

# ALGUMAS REFLEXÕES SOBRE AS TEORIAS FÍSICAS<sup>1</sup>

(Pierre Duhem)

## 1. Sobre o Fim da Física Teórica

O espírito humano, posto na presença do mundo exterior para conhecê-lo, encontra primeiramente o domínio dos fatos. Ele vê que um pedaço de âmbar, friccionado por um pano de lã, atrai à distância uma bolinha de sabugueiro sustentada por um fio de seda; que um pedaço de vidro, friccionado por um pano de lã, age da mesma maneira; que um pedaço de cobre, friccionado com o mesmo pano de lã, ainda age da mesma maneira, desde que o pedaço de cobre e o pano de lã sejam ambos sustentados por um cabo de vidro, etc. Cada observação, cada nova experiência lhe traz um fato novo.

O conhecimento de um grande número de fatos forma um aglomerado confuso que constitui propriamente o *empirismo*. Esse conhecimento de fatos particulares nada mais é que o primeiro grau do conhecimento do mundo exterior. Pela indução, o espírito, transformando os fatos cujo conhecimento lhe é dado, chega ao conhecimento das leis experimentais. Assim, os fatos que acabamos de citar e os outros fatos análogos que o espírito pode observar, conduzem-no por indução a esta lei: todos os corpos, convenientemente friccionados, tornam-se aptos a atrair uma bolinha de sabugueiro suspensa por um fio de seda. Criando uma palavra nova para exprimir a propriedade geral que essa lei afirma, ele diz: por meio de um friccionamento conveniente, todos os corpos se eletrizam.

Compete aos filósofos analisar o mecanismo do procedimento indutivo que permite passar dos fatos às leis; discutir a generalidade e a certeza das leis assim estabelecidas. Não pretendo mais abordar aqui o exame destas questões, mas estudar o próprio conhecimento dos fatos.

O conhecimento das leis experimentais constitui a *ciência puramente experimental*, tão elevada acima do empirismo como a lei o é acima do fato particular.

Mas a ciência puramente experimental não é o último termo do conhecimento do mundo exterior. Acima dela está a ciência teórica. Aquilo que nos propomos estudar é a natureza dessa ciência, tomando como exemplo a teoria mais próxima da perfeição, que recebeu o nome de física *matemática*.

A ciência teórica tem por fim aliviar a memória e ajudá-la a reter mais facilmente o aglomerado das leis experimentais. Quando uma teoria é constituída, o físico, ao invés de reter isoladamente um aglomerado de leis, não necessita reter senão a lembrança de um pequeno número de definições e proposições enunciadas na linguagem das matemáticas. As conseqüências que a análise permite que ele deduza logicamente dessas proposições não têm nenhuma relação de *natureza* com as leis que constituem o objeto apropriado de seus estudos, mas fornecem-lhe uma imagem delas. Essa imagem é mais ou menos semelhante, porém quando a teoria é boa, essa imagem basta para substituir o conhecimento da lei experimental nas aplicações que o físico quer fazer.

Expliquemos tudo isso analisando como se constitui uma teoria física.

## 2. Das Definições na Física Teórica

Em primeiro lugar, o físico, interessado em constituir a teoria que reunirá um conjunto de leis, toma, uma após outra, as diversas noções físicas sobre as quais se assentam essas leis. A cada uma dessas noções físicas, faz corresponder uma grandeza, algébrica ou geométrica, cujas propriedades representam as propriedades mais imediatas das noções físicas correspondentes.

Assim, trata-se de constituir a teoria do calor? As leis mais elementares que se trata de coordenar por meio dessa teoria fazem intervir uma noção, a de *quente*. Essa noção apresenta certas características imediatas: p. ex., compreendemos que dois corpos, de mesma natureza ou de natureza diferente, sejam tão quentes um quanto o outro; que um dos dois seja mais ou menos quente que o outro; que duas partes de um mesmo corpo sejam ou não tão quentes uma quanto a outra. Sabemos que se o corpo A é mais quente que o corpo B e o corpo B é mais quente que o corpo C, o corpo A é mais quente que o corpo C.

Essas propriedades, essenciais à noção de *quente*, não permitem *medir* o objeto dessa

---

<sup>1</sup> Aula inaugural do Curso de Física Matemática e de Cristalografia da Faculdade de Ciência de Lille.

noção, não permitem encará-lo como uma *grandeza*.

Com efeito, para que um objeto seja mensurável, é preciso que a noção que temos desse objeto apresente não apenas todas as propriedades que acabamos de enumerar, mas ainda a propriedade da *adição*. Ora, o quente não é concebido por nós como suscetível de adição. Sabemos perfeitamente o que querem dizer estas frases: o corpo A é tão quente quanto o corpo B; o corpo A é mais quente que o corpo B; mas não compreendemos o que querem dizer enunciados tais como: o *quente* do corpo A é igual ao *quente* do corpo B mais O *quente* do corpo C; o corpo A é dezessete vezes mais quente que o corpo B; é três vezes menos quente que O corpo B.

Assim, o quente não é concebido por nós como suscetível de adição. Essa noção não é para nós redutível a uma grandeza.

Mas se a noção de quente não é redutível a uma grandeza, isso não impede em absoluto que o físico lhe faça corresponder uma certa grandeza, a que chama de *temperatura* que ele escolhe de tal maneira que suas propriedades matemáticas mais simples *representem* as propriedades da noção de quente.

Assim, o quente se apresenta como uma característica própria a cada um dos pontos de um corpo. Concebemos cada um dos pontos de um corpo como sendo tão quente, menos quente, mais quente do que qualquer outro ponto. A cada ponto de um corpo faremos corresponder um valor determinado da temperatura.

A noção de quente não implica qualquer noção de direção. Não se compreenderia o significado da frase: no ponto M de um corpo faz mais calor na direção MN do que na direção MN'.\_A temperatura será, pois, uma simples quantidade algébrica e não uma grandeza geométrica.

A dois pontos tão quentes um quanto o outro, faremos corresponder dois valores iguais da temperatura. A dois pontos não igualmente quentes faremos corresponder dois valores desiguais da temperatura; e isso de tal maneira que o valor mais elevado da temperatura corresponda ao ponto mais quente.

Essa operação estabelece uma correspondência entre a noção de quente e a grandeza algébrica a que chamamos temperatura. Entre essas duas idéias, o quente e a temperatura, não há nenhuma espécie de relação de *natureza*: o quente nos é agradável ou desagradável; ele nos aquece ou nos queima; a temperatura pode ser adicionada a outra temperatura, ser multiplicada ou dividida por um número.

Mas, em virtude da correspondência estabelecida entre essas duas idéias, uma torna-se o *símbolo* da outra, de tal maneira que constatando-se que a temperatura de um corpo tem um valor determinado, constata-se quais são os corpos tão quentes, menos quentes ou mais quentes que esse corpo.

Em virtude dessa correspondência, toda lei física relativa ao quente, lei enunciada por uma proposição da linguagem comum, é traduzida simbolicamente por uma proposição matemática concernente à temperatura.

Assim, ao invés de dizer que todos os pontos de um corpo são tão quentes uns quanto os outros, diremos que a temperatura tem um mesmo valor em todos os pontos desse corpo.

Ao invés de dizer que o corpo A é mais quente que o corpo B, diremos que a temperatura do corpo A tem um valor maior que a temperatura do corpo B.

O exemplo que acabamos de desenvolver coloca nitidamente em evidência as características gerais apresentadas pela definição de uma quantidade física. O que acabamos de dizer acerca da temperatura poder-se-ia repetir, ao menos no que há de essencial para todas as definições de grandezas que se encontram no começo de qualquer teoria física. Vê-se que as definições físicas constituem um verdadeiro vocabulário: assim como um dicionário francês é um conjunto de convenções que faz corresponder a cada objeto um nome, da mesma maneira também numa teoria física as definições são um conjunto de convenções, fazendo corresponder uma grandeza a cada noção física.

Dentre as características essenciais apresentadas por tais definições, há uma que queremos especialmente evidenciar: é a de que uma tal definição possui um alto grau de arbitrariedade. Enquanto na geometria não pode haver senão uma boa definição de uma noção dada, por exemplo, a de ângulo reto, na física pode-se ter uma infinidade de definições de uma noção, por exemplo, da noção de temperatura ou da noção de intensidade luminosa.

A noção física, que se trata de representar, possui certo número de propriedades fundamentais. A grandeza destinada a simbolizá-la deve apresentar certo número de características próprias a representar essas propriedades. Mas toda grandeza que apresenta essas características pode ser tomada como símbolo da noção física em questão.

Assim, a temperatura deve apresentar as seguintes características:

- ela tem o mesmo valor para dois corpos igualmente quentes;
- ela tem um valor maior para o corpo que para o corpo B, se o corpo A é mais quente que o corpo B.

Mas toda grandeza que apresenta essas duas características pode ser tomada como *temperatura*, importando pouco as outras propriedades que servem para contemplar essas definições, importando pouco que a temperatura seja definida por relações entre volumes, pressões, forças eletromotrizes, etc.

### 3. Das Hipóteses na Física Teórica

A definição das diversas grandezas, próprias a simbolizar as noções sobre as quais uma teoria se assentará, constitui a primeira dentre as operações das quais resultará essa teoria.

Vejamos em que série de operações a teoria poderá em seguida desenvolver-se e complementar-se.

Entre as diversas grandezas que supomos definidas, estabeleceremos um certo número de relações, expressas por proposições matemáticas, a que daremos o nome de *hipóteses*.

Tomando as hipóteses como princípios, delas desenvolveremos logicamente as conseqüências.

Dentre essas conseqüências existem algumas que, em virtude das definições estabelecidas, poderão traduzir-se em proposições que se assentam unicamente sobre noções físicas, isto é, em proposições que apresentam a forma das leis experimentais. Essas conseqüências são o que se chama de conseqüências experimentalmente verificáveis da teoria.

Essas conseqüências experimentalmente verificáveis ordenam-se em duas classes: as conseqüências que se traduzem por uma lei experimental exata e as conseqüências cuja tradução está em contradição com uma lei experimental.

Se as conseqüências da teoria que a experiência confirma formam um conjunto extenso e variado, a teoria terá cumprido o fim que lhe estava designado. Ela permitirá aos físicos esquecer todas as leis experimentais que, por seu meio, lhes é permitido reencontrar, para guardar somente a lembrança de algumas definições e hipóteses; a teoria será boa.

Se, ao contrário, a teoria não fornece senão um pequeno número de conseqüências verificáveis pela experiência, ela não terá cumprido seu fim de coordenação; ela será inadequada.

Tudo isso é muito fácil de compreender. É inútil insistirmos nisso.

Mas há um ponto delicado e importante ao qual é necessário voltar: referimo-nos à escolha das hipóteses. Como seremos conduzidos a enunciar essas proposições destinadas a servir de princípios à teoria? Segundo quais regras elas poderão ser escolhidas?

Em princípio, somos absolutamente livres para fazer essa escolha do modo que melhor nos parecer. Ninguém tem o direito de pedir satisfação das considerações que ditaram nossa escolha, contanto que as conseqüências logicamente deduzidas dessas hipóteses pela análise matemática nos forneçam o símbolo de um grande número de leis experimentais exatas.

É o que exprimia tão bem Nicolau Copérnico no início de seu livro sobre as revoluções celestiais, livro VI: "E não é necessário que essas hipóteses sejam verdadeiras, muito pelo contrário, basta que sejam verossímeis";

Mas, de fato certamente essa escolha não se faz ao acaso. Existem métodos gerais segundo os quais são tomadas as hipóteses fundamentais da maior parte das teorias, e classificar esses métodos é ao mesmo tempo classificar as teorias.

O método ideal e perfeito consistiria em não tornar outras hipóteses, senão a tradução simbólica. Em linguagem matemática, de algumas das leis experimentais cujo conjunto se quer representar. Nessas condições, o próprio desenvolvimento da teoria seria inteiramente a tradução simbólica, em linguagem matemática, de um raciocínio passível de ser formulado em linguagem usual. Esse raciocínio tomaria como princípio as leis experimentais que as hipóteses simbolizaram e teria por conclusões as leis experimentais que as conseqüências da teoria simbolizam. A análise matemática não teria outro papel senão aquele de abreviar, de amenizar a linguagem. Todas as conseqüências da teoria apresentariam o mesmo grau de certeza e exatidão que as leis experimentais tomadas como hipóteses. As leis experimentais que se apresentariam como conseqüências da teoria, seriam verdadeiramente uma seqüência lógica das leis experimentais tomadas como hipóteses.

Tal teoria não apresentaria absolutamente nada de *hipotético*. Seu autor poderia com razão pronunciar o famoso *hypotheses non fingo* de Newton.

Mas diga-se ainda que se a física apresenta várias teorias que se aproximam mais ou menos desse ideal, ela não nos oferece nenhuma que o realize plenamente. Newton pode enunciar o *hypotheses non fingo*, Ampere pode intitular sua obra: *Teoria Matemática dos fenômenos eletrodinâmicos unicamente deduzidos da experiência*; mas de fato, é fácil mostrar que suas hipóteses não são a simples tradução simbólica das leis experimentais.

Reencontraremos, nessa mesma linha, a teoria de Ampere. Teremos oportunidade de estudar detalhadamente as hipóteses sobre as quais ela repousa. Deixemos de lado por ora essa teoria e tomemos a teoria da atração universal.

Quais são as leis experimentais nas quais ela está baseada? As leis de Kepler. Qual é a tradução exata dessas leis na linguagem simbólica criada pelas definições da mecânica racional?

"O sol exerce sobre todo planeta uma força de atração na razão inversa do quadrado da distância do sol ao planeta. As forças exercidas pelo sol sobre os diversos planetas estão entre si como as massas desses planetas. Os planetas não exercem nenhuma força sobre o sol".

É essa a hipótese fundamental na qual se assenta a teoria de Newton?

De modo algum. Newton corrige essa proposição que acabamos de enunciar; em seguida lhe acrescenta uma nova proposição não verificável pela experiência e então generaliza o resultado obtido.

Newton corrige, dissemos, a proposição precedente: ao passo que, segundo as leis de Kepler, os planetas não exercem nenhuma ação sobre o sol Newton enuncia que todo planeta exerce sobre o sol uma ação igual e diretamente oposta àquela que ele recebe.

Newton contenta-se com essa correção? Não, ele acrescenta uma proposição que a experiência não lhe fornece, a saber, que se o sol fosse substituído por outro corpo, as ações exercidas sobre os diversos planetas seriam multiplicadas pela relação da massa desse novo corpo com a massa do sol.

Isso é tudo? Ainda não. Newton generaliza o resultado obtido, e é somente por essa generalização que pode enunciar o princípio fundamental de sua teoria:

Dois corpos materiais, cujas dimensões são desprezíveis em relação a sua distância, são submetidos a uma atração mútua proporcional ao produto das massas dos dois corpos e na razão inversa do quadrado da distância que os separa.

O que fez Newton então? Tomou como hipótese a tradução simbólica de uma ou várias leis experimentais? De modo algum. Tomou como hipótese uma proposição da qual as leis experimentais, colocadas no início de sua teoria, são somente conseqüências particulares, exatas ou simplesmente aproximadas.

É esse o procedimento geral empregado por todos os teóricos. Para formular suas hipóteses, escolhem algumas das leis experimentais cujo conjunto deve ser abarcado por sua teoria, e, em seguida, por via de correção, generalização e analogia, compõem uma proposição da qual essas leis sejam conseqüências exatas ou simplesmente aproximadas. É essa proposição que eles tomam como hipótese.

Sendo as hipóteses nas quais se baseia uma teoria, não a tradução adequada das leis experimentais, mas o resultado de uma elaboração mais ou menos considerável relacionada com essas leis, concebe-se que todos os intermediários possam existir entre a hipótese que simboliza quase imediatamente a lei experimental, a hipótese vizinha do ideal do qual falamos anteriormente, e a hipótese tão afastada da experiência, que sua significação simbólica é quase completamente dissimulada, que ela perdeu quase todo o sentido físico.

#### **4. Dos Limites de uma Teoria e das Modificações que ela pode sofrer**

Se todas as hipóteses nas quais assenta uma teoria fossem simplesmente a tradução simbólica das leis experimentais, todas as conseqüências da teoria seriam traduzíveis em leis cujos graus de certeza e exatidão seriam exatamente os graus de certeza e exatidão das leis tomadas como hipóteses. Mas, conforme já foi dito, as hipóteses nas quais está baseada uma teoria nunca são a tradução exata de leis experimentais. Todas elas resultam de uma modificação mais ou menos profunda imposta às leis experimentais pelo espírito do teórico.

Ora, assumindo-se que as hipóteses nas quais se baseia uma teoria encerram alguma coisa que não estava nas leis experimentais pelas quais elas foram sugeridas, segue-se que a certeza e a exatidão dessas leis não se reencontram inteiramente nas conseqüências da teoria. As leis físicas, que as conseqüências da teoria simbolizariam, podem não ser totalmente exatas. Pode-se apontar o fato de que por mais ampla e certa que seja uma teoria física, quando suficientemente ampliada, ela sempre chega a conclusões contrárias à

experiência.

Já afirmamos anteriormente, mas a asserção é tão importante que vale a pena, nela insistir: uma boa teoria não é aquela em que nenhuma consequência não está em desacordo com a experiência; se seguíssemos esse padrão não haveria nenhuma boa teoria e até mesmo é verossímil dizer que a criação de uma boa teoria sobrepujaria as forças do espírito humano. Uma boa teoria é aquela que simboliza de maneira suficientemente aproximada um extenso conjunto de leis físicas; que não encontra contradições com a experiência a não ser quando se procura aplicá-la fora do domínio onde se deve utilizá-la.

Daí resulta que o valor de uma teoria tem um caráter totalmente relativo. Depende do conjunto de leis para cuja classificação sistemática das quais a teoria deve ser empregada. Tal teoria, boa para classificar as leis da distribuição sobre os corpos condutores homogêneos (tal é a teoria de Poisson), deixa de ser uma boa teoria quando se quer classificar as leis relativas a todos os corpos condutores, homogêneos ou heterogêneos, ou ainda quando se quer englobar num mesmo sistema as leis da distribuição sobre os corpos condutores e sobre os corpos dielétricos.

O valor de uma teoria não depende somente do conjunto das leis que se pretende resumir com essa teoria. Depende ainda do grau de precisão dos métodos experimentais que servem para estabelecer ou para aplicar essas leis. Com efeito, não se pede a uma consequência da teoria que traduza uma lei física formalmente idêntica à lei experimental que se busca representar, pede-se somente que ela traduza uma lei física, cujos desvios em relação a essa lei experimental sejam inferiores ao limite dos erros de observação. Esse é, com efeito, um princípio que nunca se deve esquecer: em física, duas leis diferentes na forma, devem ser consideradas como idênticas se seus desvios não podem ser constatados pelos métodos de observação de que se dispõe.

Desde então, certas consequências de uma teoria poderão ser consideradas como conformes às leis experimentais por um físico que disponha de certos meios de observação dados, e como contrárias às leis experimentais por outro físico que disponha de meios de observação mais perfeitos, capazes de apreciar os desvios que escapavam aos instrumentos do primeiro. A teoria clássica dos gases, por exemplo, era boa para os físicos enquanto seus instrumentos ofereciam o mesmo grau de precisão que os de Gay-Lussac. Quando o gênio inventivo de Regnault dotou a ciência de procedimentos muito mais sutis, essa teoria tomou-se inadequada.

E ainda: a antiga teoria dos gases, inadequada para um físico cujas investigações solicitam toda precisão exigida atualmente, pode permanecer boa para um engenheiro, para um químico, se suas investigações não exigem uma exatidão maior que aquela com a qual nos contentávamos nos tempos de Gay-Lussac.

Assim, uma teoria não pode ser julgada, se não levamos em consideração os limites do campo ao qual se pretende aplicá-la e o grau de precisão experimental que ela supõe. Se qualquer de suas consequências, compreendida nos limites do campo para o qual a teoria se pretende válida, se desvia de uma lei experimental o suficiente para que o desvio possa ser apreciado pelos métodos de observação dos quais a teoria declara aceitar o controle, a teoria deve ser condenada; caso contrário, ela deve ser aprovada.

O que acabamos de dizer mostra que se pode, sem contradição, considerar que uma teoria é boa e propor sua substituição por outra melhor. A primeira teoria representava, com uma dada aproximação, um dado conjunto de leis experimentais; a nova teoria representará um conjunto mais extenso de leis, ou então representará as mesmas leis com uma aproximação maior.

Para substituir uma teoria por uma teoria mais perfeita não é sempre necessário, quase nunca é necessário destruir inteiramente a primeira. Muito comumente, basta construir uma teoria mais completa, onde as definições e as hipóteses da primeira teoria se encontram por inteiro, mas onde novas definições são introduzidas e novas hipóteses são enunciadas. É assim que após ter tratado a teoria da distribuição elétrica sobre sistemas que encerram apenas corpos condutores pode-se, sem nada perder dessa teoria, completá-la de maneira que ela compreenda também as leis da distribuição sobre os sistemas que encerram ao mesmo tempo corpos condutores e dielétricos.

Há ocasiões em que uma teoria só pode ser substituída por outra mais perfeita mediante transformações mais profundas que alteram as definições e as hipóteses sobre as quais repousava a primeira teoria. É fácil compreender como semelhantes transformações são possíveis.

A definição de uma grandeza física sempre implica um alto grau de arbitrariedade. Essa grandeza deve apresentar um Certo número, em geral bastante limitado, de caracteres que lhe são impostos pela própria noção que ela deve simbolizar. Mas toda grandeza que apresenta essas características é apropriada para simbolizar essa noção. De maneira que

para representar uma mesma noção, poder-se-á, em geral, utilizar uma variedade de grandezas extremamente diferentes.

A simples mudança das definições levaria imediatamente a mudar as hipóteses. Uma mesma lei experimental será simbolizada por dois enunciados matemáticos diferentes, se as noções sobre as quais ela se apoiar forem representadas por grandezas diferentes. Mas essa modificação puramente formal, pode ser considerada como não sendo uma verdadeira transformação da hipótese. É simplesmente uma tradução da mesma hipótese por intermédio de símbolos diferentes, e esses dois enunciados de uma mesma hipótese em dois sistemas de símbolos diferentes não constituem duas hipóteses distintas, assim como os enunciados de uma mesma proposição em francês, em latim e em grego não constituem três proposições diferentes.

Uma hipótese pode ser modificada de maneira que atinja mais profundamente sua significação.

Se uma hipótese fosse simplesmente a tradução simbólica de uma lei experimental, ela não poderia ser modificada senão pela maneira que acabamos de indicar, pelo menos enquanto a lei experimental continuasse a ser considerada como exata. Mas na realidade, como vimos, todas as hipóteses são outra coisa além da simples tradução de uma lei experimental.

Todas elas são o resultado de uma transformação imposta à lei experimental pelo espírito do físico, e é por aí que elas são modificáveis. Dois físicos podem submeter uma mesma lei experimental a uma transformação diferente, e conseqüentemente enunciar duas hipóteses diferentes, construir duas teorias diferentes e chegar a diferentes conseqüências.

Assim, quanto mais as hipóteses nas quais está baseada uma teoria se aproximarem dessa forma ideal que é a simples tradução simbólica de uma lei experimental, mais difícil será modificá-las; e, por conseqüência, a teoria terá a oportunidade de durar tanto quanto as leis experimentais que representa; de modificar-se somente por via da extensão e do crescimento, sem ser nem alterada nem destruída. E, de modo contrário, quanto mais as hipóteses se distanciarem das leis experimentais que as tomaram possíveis, mais o físico terá colocado de si próprio na enunciação da hipótese e mais a teoria será oscilante e sujeita à demolição. De maneira que, de agora em diante, as considerações puramente lógicas que acabamos de desenvolver indicam em que direção o teórico deve dirigir seus esforços, se quer conceber uma obra viável.

## **9. Do Papel que as Matemáticas e a Experiência devem ter na Constituição de uma Teoria Física**

Uma teoria física é uma representação sistemática de um conjunto de leis experimentais. Ela toma como ponto de partida hipóteses escolhidas de maneira a representar algumas dessas leis. Ela as combina por meio do raciocínio matemático para delas extrair conclusões que ela submete ao controle da experiência.

A experiência fornece, portanto, a matéria das definições e hipóteses sobre as quais repousa toda teoria. Todo resultado da teoria deve ser uma lei da experiência. A Análise matemática é o instrumento que emprega a matéria para dela extrair os resultados. Essa regra muito simples fixa as relações que o método matemático e o método experimental devem guardar entre si na construção de uma teoria.

As regras mais simples são freqüentemente aquelas que são transgredidas mais facilmente. Isso acontece com aquelas que acabamos de enunciar, poucos as respeitam: uns exageram o papel do método experimental, outros a parte da análise matemática.

Para alguns a física deve ser estudada exclusivamente pelo método experimental e, por isso, eles não compreendem essa verdade incontestável de que toda pesquisa física tem a experiência como ponto de partida e como ponto de chegada. Eles pretendem banir o emprego da matemática no estudo da física. Aquela é um instrumento inútil e perigoso, ela não descobre nada ou demonstra apenas erros. Aqueles que sustentam essa visão devem-se recusar o título de físicos e o direito de ensinar a física. Só o fato, o fato bruto e isolado deve ser constatado, ensinado e reproduzido. Toda idéia, exatamente por ser idéia, é falsa e condenável.

Não nos demoraremos discutindo essa doutrina, que considera a física ideal como um instrumento registrador.

Igualmente, entre aqueles que professam essa doutrina, há poucos que seguem plenamente em seus escritos os próprios ensinamentos. Eles fazem uso das matemáticas, mas desejam apenas valer-se de certos ramos da análise; há outros ramos que consideram muito elevados e que, por isso, consideram como inúteis. Quando uma definição lhes parece muito minuciosa, uma demonstração difícil demais e um cálculo muito longo,

declaram que a física pode deles prescindir e os rejeitam.

Como retratar o estado de confusão no qual essas doutrinas ilógicas mergulharam o estudo dos fenômenos naturais? Para evitar as longas e delicadas definições, emprega-se a cada instante grandezas que não foram suficientemente definidas. Para esquivar-se da complicação de um raciocínio preciso, como, por exemplo, das integrais necessárias para um cálculo exato, aceitam aproximações, mascaram as dificuldades, tomam subterfúgios. Por vezes são verdadeiros jogos de palavras, facilitados pela ausência de definições precisas que servem para construir uma teoria. O espírito, desviado por esses atalhos, perde a noção dos métodos racionais ou, se a conserva, ele abandona com fastio o estudo teórico dos fenômenos naturais para se refugiar no trabalho da pura observação, como a química e a história natural, ou na pesquisa da lógica pura, como as matemáticas abstratas. Esse é um fenômeno que puderam constatar todos aqueles que observaram o efeito produzido pelos ensinamentos da física sobre a inteligência dos alunos aos quais ela se dirige.

O instrumento matemático é necessário para o estudo da física e o físico deve ser capaz de empregar, quando for necessário, todas as peças desse instrumento. Se uma teoria exige considerações analíticas elevadas e complicadas, pode ser bom não expô-la diante de um auditório muito pouco instruído. Porém seria ilógico censurar a complexidade do aparelho que serve para construí-la, a menos que possamos substituir esse aparelho por um outro que seja tão sólido e de um manejo mais fácil.

As matemáticas são, portanto, o instrumento necessário para a construção de toda teoria física, mas elas são só um meio e não um fim. Esse é um princípio que não se deve jamais perder de vista, se desejamos evitar os abusos da física matemática.

Das definições e hipóteses que servem de ponto de partida a uma teoria devem advir as equações fundamentais dessa teoria. A análise matemática procederá com grande cuidado no equacionamento, precisando as condições e as restrições às quais ele está submetido.

As relações que fazem depender entre si as leis às quais se aplica a teoria, exprimem-se por meio das propriedades gerais das equações assim estabelecidas. A análise matemática demonstrará, com o máximo rigor, os teoremas que enunciam essas propriedades e delimitará exatamente o alcance delas.

As conseqüências da teoria devem ser submetidas ao controle da experiência. A teoria introduz, em geral, a consideração de quantidades, próprias a cada corpo, cujo valor deve ser determinado por medidas. A análise matemática discutirá até os últimos detalhes os problemas particulares que justificam as experiências de controle, ou que servem para instituir os métodos de medida.

Porém, se a análise matemática se interessa em demonstrar teoremas gerais, ainda que esses teoremas não sirvam para estabelecer o elo entre as leis experimentais, se ela esgota seus esforços para resolver problemas particulares sem uso para o experimentador esquece que no estudo da física ela só deve ser um instrumento. Ela excede seu papel propondo-se como fim ao teórico.

Não se trata de dizer que os esforços assim provocados sejam sempre perdidos. Aperfeiçoando e complicando um instrumento mais que o exigido pelos usos aos quais ele é destinado, pode acontecer que ele se tome próprio a outros usos. Desse modo, os teoremas que o analista deduz de certas equações da física matemática, talvez inúteis para a teoria que forneceu essas equações, podem lançar luz sobre uma outra teoria.

A mecânica celeste, por exemplo, conduz ao estudo das funções harmônicas. Os geômetras descobriram dessas funções uma grande quantidade de propriedades que não têm nenhum emprego na mecânica celeste, entretanto, essas propriedades são de uso contínuo nas teorias do calor, da eletricidade e do magnetismo.

Aliás, os desenvolvimentos analíticos de uma teoria física podem, na falta de aplicação, possuir essa beleza que daria uma razão de ser às matemáticas mesmo se as considerássemos inúteis. Aquele que, aperfeiçoando uma ferramenta, ultrapassa as exigências do útil a ponto de atingir o belo e de gerar uma obra de arte, certamente não perdeu seu tempo e seus esforços.

Porém, se devemos admirar aqueles que das equações de uma teoria física deduzem teoremas próprios a iluminar uma outra teoria, ou aqueles que delas extraem um belo sistema analítico, não podemos senão condenar aqueles para os quais a física é um pretexto para fazer cálculos sem utilidade ou sem beleza: a habilidade de seus artifícios, a complexidade de suas combinações, a sutileza de suas intuições podem surpreender por um instante; mas, em seguida, afastarmos de suas pesquisas com esse sentimento de lástima que todo esforço perdido inspira. Esses são mecânicos que poderiam ter construído uma máquina útil e que apenas inventaram um autômato curioso.

## 10. Em que a Física Teórica é útil

Vimos qual era a natureza da física teórica, qual significação filosófica era conveniente atribuir a seus resultados e em que proporção a experiência e a análise matemática deviam associar-se para constituí-la. Resta-nos assinalar de maneira precisa de que gênero de utilidade é o estudo dessa ciência.

O fim da física teórica é ligar entre si e classificar os conhecimentos adquiridos pelo método experimental. Sem o vínculo sistemático que a especulação estabelece entre elas, as leis dadas pela experiência formam um amontoado confuso e inextricável. O espírito humano necessita de um fio que o guie nesse labirinto; a teoria fornece esse fio.

A teoria está, portanto, destinada a coordenar as leis descobertas pela experiência: ela não está destinada a fazer descobrir novas leis.

Acontece, às vezes, ao teórico de predizer, como conseqüência de suas deduções, uma lei experimental que não tinha sido ainda reconhecida pela observação. As descobertas desse gênero impressionam vivamente, o espírito, mas elas são raras. A maior parte das descobertas experimentais deve-se, como é justo, ao método experimental. Muitos físicos censuram a teoria pelo pequeno número de fatos novos que ela enunciou. Um conhecimento mais exato do domínio próprio de cada ordem de pesquisa os conduziria a admirar essas predições: são as provas da fecundidade de um método que dá além daquilo que se deve exigir dele.

Se a teoria não tem como objeto fazer descobrir novas leis experimentais, ela tem menos ainda como objeto produzir invenções úteis na prática. As especulações da teoria, as pesquisas experimentais e as aplicações práticas são três domínios distintos que convém não confundir: daqueles que exploram um desses domínios não se deve esperar que façam descobertas nos outros.

Contudo, se esses domínios são distintos, eles não são independentes.

O conhecimento de cada um deles auxilia o conhecimento dos outros. Entre os exploradores desses diferentes domínios deve se estabelecer uma contínua troca de questões e de informações.

As necessidades da aplicação sugerem ao experimentador fenômenos a observar, leis a estabelecer. As leis estabelecidas pelo experimentador fornecem ao engenheiro dados que lhe permitem modificar, aperfeiçoar suas invenções. Daí resulta, uma contínua influência da ciência aplicada sobre a ciência experimental e da ciência experimental sobre a ciência aplicada.

Essas leis, às quais chegou o experimentador, são a matéria sobre a qual o teórico trabalha. Ele as classifica e resume em um pequeno número de proposições que permitem ao espírito vê-las num todo e perceber suas relações. Quando os esforços do teórico condensaram assim um grande número de leis em um pequeno número de símbolos simples, claros, fáceis de manejar, o experimentador percebe claramente, em cada parte da física, o que foi feito e o que resta fazer. O engenheiro, captando de um só golpe de vista as inúmeras leis descobertas pela observação, pode rápida e seguramente distinguir aquelas que lhe serão úteis. Certamente, aqueles que realizaram nesses últimos anos tão grandes progressos na indústria eletrônica, não são aqueles que criaram a teoria da eletricidade. Entretanto, se os Paccinoti, os Gramme, os Siemens, os Edison puderam manejar a corrente elétrica e subordiná-la à indústria humana, é porque Ampere, Faraday, Ohm, Kirchhoff, Neumann e Weber puseram-na a serviço da inteligência humana e ensinaram os físicos a manejar as leis às quais essa corrente obedece.

Reconheçamos, portanto, "que não é inútil tentar reunir os fatos sob um mesmo ponto de vista, relacionando-os a um pequeno número de princípios gerais. Essa é a maneira de apreender mais facilmente as leis e penso que os esforços desse gênero podem contribuir tanto como as próprias observações, para o progresso da ciência".

\* Tradução de Marta da Rocha e Silva e Mônica Fuchs.