Suíça. Sua concepção foi estimulada por físicos eminentes que, no final da década de 40, entendiam que a única possibilidade de se promover o desenvolvimento da pesquisa pura, em física nuclear, ao nível alcançado pelos Estados Unidos, seria através da construção de grandes aceleradores de partículas. Devido a seu alto custo, a solução encontrada foi a de criar um laboratório europeu, plurinacional, que congregasse recursos humanos e materiais de várias nações européias: atualmente doze são as nações, todas européias, que participam do empreendimento. Nos tempos de hoje, o CERN lidera a tecnologia dos aceleradores de altas energias, no mundo inteiro. E contribuiu com inúmeras descobertas fundamentais, experimentais e teóricas, no campo da física das partículas elementares, isto é, no domínio das altas energias.

Aceleradores de Partículas (Cap. IX)

Aceleradores de partículas são máquinas utilizadas para estudar a estrutura da matéria e a criação de novas formas de matéria. Elas aceleram

prótons, elétrons e pósitrons (os elétrons positivos) a energias muito maiores que as massas dessas partículas que, assim, adquirem velocidades muito próximas à da luz. Essas partículas são, então, lançadas contra outras e os fragmentos que resultam das colisões são observados e medidos por detectores de partículas e, pela análise desses fragmentos, obtém-se informação sobre a estrutura básica da matéria. Dois parâmetros são importantes no que diz respeito aos aceleradores: 1) sua "luminosidade", atributo que está relacionado ao número de colisões por unidade de tempo; 2) a energia no sistema do centro de massa (ECM). que é a energia dispensável para a formação de novos tipos de partículas, estando ela também ligada à resolução no processo de observação da estrutura das partículas. Os modernos aceleradores podem ser classificados em dois tipos: 1) Os aceleradores com *alvos estacionários* (por exemplo, síncrotons de prótons e elétrons, e aceleradores lineares para elétrons) que exibem alta luminosidade; aqui, a energia do centro de massa é apenas uma fração da energia a que as partículas foram aceleradas; 2) Os *anéis de colisão* onde feixes de partículas movendo-se em sentidos opostos são armazenados em anéis onde colidem entre si; aqui, toda a energia dos feixes é convertida em *ECM* mas a luminosidade é baixa. Os principais aceleradores atualmente em atividade são os que seguem: 1) Aceleradores com alvos estacionários: SPS no CERN (Genebra, Suíça) e Fermilab (Batavia, EUA), ambos acelerando prótons com *E*CM = 28 GeV (a energia de um próton em repouso é 0,94 GeV; SLAC (Stanford, EUA) acelera elétrons com *ECM* = 6,3 GeV; 2) Anéis de colisão: ISR no CERN, que faz colidir prótons com *ECM* = 56 GeV e os anéis de colisão elétron-pósitron; SPEAR (Stanford, EUA) com ECM = 8 GeV; DORIS e PETRA (ambos em Hamburgo, Rep. Fed. Alemã) com EcM = 10 GeV e EcM = 38 GeV, respectivamente. [R.C.S.]

Das Partículas Elementares (Cap. IX)

A tendência atual, na física das partículas elementares, é encarar essa proliferação de partículas (mais de 200 mésons e bárions conhecidos) como uma manifestação de uma dinâmica muito rica e complexa operando a um nível mais elementar. Essa dinâmica seria descrita por uma teoria de campos, para os constituintes fundamentais da matéria, que exibiria propriedades inusitadas, tal como o confinamento permanente desses constituintes no interior das partículas elementares (os bárions e mésons). [C.O.E.]

Axiomática da Geometria Euclidiana (Cap. X)

Em sua obra *Grundlagen derGeometrie* ("Fundamentos da Geometria"), que data de 1899, Hilbert começa, após curta introdução, com as palavras: "imaginemos três tipos de entidades (...) chamadas pontos (...), denominadas retas e outras rotuladas de planos (...). (...) Imaginemos pontos, retas e planos como satisfazendo certas relações recíprocas que

expressamos com palavras tais como “estar situado”, “entre”, “congruente”, “paralelo”, “contínuo”. A descrição completa dessas relações, feita exatamente e com fins matemáticos, decorre dos axiomas da geometria. Esses axiomas, nós podemos dividi-los em cinco grupos: cada um deles, isoladamente, expressa certos fatos fundamentais ligados à nossa intuição. Esses grupos de axiomas são os de incidência, ordem, congruência, paralelismo e continuidade. Nesse trabalho não se define o que sejam “pontos”, “retas” e “planos”. A esse respeito, fez Hilbert durante um seminário, em 1891, uma observação que encerra o ponto de vista axiomático de forma assaz sintética: “Em todos os enunciados geométricos, deve ser possível substituir-se as palavras “ponto”, “linha” e “plano” por mesa, cadeira e caneca” (*apud* O. Blumenthal). Esses termos em aspas carecem pois de qualquer definição: são conceitos ditos *primitivos.* Tudo que precisamos saber sobre tais conceitos está contido nos axiomas. Os axiomas, por assim dizer; representam suas definições implícitas, de forma necessariamente incompleta. Podemos encará-los como regras que nos dizem como jogar com as entidades primitivas e suas relações mútuas. [Vide *Fundamentos de la Geometria,* D. Hilbert; *Publicaciones dei Instituto “Jorge Juan” de Matematicas,* Madrid, 1953.] Uma apreciação sobre a axiomática da geometria euclidiana, maravilhosamente lúcida e informativa, encontra-se em um artigo de Hermann Weyl, que tem por título “David Hilbert and his Mathematical Work” (*Buli. Amer. Math. Soc. 50,* 612-65*4/1944)* e *Boletim da Sociedade de Matemática de São Paulo 1,* 76-104*/1946* e *2, 37-60/1947* (em tradução da Professora Elza Gomide do Instituto de Matemática e Estatística da USP). Em versão mais curta, esse artigo pode ser encontrado na obra, de autoria de Constance Reid, intitulada *Hilbert* (Springer, 1970).

Da abordagem de Garrett Birkhoff e John von Neumann (Cap. X)

A referência do trabalho original, “The Logic of Quantum Mechanics” *é Annals of Mathematics 37,* 823-843 (1936). Uma discussão a respeito pode ser encontrada no livro de Max Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics* (J. Wiley & Sons, EUA, 1974), p. 346 *et seq.* Em relação ao trabalho de von Weizsäcker, o interessado poderá consultar o livro citado (Cap. 8, *Quantum Logic,* p. 376 *et seq.).*

William of Ockham (Cap. XI)

W. of Ockham (ou Occam): filósofo inglês (1300?–?1349) mais conhecido por uma regra que leva seu nome: “a navalha de Occam”. Essa regra, de teor científico e filosófico, afirma que as entidades não devem proliferar desnecessariamente, o que é interpretado como significando que, entre teorias em competição, se deve preferir a mais simples às mais complexas, ou que as explicações de fenômenos desconhecidos têm, em primeiro lugar, que ser expressas em termos de quantidades conhecidas.