

ALGUMAS REFLEXÕES ACERCA DA FÍSICA EXPERIMENTAL¹

PRIMEIRA PARTE

O QUE É UMA EXPERIÊNCIA DA FÍSICA?

1. Uma experiência da física não é simplesmente a observação de um fenômeno; é, além disso, a interpretação teórica desse fenômeno

O que é uma experiência da física? Eis uma questão que surpreenderá, sem dúvida, mais de um leitor da *Revue des Questions Scientifiques*. É necessário formular essa questão? A resposta não é evidente? Produzir um fenômeno físico dentro de condições tais que se possa observá-lo exata e minuciosamente, com o auxílio de instrumentos apropriados, não é esta a operação que todo o mundo designa por estas palavras: uma experiência da física?

Entremos num laboratório; aproximemo-nos dessa mesa repleta de vários aparelhos: uma pilha elétrica, fios de cobre recobertos de seda, cadinhos cheios de mercúrio, bobinas, uma barra de ferro que sustenta um espelho. Um observador introduz em pequenos orifícios a haste metálica de uma ficha cuja extremidade é feita de ebonite; o ferro oscila e, pelo espelho ao qual está ligado, transmite-se sobre uma régua de celulóide uma faixa luminosa da qual o observador segue os movimentos. Isso é, sem dúvida, uma experiência: esse físico observa minuciosamente as oscilações do pedaço de ferro. Perguntemos agora o que ele faz; responderá: "estudo as oscilações da barra de ferro que sustenta o espelho."? Não; ele responderá que mede a resistência elétrica de uma bobina. Se nos surpreendermos, se lhe perguntarmos que sentido têm essas palavras e que relação elas têm com os fenômenos que ele constatou, que constatamos ao mesmo tempo que ele, responderá que esta questão necessitaria de explicações bastante longas e nos mandará fazer um curso de eletricidade.

Com efeito, a experiência que vimos ser feita, como toda experiência da física, comporta duas partes: consiste, em primeiro lugar, na observação de certos fenômenos; para fazer essa observação, basta estar atento e ter os sentidos suficientemente apurados; não é necessário saber física. Em segundo lugar, ela consiste na *interpretação* dos fatos observados; para poder fazer esta interpretação, não basta ter a atenção de sobreaviso e o olho exercitado,

(1) Este ensaio foi publicado com o título "Quelques Réflexions au sujet de la Physique Expérimentale", *Revue des Questions Scientifiques*, XXXVI, p.179-229.

é preciso conhecer as teorias admitidas, é preciso saber aplicá-las, é necessário ser físico. Todo homem pode, se vê claramente, seguir os movimentos de uma mancha luminosa sobre uma régua transparente, ver se caminha para a direita ou para a esquerda, se se detém neste ou naquele ponto; não tem necessidade, para isso, de ser um grande cientista; mas se ignorar a eletrodinâmica, não poderá concluir a experiência, não poderá medir a resistência da bobina.

Tomemos um outro exemplo. Regnault estuda a compressibilidade dos gases; toma uma certa quantidade de gás; encerra-o num tubo de vidro; mantendo a temperatura constante, mede a pressão que o gás suporta e o volume que ele ocupa. Dir-se-á que temos aí a observação minuciosa e precisa de certos fenômenos, de certos fatos. Seguramente, diante de Regnault, nas suas mãos, nas mãos de seus auxiliares, os fatos se produzem. É o relato desses fatos que Regnault consignou para contribuir com o avanço da física? Não. Num visor, Regnault vê a imagem de uma certa superfície de mercúrio chegar até uma certa marca. É isto que ele inclui no relato de suas experiências? Não, ele conclui que o gás ocupa um volume com um certo valor. Um auxiliar levanta e abaixa a lente de um catetômetro até que a imagem de um outro nível de mercúrio chegue a nivelar-se com a linha de uma retícula; ele observa, então, a disposição de certas marcas sobre o nônio do catetômetro. É isso que encontramos na dissertação de Regnault? Não, o que lemos é que a pressão suportada pelo gás tem determinado valor. Um outro auxiliar vê, num termômetro, o mercúrio nivelar-se a uma certa marca invariável. É isso o que ele consigna? Não, registra-se que a temperatura era fixa e atingia um certo grau. Ora, o que são o valor do volume ocupado pelo gás, o valor da pressão que ele suporta, o grau de temperatura ao qual ele é levado? São fatos? Não, são três abstrações.

Para formar a primeira dessas abstrações, o valor do volume ocupado pelo gás, e para fazê-la corresponder ao fato observado, isto é, ao nivelamento do mercúrio a uma certa marca, é preciso aferir o tubo, isto é, fazer apelo não somente às noções abstratas da geometria e aritmética, aos princípios abstratos sobre os quais repousam estas ciências, mas, ainda, à noção abstrata de massa, às hipóteses da mecânica geral e da mecânica celeste que justificam o emprego da balança na comparação de massas. Para formar a segunda, o valor da pressão suportada pelo gás, é preciso usar noções tão profundas e tão difíceis de serem obtidas como as noções de pressão e força de ligação; é preciso pedir auxílio às leis matemáticas da hidrostática, fundadas elas mesmas sobre os princípios da mecânica geral; fazer intervir a lei da compressibilidade do mercúrio, cuja determinação remete às mais delicadas e controversas questões da teoria da elasticidade. Para formar a terceira, é preciso definir a temperatura, justificar o emprego do termômetro; e todos os que estudaram com algum cuidado os princípios da física sabem o quanto a noção de temperatura está distante dos fatos e é difícil de apreender.

São Paulo, (4): 87-118, 1989.

Assim, quando Regnault faz uma experiência, ele tem fatos diante dos olhos e observa fenômenos; mas o que nos transmite dessa experiência, não é o relato dos fatos observados, mas dados abstratos que as teorias admitidas lhe permitiam substituir pelos documentos concretos que ele realmente recolhia.

O que Regnault faz, é o que faz necessariamente todo físico experimental; é por isso que podemos enunciar este princípio, cujas consequências serão desenvolvidas por este estudo:

Uma experiência da física é a observação precisa de um grupo de fenômenos, acompanhada da INTERPRETAÇÃO desses fenômenos. Essa interpretação substitui os dados concretos realmente recolhidos pela observação por representações abstratas e simbólicas que lhes correspondem em virtude das teorias físicas admitidas pelo observador.

2. Esse gênero de experiência caracteriza as ciências que chegaram à fase dita racional

Declarando que a interpretação dos fatos por meio de teorias admitidas pelo observador é parte integrante de uma experiência da física, que é impossível, em tal experiência, dissociar ou separar a constatação dos fatos e a transformação que a teoria lhes faz sofrer, poderemos escandalizar mais de um espírito zeloso do rigor científico. Muitos nos objetarão com as regras cem vezes traçadas pelos filósofos e observadores, de Bacon a Claude Bernard, do *Novum Organum* à *Introduction à la Médecine Expérimentale*. Que a teoria sugira as experiências a serem realizadas, nada melhor. Uma vez feita a experiência e constatados nitidamente os resultados, que a teoria se apodere deles para generalizá-los, coordená-los, extraíndo deles novos temas para a experiência, nada de melhor ainda. Mas, enquanto durar a experiência, a teoria deve permanecer à porta do laboratório, deve guardar silêncio e, sem perturbá-lo, deixar o experimentador face a face com os fatos. Estes últimos devem ser observados sem idéias preconcebidas, recolhidos com a mesma imparcialidade minuciosa, quer confirmem as previsões da teoria, quer as contradigam. O relato que o observador nos dá de sua experiência deve ser um decalque fiel e escrupulosamente exato dos fenômenos; não deve nem mesmo nos deixar suspeitar em qual sistema o experimentador tem confiança, nem de qual ele desconfia.

Essa regra é boa para certas ciências: para aquelas em que é possível aplicá-la.

Tome-se, por exemplo, um fisiologista. Ele admite que as raízes anteriores da medula espinhal contém os cordões motores e as raízes posteriores, os cordões sensitivos. A teoria que ele aceita o conduz a imaginar uma experiência. Se ele cortar tal raiz anterior, deverá eliminar a mobilidade de tal parte do corpo sem eliminar a sensibilidade; quando,

depois de ter seccionado essa raiz, observar os resultados, ele deve evidentemente fazer a abstração de todas as idéias referentes à fisiologia da medula. Seu relato deve ser um decalque bruto dos fatos; não lhe é permitido silenciar sobre um movimento, um estremecimento contrário a suas previsões. Não lhe é permitido atribuí-lo a alguma causa secundária, a menos que uma experiência especial tenha colocado essa causa em evidência. Ele deve, se não quiser ser acusado de má fé científica, estabelecer uma separação absoluta, um anteparo estanque, entre as consequências de suas deduções teóricas e os resultados de suas experiências.

Esse método convém às ciências ainda próximas de sua origem, como a fisiologia, ou certos ramos da química, às ciências em que o pesquisador observa diretamente os fatos, onde ele raciocina imediatamente sobre os fatos observados. Ele não é aplicável às ciências mais avançadas, à física, por exemplo, às ciências que chegaram ao estágio de desenvolvimento, em que o instrumento matemático representa um papel essencial, a essa fase que os teóricos do começo do século caracterizaram, muito impropriamente aliás, pelos epítetos de *analítica* ou *racional*.

O número e a complicação dos fatos da experiência, a multiplicidade de leis que constituem a física formariam hoje um inextricável caos, se o espírito humano não tivesse encontrado um meio de elucidar essa massa enorme de documentos, classificá-los, traduzi-los em uma linguagem clara e concisa. Esse meio lhe é fornecido pelo emprego de teorias físicas. Explicamos noutro lugar² como essas teorias substituem as propriedades dos corpos cujas variações constituem os fenômenos físicos e as leis experimentais que regem esses fenômenos por uma espécie de representação simbólica, de esquema formado de elementos emprestados da álgebra e da geometria. As teorias físicas são o vocabulário que faz corresponder a cada propriedade física uma grandeza, a cada lei física, uma equação.

O uso desse vocabulário é, até este ponto, indispensável ao físico, pois lhe será impossível, sem ele, enunciar a menor lei, relatar a menor observação. Tome-se uma experiência qualquer, por exemplo, a experiência de Regnault a que nos referimos há pouco. Tente-se expô-la expulsando da linguagem todas as expressões abstratas introduzidas pelas teorias físicas, as palavras: pressão, temperatura, densidade, eixo ótico de uma lente, coeficiente de dilatação, etc. Perceber-se-á que o relato dessa única experiência exigirá um volume, cuja inextricável confusão desviará a razão mais atenta; ou ainda, perceber-se-á que a tentativa é irrealizável. Do mesmo modo que um francês, habituado a sua língua materna, não pode

(2) "Quelques Réflexions au sujet des Théories Physiques", *Revue des Questions Scientifiques*, 2a série, t.I, 1892. "Physique et Métaphysique", *Ibid.*, t.II, 1893. "L'École Anglaise et les Théories Physiques", *Ibid.*, T.II, 1893.

conceber um pensamento sem enunciá-lo ao mesmo tempo em francês, um físico não concebe mais um fato da experiência sem lhe fazer corresponder imediatamente a expressão abstrata, esquemática, dada pela teoria. Eis porque ele diz que mede a pressão de um gás, ainda que através de um tubo com vidros arredondados, ele veja uma mancha negra sobre um fundo branco; eis porque ele declara que determina a resistência elétrica de uma bobina, ainda que ele coloque fichas de cobre dentro de pequenos orifícios e que veja uma faixa luminosa passear sobre uma régua de chifre. Pretender separar a observação de um fenômeno físico de toda teoria, gabar-se de haver escrito uma dissertação de física *puramente experimental*, é uma tentativa ilusória, como o seria a tentativa de enunciar uma idéia sem empregar nenhum sinal falado ou escrito.

Para dizer a verdade, o físico não é único que faz apelo às teorias para enunciar o resultado de suas experiências. O químico, o fisiologista, quando fazem uso de instrumentos da física, do termômetro, manômetro, calorímetro, galvanômetro, admitem implicitamente a exatidão das teorias que justificam o emprego desses aparelhos, das teorias que conferem um sentido às noções abstratas de pressão, temperatura, quantidade de calor, intensidade de corrente, pelas quais se substituem as indicações concretas desses instrumentos. Mas as teorias das quais fazem uso, assim como os instrumentos que empregam, pertencem ao domínio da física; aceitando, com os instrumentos, as teorias sem as quais suas indicações estariam desprovidas de sentido, é no físico que o químico e o fisiologista depositam sua confiança, é o físico que eles supõem infalível. O físico, ao contrário, é obrigado a confiar em suas próprias idéias teóricas ou nas de seus colegas. Do ponto de vista lógico, a diferença é de pouca importância. Para o fisiologista, para o químico, assim como para o físico, o enunciado do resultado de uma experiência implica, em geral, um ato de fé na exatidão de todo um conjunto de teorias.

Mais ainda, à medida que uma ciência progride, que se distancia do simples conhecimento empírico, da constatação das leis mais grosseiras, o papel representado pela teoria na interpretação dos fatos da experiência vai crescendo. Quando uma ciência começa, quando não é de certa forma mais que o senso comum tornado mais atento, a relação que ela constata entre os fatos da experiência é um decalque exato da realidade observada. A fisiologia, em várias de suas partes, oferece-nos a imagem de uma ciência nesse estágio; depois, à medida que ela progride, a espessura das considerações teóricas que separa o fato concreto, realmente constatado pelo observador, e a tradução abstrata, simbólica, que ela fornece, torna-se mais considerável. Tome-se, por exemplo, a química no seu estado atual. Considere-se, em particular, aquele de seus ramos cujo desenvolvimento é o mais perfeito, a química dos compostos de carbono, a química orgânica. Que diferença entre um fato da experiência e a interpretação teórica, a tradução simbólica fornecida pelo químico! Avalie-se a distância que separa este

enunciado: a experiência nos informa que substituindo um H da benzina pelo grupo ácido COOH, obtém-se o ácido benzóico, das observações concretas, realmente feitas, que ele representa, e compreender-se-á que quanto mais uma ciência progride, mais a tradução simbólica que ela substitui pelos fatos da experiência é abstrata e distante dos fatos.

3. Que uma experiência da física nunca pode condenar uma hipótese isolada, mas somente todo um conjunto teórico

O físico que dá conta de uma experiência reconhece implicitamente a exatidão de todo um conjunto de teorias. Admitamos este princípio e vejamos que consequências é possível deduzir disso quando se procura apreciar o papel e o alcance lógico de uma experiência da física.

Para evitar qualquer confusão, distingüiremos duas espécies de experiências: as experiências de *aplicação* e as experiências de *prova*.

Estamos diante de um problema da física a ser resolvido praticamente. Para produzir um certo efeito, queremos fazer uso dos conhecimentos adquiridos pelos físicos. Queremos, por exemplo, acender uma lâmpada elétrica incandescente. As teorias admitidas nos indicam o meio de resolver o problema; mas, para fazer uso desse meio, devemos obter certas informações; devemos, por exemplo, determinar a força eletromotriz da pilha de que dispomos. Se medimos essa força eletromotriz, temos uma *experiência de aplicação*. Essa experiência não tem por fim reconhecer se as teorias admitidas são ou não exatas. Ela se propõe simplesmente a tirar partido dessas teorias. Para isso, fazemos uso de instrumentos que legitimam essas mesmas teorias. Não há nada que se oponha à lógica.

Mas as experiências de aplicação não são as únicas que o físico tem para fazer. É somente através delas que a ciência pode ajudar na prática. Não é através delas que a ciência é criada e desenvolvida. Além das experiências de aplicação, existem as *experiências de prova*.

Um físico contesta tal lei, coloca em dúvida tal ponto da teoria. Como justificar suas dúvidas? Como demonstrar a inexatidão da lei? Da proposição incriminada, ele extrairá a previsão de um fato da experiência; ele realizará as condições nas quais esse fato deve-se produzir. Se o fato não se produzir, a proposição estará irremediavelmente condenada.

F.E. Neumann admitiu que, em um raio de luz polarizada, a vibração era paralela ao plano de polarização. Muitos físicos colocaram em dúvida essa proposição. Como O. Wiener procedeu para transformar essa dúvida em negação certa, para condenar a proposição de Neumann? Ele deduziu dessa proposição a seguinte consequência: se se fizer interferir uma faísca luminosa refletida sobre uma lâmina de vidro com a faísca incidente polarizada perpendicularmente ao plano de incidência, franjas paralelas à superfície refletora devem ser produzidas. Ele realizou as condições nas quais essas

franjas deviam produzir-se, e mostrou que as franjas previstas não se produziam. Concluiu que a proposição de F.E. Neumann era falsa; que, em um raio de luz polarizada, a vibração não é paralela ao plano de polarização.

Esse modo de demonstração parece tão convincente, tão irrefutável quanto a redução ao absurdo usual nas matemáticas. É, de resto, sobre essa redução ao absurdo que tal demonstração está calcada, a contradição experimental representando numa o papel que a contradição lógica representa na outra.

Em realidade, faz-se necessário que o valor demonstrativo do método experimental seja tão rigoroso, tão absoluto. As condições dentro das quais ele funciona são muito mais complicadas do que se supõe; a apreciação de seus resultados é muito mais delicada e suspeita.

Um físico propõe-se a demonstrar a inexatidão de uma proposição. Para deduzir dessa proposição a previsão de um fenômeno, para instituir a experiência que deve mostrar se esse fenômeno se produz ou não, para interpretar os resultados dessa experiência e constatar que o fenômeno previsto não se produziu, ele não se limita a fazer uso da proposição em litígio, ele emprega ainda todo um conjunto de teorias, admitidas por ele sem contestação. A previsão do fenômeno cuja não produção deve resolver o debate não deriva da proposição litigiosa tomada isoladamente, mas da proposição litigiosa unida a todo esse conjunto de teorias. Se o fenômeno previsto não se produz, não é a proposição litigiosa isoladamente que é considerada imperfeita, é toda a armação teórica de que o físico fez uso. A única coisa que a experiência nos informa, é que entre todas as proposições que serviram para prever esse fenômeno e para constatar que ele não se produziu, há pelo menos um erro. Mas onde reside esse erro, é o que ela não nos diz. O físico declara que esse erro está precisamente contido na proposição que ele quer refutar e não em outro lugar? Sim, porque ele admite implicitamente a exatidão de todas as outras proposições que ele usou; e essa confiança vale tanto quanto sua conclusão.

Tomemos, por exemplo, a experiência de O. Wiener. Para prever a formação de franjas dentro de certas circunstâncias e para mostrar que essas franjas não se produziam, Wiener não usou somente a célebre proposição de Neumann, a proposição que ele queria refutar. Ele não admitiu apenas que, em um raio polarizado, as vibrações eram paralelas ao plano de polarização. Ele se serviu, além disso, de proposições, leis, hipóteses, que constituem a ótica comumente aceita. Admitiu que a luz consistia em vibrações periódicas simples, que em cada ponto, a força viva média do movimento vibratório media a intensidade luminosa, que o ataque de uma película fotográfica marcava os diversos graus dessa intensidade. É juntando essas diversas proposições, e muitas outras que seria bastante longo enumerar, àquela de Neumann, que ele pôde formular uma previsão e reconhecer que a experiência desmentia essa previsão. Se, segundo Wiener, o desmentido se endereça somente à proposição de Neumann, se só ela deve ter a

responsabilidade pelo erro que esse desmentido colocou em evidência, é porque Wiener vê como fora de dúvida as outras proposições por ele invocadas. Mas essa confiança não se impõe por necessidade lógica. Nada impede considerar exata a proposição de Neumann e fazer cair a contradição experimental sobre alguma outra hipótese comumente admitida da ótica. Pode-se muito bem, como mostrou Poincaré, arrancar a hipótese de Neumann das presas da experiência de Wiener, mas sob a condição de abandonar em troca a hipótese que toma a força viva média do movimento vibratório como medida da intensidade luminosa. Pode-se, sem contradição com a experiência, deixar a vibração paralela no plano de polarização, contanto que a intensidade luminosa seja medida pela energia potencial média do meio que deforma o movimento vibratório.

Esses princípios têm uma tal importância que não será de todo inútil aplicá-los a um segundo exemplo. Escolhamos ainda uma experiência considerada como uma das mais decisivas da ótica.

Sabe-se que Newton imaginou uma teoria dos fenômenos óticos, a teoria da emissão. Ele supunha que a luz é formada de projéteis excessivamente sutis, lançados com uma extrema velocidade pelo sol e outras fontes luminosas. Esses projéteis penetram em todos os corpos e sofrem, por parte das diversas partes dos corpos em cujo seio se movem, ações atrativas ou repulsivas. Muito potentes quando a distância que separa as partículas agentes é muito pequena, essas ações desaparecem quando as massas entre as quais elas se exercem estão sensivelmente afastadas. Essas hipóteses essenciais, unidas a muitas outras acerca das quais silenciámos, conduzem a formular uma teoria completa da reflexão e da refração da luz. Em particular, elas acarretam esta consequência: o índice de refração da luz que passa de um meio a outro é igual à velocidade do projétil luminoso no meio no qual penetra dividida por sua velocidade no meio do qual sai.

É esta consequência que Arago escolheu para colocar a teoria da emissão em contradição com os fatos. Dessa proposição, com efeito, decorre esta outra: a luz move-se mais velozmente na água que no ar. Compare-se, por um procedimento que Arago indicou e que Foucault tornou aplicável, pois era impraticável, a velocidade da luz na água com a velocidade da luz no ar e encontrar-se-á que a primeira é menor que a segunda. Pode-se então concluir com Foucault que o sistema da emissão é incompatível com a realidade dos fatos.

Digo o *sistema* da emissão e não a *hipótese* da emissão. Com efeito, o que a experiência declara maculado pelo erro, é todo o conjunto de proposições admitidas por Newton, e depois dele por Laplace e por Biot: é toda a teoria da qual se deduz a relação entre o índice de refração e a velocidade da luz nos diversos meios. Mas ao condenar em bloco esse sistema, ao declarar que ele está maculado pelo erro, a experiência não nos diz onde reside esse erro. Está na hipótese fundamental de que a luz consiste em projéteis lançados com uma grande velocidade pelos corpos luminosos?

Está em alguma outra suposição referente às ações que os corpúsculos luminosos sofrem por parte dos meios no seio dos quais eles se movem? Não o sabemos. Seria temerário acreditar, como Arago parece ter pensado, que a experiência de Foucault condena para sempre a própria hipótese da emissão, a assimilação de um raio de luz a um feixe de projéteis. Quem sabe se não veremos um dia surgir uma ótica nova fundada sobre essa suposição?

Em resumo, o físico jamais pode submeter ao controle da experiência uma hipótese isolada, mas somente todo um conjunto de hipóteses. Quando a experiência está em desacordo com suas previsões, ela lhe informa que pelo menos uma das hipóteses que constituem esse conjunto está errada e deve ser modificada, mas ela não lhe indica aquela que deve ser mudada.

Estamos aqui bem longe do mecanismo experimental tal como o imaginam de bom grado as pessoas estranhas a seu funcionamento. Pensa-se comumente que cada uma das hipóteses que a física usa pode ser tomada isoladamente, submetida ao controle da experiência e, depois, quando provas variadas e múltiplas tiverem constatado o seu valor, ser colocada num lugar de uma maneira quase definitiva dentro do conjunto da ciência. Em realidade, não é assim; a física não é uma máquina que se deixa desmontar. Não se pode experimentar cada peça isoladamente, e esperar, para ajustá-la, que sua solidez tenha sido minuciosamente controlada. A ciência física é um organismo que se deve tomar por inteiro. É um organismo do qual não se pode fazer funcionar uma parte sem que as partes mais distantes desta entrem em jogo, umas mais, outras menos, mas todas em algum grau. Se algum embarço ou algum incômodo se revela no seu funcionamento, o físico será obrigado a descobrir qual é o órgão que tem necessidade de ser corrigido ou modificado, sem que lhe seja possível isolar esse órgão e examiná-lo à parte. O relojoeiro, a quem se dá um relógio que não funciona, separa todas as engrenagens e as examina uma a uma, até que tenha encontrado a que está ruim ou quebrada. O médico a quem se apresenta um doente não pode dissecá-lo para estabelecer o seu diagnóstico. Ele deve descobrir a causa do mal somente pela inspeção dos efeitos produzidos sobre o corpo inteiro. É a esta última forma, não à outra, que se assemelha o físico encarregado de corrigir uma teoria defeituosa.

4. O EXPERIMENTUM CRUCIS é impossível na física

Insistamos ainda, pois tocamos em um dos pontos essenciais do método experimental empregado na física.

A redução ao absurdo, que não parece ser mais que um instrumento de refutação, pode tornar-se um método de demonstração. Para demonstrar que uma proposição é verdadeira, é suficiente encurralar em uma conseqüência absurda aquele que admitisse a proposição contraditória



São Paulo, (4): 87-118, 1989.

única hipótese. Admitamos, por conseguinte, que os fatos, condenando um dos dois sistemas, condenem num golpe seguro a única suposição duvidosa que ele encerra. Resulta disso que se pode encontrar no *experimentum crucis* um meio irrefutável de transformar em verdade certa uma das duas hipóteses presentes, do mesmo modo que a redução ao absurdo de um teorema assegura a verdade do teorema contraditório? Entre duas proposições contraditórias da geometria, não há lugar para um terceiro juízo. Se uma é falsa, a outra é necessariamente verdadeira. Acontece o mesmo com duas hipóteses da física? Ousaremos afirmar que nenhuma outra hipótese é imaginável? A luz pode ser um enxame de projéteis; pode ser um movimento vibratório cujas ondas são propagadas por um meio elástico; não pode ser ela nada além de uma ou outra destas duas coisas? Arago pensava que sim, mas nos seria difícil compartilhar sua convicção, desde que Maxwell propôs atribuir a luz a correntes elétricas periódicas transmitidas no seio de um meio dielétrico.

O método experimental não pode transformar uma hipótese física em uma verdade incontestável, pois jamais se está seguro de haver esgotado todas as hipóteses imagináveis referentes a um grupo de fenômenos. O *experimentum crucis* é impossível. A verdade de uma teoria física não se decide num jogo de cara ou coroa.

5. Consequências dos princípios precedentes para o ensino da física

Imagina-se, em geral, que cada hipótese física pode ser separada do conjunto e submetida isoladamente ao controle da experiência. Naturalmente deste princípio errôneo, deduzem-se conseqüências falsas referentes ao método segundo o qual a física deve ser ensinada. Pretende-se que o professor organize todas as hipóteses da física em uma certa ordem; que ele tome a primeira, que ele forneça o enunciado, que ele exponha suas verificações experimentais e, depois, quando estas verificações tiverem sido suficientemente reconhecidas, que ele declare a hipótese aceita. Recomeçaria a mesma operação para a segunda, para a terceira, e assim por diante, até que a física estivesse inteiramente constituída. A física seria ensinada como se ensina a geometria. As hipóteses se seguiriam como se seguem os teoremas. A prova experimental de cada suposição substituiria a demonstração de cada proposição. Não se adiantaria nada que não estivesse imediatamente justificado pelos fatos; tal é o ideal a que se propõem muito dos professores e que muito pensam talvez ter atingido.

Esse ideal é uma idéia falsa. Essa maneira de conceber o ensino da física deriva de uma concepção errônea da ciência experimental. Se a interpretação da menor experiência da física supõe o emprego de todo um conjunto de teorias, se a própria descrição dessa experiência exige uma série de expressões abstratas, simbólicas, da qual as teorias unicamente fixam o

sentido e a correspondência com os fatos, é necessário que o físico se decida a desenvolver uma longa cadeia de hipóteses e deduções antes de tentar a menor comparação entre o edifício teórico e a realidade concreta. Ainda mais deverá muitas vezes, descrevendo as experiências que verificam as teorias já desenvolvidas, antecipar as teorias por vir. Ele não poderá, por exemplo, tentar a menor verificação experimental dos princípios da dinâmica antes de ter não somente desenvolvido o encadeamento das proposições da mecânica geral, mas ainda, lançado as bases da mecânica celeste. Ainda mais deverá, ao relatar as observações que verificam este conjunto de teorias, supor conhecidas as leis da ótica que são as únicas a justificar o emprego de instrumentos astronômicos.

Que o professor desenvolva pois, em primeiro lugar, as teorias essenciais da ciência; sem dúvida, expondo as hipóteses sobre as quais repousam essas teorias, é preciso que assinale os dados do senso comum, os fatos recolhidos pela experiência vulgar, que conduziram a formular essas hipóteses; mas que ele proclame bem alto que esses fatos, suficientes para sugerir as hipóteses, não o são para verificá-las. Somente depois de constituir um corpo extenso de doutrina, somente depois de constituir uma teoria completa é que ele poderá comparar com a experiência as consequências dessa teoria.

O ensino deve fazer o aluno apreender essa verdade capital: as verificações experimentais não são a base da teoria, elas são seu coroamento. A física não progride como a geometria. Esta cresce pelo acréscimo contínuo de um novo teorema, demonstrado de uma vez por todas, que se acrescenta aos teoremas já demonstrados. A física é um quadro simbólico, ao qual contínuos retoques fornecem extensão e unidade sempre crescentes; quadro esse cujo *conjunto* forma uma imagem cada vez mais precisa do *conjunto* de fatos da experiência, ao passo que cada detalhe dessa imagem, cortada e isolada do todo, perde toda a significação e não representa mais nada.

6. Que o resultado de uma experiência da física é um juízo abstrato e simbólico

Toda experiência da física compreende essencialmente, além da constatação de um fenômeno ou de um grupo de fenômenos, uma interpretação que coloca em jogo todo um conjunto de teorias admitidas pelo observador. Essa interpretação tem por fim substituir os fatos concretos realmente observados por representações abstratas e simbólicas. Da primeira parte deste princípio, deduzimos algumas consequências. Examinemos agora a segunda parte.

Salta aos olhos de quem quer que reflita sobre a física que o resultado das operações a que se entrega um experimentador não é apenas um fato, mas um símbolo abstrato. Abra-se uma dissertação qualquer de física

experimental e leiam-se as conclusões. Estas não são o relato de certos fatos; são enunciados abstratos aos quais não se pode ligar nenhum sentido, se não se conhece as teorias físicas admitidas pelo autor. Lê-se, por exemplo, que a força eletromotriz de tal pilha aumenta tantos volts quando a pressão suportada pela pilha aumenta tantos kilogramas por centímetro quadrado. O que significa este enunciado? Aquele que ignora a física e para quem tal enunciado permanece letra morta, poderia ser tentado a ver nele uma simples maneira de exprimir em linguagem técnica, incognoscível aos leigos, mas clara para os iniciados, um fato constatado pelo observador; isto será um erro. É verdade que o iniciado, que conhece as teorias da física, pode traduzir esse enunciado em fatos, pode realizar a experiência cujo resultado é assim expresso; mas, e isso é notável, pode realizá-la de uma infinidade de maneiras diferentes: ele pode exercer a pressão despejando o mercúrio num tubo de vidro, manejando uma prensa hidráulica; ele pode medir essa pressão com um manômetro a ar livre, com um manômetro a ar comprimido, com um manômetro metálico; para apreciar a variação da força eletromotriz, ele poderá empregar sucessivamente todos os tipos de eletrômetros, galvanômetros, eletrodinamômetros. Cada nova disposição de aparelhos fornecerá ao físico fatos novos a constatar. Ele poderá empregar disposições de aparelhos que o autor da dissertação não tinha suspeitado e ver fenômenos que esse autor jamais vira. Entretanto, todas essas manipulações tão diversas que um profano não perceberia entre elas nenhuma analogia, não são experiências diferentes, são somente formas diferentes de uma mesma experiência. Os fatos que se produziram são tão dissemelhantes quanto possível. Entretanto, a constatação desses fatos se exprime por este enunciado único: a força eletromotriz de tal pilha aumenta tantos volts quando a pressão aumenta tantos kilogramas por centímetro quadrado.

Vê-se que esse enunciado não é o relato, feito numa linguagem técnica e abreviada, de certos fatos observados, mas é a transposição destes para o mundo abstrato e esquemático criado pelas teorias físicas. Nesse mundo em que o instrumento que está diante de mim não é mais uma reunião de peças de cobre parafusadas, de fios metálicos recobertos de seda e enrolados sobre um quadro, de uma pequena peça de aço suspensa por um fio de seda, mas uma *bússola de tangentes*, isto é, uma circunferência de círculo percorrida por uma corrente, no centro da qual se encontra um elemento magnético; mundo em que uma pilha não é mais um tubo de grés ou de vidro, cheio de certos líquidos, onde se banham certos sólidos, mas um ser da razão, simbolizado por certas fórmulas químicas, por uma certa força eletromotriz e por uma certa resistência.

7. Da aproximação nas experiências da física

Entre um símbolo abstrato e um fato pode existir correspondência, não pode haver inteira paridade. O símbolo abstrato não pode ser a representação adequada do fato concreto, o fato concreto não pode ser a realização do símbolo abstrato; o esquema abstrato pelo qual um físico exprime os fatos concretos que ele constatou no curso de uma experiência não pode ser o equivalente exato, o relato fiel de suas constatações.

Vimos resultar disso que fatos concretos muito diferentes podem se fundar uns nos outros quando são interpretados pela teoria, podem constituir nada mais que uma mesma experiência e exprimir-se por um enunciado simbólico único. Veremos resultar inversamente que a um mesmo conjunto de fatos concretos pode-se fazer corresponder, em geral, não só um único juízo simbólico, mas uma infinidade de juízos diferentes e logicamente incompatíveis entre si.

Para constatar os fenômenos que se produzem numa experiência da física, não temos outro meio senão recorrer ao testemunho de nossos sentidos, da vista, do ouvido ou do tato. Por mais complicados e perfeitos que sejam os instrumentos empregados, seu uso se remete, em última análise, a constatações de nossos sentidos. Ora, é uma verdade do senso comum que nossos sentidos têm uma sensibilidade limitada. Tudo o que se encontra abaixo de um certo limite de pequenez lhes escapa. A linguagem ordinária, moldada sobre os dados dos sentidos, lega às palavras uma certa vaguidade que traduz as incertezas de nossas percepções.

Não acontece o mesmo com a linguagem simbólica criada pelas teorias físicas. Graças ao emprego de noções matemáticas, essa linguagem exprime-se em juízos suscetíveis de um rigor e de uma precisão ilimitadas. Tampouco pode haver equivalência exata entre um fato constatado pelos sentidos com a indecisão que comporta uma semelhante constatação e um juízo teórico enunciado sob uma forma matemática que exclui toda ambiguidade. Para traduzir em sua linguagem a incerteza produzida pela sensibilidade limitada de nossas percepções, a teoria substitui o relato de um grupo de fatos não por um juízo abstrato único, mas por uma infinidade de juízos entre os quais ela nos deixa a liberdade de escolher; ou, melhor dizendo, entre os quais não devemos escolher, mas devemos aceitar todos conjuntamente. Esses juízos são diferentes e inconciliáveis entre si. Do ponto de vista da lógica matemática, um não pode ser verdadeiro sem que o outro seja falso; mas tome-se uma e outra dessas proposições teóricas e apliquem-se a essas proposições as teorias admitidas para deduzir as consequências que os instrumentos utilizados na física permitem traduzir em fatos sensíveis. Os sentidos não poderão distinguir entre as consequências deduzidas de uma e as consequências deduzidas da outra. Eis porque, enquanto as matemáticas consideram essas duas proposições como mutuamente exclusivas, a física as considera como idênticas.

São Paulo, (4): 87-118, 1989.

Esta verdade é essencial para a compreensão do método experimental; é a correspondência de um mesmo grupo de fatos a uma infinidade de proposições teóricas diferentes, que se exprime ao enunciar esta proposição: os resultados de uma experiência da física são apenas *aproximados*. Fixar a aproximação que comporta a experiência, é marcar a indeterminação da proposição abstrata e simbólica pela qual o físico substitui os fatos concretos que realmente observou, é precisar os limites que essa indeterminação não deve transpor.

Esclareçamos esses princípios gerais por meio de um exemplo.

Um experimentador fez certas observações. Ele as traduziu através deste enunciado: um aumento de cem atmosferas na pressão faz crescer a força eletromotriz de uma pilha a gás em 0,0845 volts; ele poderá também dizer legitimamente que ela faz crescer essa força eletromotriz em 0,0844 volts, ou ainda, que ela a faz crescer em 0,0846 volts. Como estas proposições diferentes podem ser equivalentes para a física? Pois, se um número é 845, não pode ser ao mesmo tempo 844, nem tampouco 846. Eis aqui o que o físico entende ao declarar que estes três juízos são idênticos: se, tomando como ponto de partida o valor 0,0845 volts para a diminuição da força eletromotriz, ele calcula por meio de teorias admitidas o desvio da agulha de seu galvanômetro, isto é, o único fato que seus sentidos podem constatar, ele encontrará para esse desvio um certo valor; se ele repete o mesmo cálculo tomando como ponto de partida o valor 0,0846 ou o valor 0,0844 volts para a diminuição da força eletromotriz, ele encontrará outros valores para o desvio do imã. Mas os três desvios assim calculados diferirão bastante pouco para que a vista possa discerni-los; é por isso que o físico não distinguirá estas três avaliações do crescimento da força eletromotriz: 0,0844 volts; 0,0845 volts; 0,0846 volts; enquanto o matemático as considera como incompatíveis entre si.

Suponhamos que todos os valores da diminuição da força eletromotriz compreendidos entre 0,0840 volts e 0,0850 volts conduzem, por meio de cálculos fundados sobre as teorias admitidas, a consequências que não poderiam distinguir as leituras feitas no instrumento do qual se serve o físico. O físico não poderá dizer que esse crescimento é igual a 0,0845 volts, mas somente que é um dos números compreendidos entre 0,0840 volts e 0,0850 volts; ou melhor dizendo, que esse crescimento pode ser indiferentemente representado por qualquer um desses números. Essa infinidade de avaliações possíveis será representada por ele toda de uma só vez, escrevendo, por exemplo, que cem atmosferas fazem crescer a força eletromotriz da pilha em $(0,0845 \pm 0,0005 \text{ volts})$.

O grau de aproximação de uma experiência depende de dois elementos essenciais: a natureza e a perfeição do instrumento empregado e a interpretação teórica das experiências.

As explicações precedentes mostram muito claramente que o grau de aproximação de uma experiência depende do instrumento empregado na





Aquele que não vê nas experiências da física mais que constatações de fatos não compreende o papel representado, nessas experiências, pelas correções, não compreende tampouco o que se entende quando se fala das *causas do erro* que uma experiência comporta.

Deixar subsistir uma causa de erro numa experiência é omitir uma correção que poderia ser feita e que aumentaria a precisão da experiência; é contentar-se com uma representação teórica muito simples, ao passo que se poderia substituí-la por uma imagem mais complicada, mas mais perfeita da realidade; é contentar-se com um esboço de traços quando se poderia fazer um desenho acabado.

Nas suas experiências sobre a compressibilidade dos gases, Regnault deixara subsistir uma causa de erro que ele não havia percebido e que foi apontada depois. Ele negligenciou a ação da gravidade sobre o gás submetido à compressão. O que se pretende dizer quando se censura Regnault por não ter levado em conta esta ação, por ter omitido esta correção? Pretendemos dizer que seus sentidos o enganaram na observação de fenômenos produzidos diante dele? De modo algum. Censuramo-lhe ter simplificado excessivamente a imagem teórica desses fatos representando como um fluido homogêneo o gás submetido à compressão, quando, se o tivesse considerado como um fluido cuja densidade varia com a altura segundo uma certa lei, ele teria obtido uma nova imagem abstrata, mais complicada que a primeira, mas reproduzindo melhor a realidade.

9. Da crítica de uma experiência da física. No que ela difere do exame de um testemunho ordinário

Sendo uma experiência da física algo totalmente diferente da simples constatação de um fato, concebe-se sem dificuldade que a verdade, que a certeza de um resultado da experiência sejam coisas de uma ordem totalmente diferente que a verdade, que a certeza de um fato constatado; que essas certezas de natureza tão diferentes se apreciam por métodos inteiramente distintos.

Quando uma testemunha sincera, sã de espírito para não tomar os jogos de sua imaginação por percepções, conhecendo muito bem a língua da qual se serve para exprimir claramente o seu pensamento, afirma ter constatado um fato, o fato é certo. Se eu declaro que em tal dia, a tal hora, em tal rua da cidade, vi um cavalo branco, a menos que existam razões para me considerar como um mentiroso ou como um alucinado, deve-se crer que nesse dia, a essa hora, nessa rua, havia um cavalo branco.

A confiança que deve ser outorgada à proposição enunciada por um físico como resultado de uma experiência não tem a mesma natureza. Se o físico se limitar a nos contar os fatos que ele viu, que seus olhos viram, o que se chama visto, seu testemunho deve ser examinado segundo as regras gerais



Se, ao contrário, não se puder obter informações suficientes sobre as idéias teóricas do físico cujas experiências estão em discussão, se não se chega a estabelecer uma correspondência entre os símbolos que ele adotou e os símbolos fornecidos pelas teorias recebidas, se não podemos traduzir em nossa linguagem as proposições pelas quais ele representou os resultados dessa experiência, esses resultados não serão para nós verdadeiros nem falsos. Eles serão desprovidos de sentido; eles serão letra morta. Quantas observações, acumuladas pelos físicos de antigamente, caíram assim no esquecimento! Seus autores negligenciaram o esclarecimento sobre os métodos de que se serviram para interpretar os fatos; nos é impossível transpor suas interpretações para nossas teorias. Eles encerraram suas idéias em sinais dos quais nós não temos a chave.

Essas primeiras regras parecerão talvez ingênuas e nossa insistência causará espanto; entretanto, se essas regras são banais, é ainda mais banal infringi-las. Quantas não são as discussões científicas em que cada um dos dois defensores pretende esmagar seu adversário sob o testemunho irrecusável dos fatos, apresentando observações contraditórias. A contradição não está na realidade, sempre de acordo com ela mesma. Ela está entre as teorias pelas quais cada um dos dois contendores exprime essa realidade. Quantas proposições assinaladas como monstruosos erros nos escritos daqueles que nos precederam! Talvez seriam celebradas como grandes verdades, se se quisesse informar-se a respeito das teorias que conferem seu verdadeiro sentido a essas proposições, se se tivesse o cuidado de traduzi-las na linguagem das teorias praticadas hoje.

Mas suponhamos que se tenha constatado o acordo entre as teorias admitidas por um experimentador e as que consideramos como exatas. É necessário de imediato que possamos fazer nossos os juízos pelos quais ele enuncia os resultados de suas experiências; é necessário examinar agora se, na interpretação dos fatos observados, ele aplicou corretamente as regras traçadas pelas teorias que ele e nós aceitamos; se ele fez todas as correções necessárias. Muitas vezes, se achará que o experimentador não satisfaz a todas as exigências legítimas. Ao aplicar as teorias, ele cometeu um erro de raciocínio ou de cálculo, omitiu uma correção indispensável e deixou subsistir uma causa de erro que poderia ter sido eliminada.

O experimentador empregou, para interpretar suas observações, teorias que aceitamos como ele; ele aplicou corretamente, nessa interpretação, as regras que essas teorias prescrevem; ele eliminou as causas de erro ou corrigiu os efeitos; isto não é ainda suficiente para que possamos adotar os resultados de suas experiências. Dissemos que as proposições abstratas que as teorias fazem corresponder aos fatos não estão inteiramente determinadas. Aos mesmos fatos pode corresponder uma infinidade de proposições diferentes, uma infinidade de avaliações que se exprimem por números diferentes. O grau de indeterminação possível da proposição abstrata, matemática, pelo qual se exprime o resultado de uma experiência, é



10. Inferior em certeza à constatação não científica de um fato, a experiência da física a ultrapassa em precisão

Se o relato de uma experiência da física não tem a certeza imediata, relativamente fácil de ser constatada, do testemunho vulgar, não científico, ela tem superioridade sobre este último pelo número e minuciosa precisão dos detalhes que nos faz conhecer.

O testemunho ordinário, aquele que relata um fato constatado pelos procedimentos do senso comum e não pelos métodos científicos, só pode ser certo sob a condição de não ser detalhado, de não ser minucioso, de tomar o fato bruto apenas naquilo que ele tem de mais aparente. Em tal rua da cidade, a tal hora, eu vi um cavalo branco; eis o que posso afirmar com certeza. Talvez, a esta afirmação geral eu possa juntar alguma particularidade que, à exclusão de outros detalhes, teria atraído minha atenção: uma estranheza na postura do cavalo, uma excentricidade nos seus arreios. Mas não me sejam feitas muitas questões, minhas lembranças turvaram-se e minhas respostas tornar-se-ão vagas; em breve serei mesmo constrangido a dizer: eu não sei. Salvo exceção, o testemunho vulgar tem tanto mais certeza quanto menos preciso é, pois ele analisa menos, atendo-se às considerações mais grosseiras e mais óbvias.



O relato de uma experiência científica é completamente diferente. Ela não se contenta em nos fazer conhecer um fenômeno bruto. Ela pretende analisá-lo, fazendo-nos conhecer o menor detalhe e a mais minuciosa particularidade, marcando exatamente o lugar e a importância relativa de o grau de aproximação dessa experiência. É necessário conhecer o grau de aproximação da experiência que se examina. Se o experimentador o indicou, é necessário que nos certifiquemos dos raciocínios que lhe serviram para avaliar. Se ele não o indicou, é necessário determiná-lo por nossas próprias discussões. Essa apreciação do grau de aproximação que é comportado por uma experiência dada é uma operação delicada; ela é frequentemente tão complicada que uma ordem inteiramente lógica é difícil de ser mantida. O raciocínio deve então dar lugar a essa qualidade rara, sutil, a essa espécie de perspicácia que se chama de senso experimental, apanágio do "esprit de finesse" antes que do espírito geométrico.

A simples descrição das regras que presidem o exame de uma experiência de física, a sua aceitação ou a sua rejeição, é suficiente para pôr em evidência esta verdade essencial: o resultado de uma experiência da física não tem uma certeza da mesma ordem que um fato constatado pelos métodos não científicos, pela simples visão ou o simples tato de um homem sadio de corpo e de espírito; menos imediata, submetida a discussões que escapam ao testemunho vulgar, essa certeza permanece sempre subordinada à confiança que inspira todo um conjunto de teorias.



São Paulo, (4): 87-118. 1989.

encontraremos objetos concretos satisfazendo essas idéias abstratas. Toda vez que quisermos aplicar a lei: todo homem é mortal, nos encontraremos em presença de um certo homem particular satisfazendo a idéia geral de homem, de uma certa morte particular satisfazendo a idéia geral de morte.

Não acontece o mesmo com as leis da física. Tomemos uma dessas leis, a lei de Mariotte, e examinemos seu enunciado, sem nos preocuparmos, por enquanto, com a exatidão dessa lei. A uma mesma temperatura, os volumes ocupados por uma mesma massa de gás estão na razão inversa das pressões que ela suporta; tal é o enunciado da lei de Mariotte. Os termos que ela faz intervir, as idéias de massa, temperatura, pressão são também idéias abstratas; mas essas idéias não são somente abstratas, elas são, além disso, simbólicas. Coloquemo-nos frente a um caso concreto, real, ao qual queremos aplicar a lei de Mariotte. Não teremos obtido uma certa temperatura concreta satisfazendo a idéia geral de temperatura, mas um gás mais ou menos quente; não teremos diante de nós uma certa pressão particular realizando a noção geral de pressão, mas o mercúrio num tubo de vidro. Sem dúvida, a esse gás mais ou menos quente corresponde uma certa temperatura, a esse mercúrio num tubo de vidro corresponde uma certa pressão, mas essa correspondência é a correspondência de uma coisa significada pelo sinal que a substitui, de uma realidade pelo símbolo que a representa.

Os termos abstratos dos quais trata uma lei do senso comum, não sendo outra coisa que o que existe de geral nos objetos concretos submetidos aos nossos sentidos, a passagem do concreto ao abstrato se faz por uma operação tão necessária e espontânea que permanece inconsciente. Colocado em presença de um certo homem, de um certo caso de morte, eu os ligo imediatamente à idéia geral de homem, à idéia geral de morte. Esta operação repentina, irrefletida, fornece as idéias gerais não analisadas, as abstrações tomadas, por assim dizer, em bloco. Sem dúvida, essas idéias gerais e abstratas podem ser analisadas pelo pensador que tentar penetrar profundamente no sentido da palavra "homem", no sentido da palavra "morte". Esse trabalho o conduzirá a apreender melhor a razão de ser da lei; mas esse trabalho não é necessário para compreender a lei. É suficiente, para compreendê-la, tomar os termos que ela liga em seu sentido óbvio; por conseguinte, essa lei é clara para todos, filósofos ou não.

Os termos simbólicos que ligam uma lei da física não são mais essas abstrações que brotam espontaneamente da realidade concreta; são abstrações produzidas por um trabalho de análise lento, complicado, consciente, o trabalho secular que elaborou as teorias físicas. É impossível compreender a lei, impossível aplicá-la, se não se fizer esse trabalho, se não se conhecer as teorias físicas. Segundo a adoção de uma ou outra teoria, a lei muda de sentido, de sorte que ela pode ser aceita por um físico que admite tal teoria e rejeitada por um outro físico que admite outra teoria. Tomemos um camponês que jamais analisou a noção de homem e a noção de morte, e

um metafísico que passou a sua vida a analisá-las. Tomemos dois filósofos que as têm analisado, e que adotam definições diferentes, inconciliáveis. Para todos, a lei: todo homem é mortal, será igualmente clara e verdadeira. Tomemos, ao contrário, dois físicos que, não admitem as mesmas teorias mecânicas, não definem a pressão da mesma maneira; um, por exemplo, aceita as idéias de Lagrange, o outro adota as idéias de Laplace e de Poisson. Submetamos a esses dois físicos uma lei cujo enunciado faz intervir a noção de pressão. Eles entenderão esse enunciado de duas maneiras diferentes. Para compará-lo à realidade, eles farão cálculos diferentes, de sorte que um poderá achar que essa lei é verificada pelos fatos que, para o outro, a contradirão. Prova bem manifesta desta verdade: uma lei da física é uma relação simbólica cuja aplicação à realidade concreta exige que se conheça e que se aceite todo um conjunto de teorias.

2. Que uma lei da física não é, propriamente falando, nem verdadeira, nem falsa, mas aproximada

Uma lei do senso comum é um simples juízo geral, que é verdadeiro ou falso. Tomemos, por exemplo, esta lei da experiência vulgar: em Paris, o sol nasce cada dia no oriente, eleva-se no céu, depois desce e esconde-se no ocidente. Eis uma lei verdadeira, sem condição, sem restrição. Tomemos, ao contrário, este enunciado: a lua é sempre cheia. Eis uma lei falsa. Se a verdade de uma lei do senso comum é posta em questão, poder-se-á responder a essa questão com sim ou não.

Não acontece o mesmo com as leis que a ciência física, a qual atingiu seu pleno desenvolvimento, enuncia sob forma de proposições matemáticas. Tal lei é sempre simbólica. Ora, um símbolo não é, propriamente falando, nem verdadeiro, nem falso; é mais ou menos bem escolhido para significar a realidade que ele representa; ele a afigura de uma maneira mais ou menos precisa, mais ou menos detalhada. Mas, aplicadas a um símbolo, as palavras verdade, erro, não têm mais sentido; por isso, para aquele que pergunta se tal lei da física é verdadeira ou falsa, o lógico que tem se preocupado com o sentido estrito das palavras será obrigado a responder: eu não compreendo a questão. Comentemos esta resposta, que pode parecer paradoxal, mas cuja compreensão é necessária para aquele que pretende saber o que é a física.

A um fato dado, o método experimental, tal como a física o pratica, faz corresponder não apenas um único juízo simbólico, mas uma infinidade de juízos simbólicos diferentes. O grau de indeterminação do símbolo é o grau de aproximação da experiência em questão. Tomemos uma sequência de fatos análogos. Para o físico, encontrar a lei desses fatos, será encontrar uma fórmula que contém a representação simbólica de cada um destes fatos. A indeterminação do símbolo que corresponde a cada fato acarreta, então, a indeterminação da fórmula que deve reunir todos esses símbolos. A um

São Paulo, (4): 87-118, 1989.

mesmo conjunto de fatos, pode-se fazer corresponder uma infinidade de fórmulas diferentes, uma infinidade de leis físicas distintas. Cada uma dessas leis, para ser aceita, deve fazer corresponder a cada fato não apenas o símbolo desse fato, mas um símbolo qualquer dentre os infinitos símbolos que podem representar esse fato. Eis o que se pretende dizer quando se declara que as leis da física são somente aproximadas.

Imaginemos, por exemplo, que não nos pudéssemos contentar com os esclarecimentos fornecidos por esta lei do senso comum: em Paris, o sol nasce todo dia no oriente, eleva-se no céu, depois desce e esconde-se no ocidente. Dirigir-nos-íamos às ciências físicas para ter uma lei precisa do movimento do sol visto em Paris, uma lei indicando ao observador parisiense que situação o sol ocupa a cada instante no céu. As ciências físicas, para resolver o problema, não farão uso das realidades sensíveis, do sol tal como o vemos brilhar no céu, mas de símbolos pelos quais as teorias representam essas realidades. O sol real, apesar das irregularidades de sua superfície, não obstante as imensas protuberâncias que ela contém, é substituído nas teorias por uma esfera geometricamente perfeita, e é a posição do centro dessa esfera ideal que elas procurarão determinar; ou, melhor dizendo, elas procurarão determinar a posição que esse ponto ocuparia se a refração astronômica não desviasse os raios de sol, se a aberração anual não modificasse a posição aparente dos astros. É, pois, um símbolo que elas substituem à única realidade sensível oferecida a nossas constatações, ao disco brilhante a que nossas lunetas podem visar. Para fazer corresponder o símbolo e a realidade, é necessário efetuar medidas complicadas, é necessário fazer coincidir as bordas da imagem do sol com um fio de micrômetro, é necessário processar múltiplas leituras sobre círculos divididos; são necessários, também, cálculos cuja legitimidade resulta das teorias admitidas, da teoria da refração atmosférica, da teoria da aberração.

Esse ponto, simbolicamente chamado de centro do sol, não é ainda o que nossas fórmulas apreenderão; o que elas apreenderão são as coordenadas desse ponto, sua ascensão direta e sua inclinação, coordenadas das quais o sentido não pode ser compreendido se não se conhecem as leis da cosmografia.

Ora, a uma posição determinada do disco solar só se pode fazer corresponder um único valor para a ascensão direta e um único valor para a inclinação do centro do sol, sendo as correções da aberração e da refração supostamente feitas? Não. O poder ótico do instrumento de que nos servimos para visar ao sol é limitado; as diversas observações comportadas por nossa experiência, as diversas leituras que ela exige são de uma sensibilidade limitada. Não podemos nos aperceber que o disco solar esteja em tal posição e não em outra, se o desvio é suficientemente pequeno. Suponhamos que não pudéssemos distinguir dois pontos quando sua distância angular é inferior a 1". Seria suficiente, para determinar a posição do sol em um instante dado, conhecer a ascensão direta e a inclinação do centro do sol com a

aproximação de 1"; então, para representar a trajetória do sol, que não ocupa a cada instante mais que uma única posição, poderíamos dar a cada instante não apenas um valor da ascensão direta e um valor da inclinação, mas uma infinidade de valores da ascensão direta e uma infinidade de valores da inclinação, somente que, para um mesmo instante, dois valores aceitáveis da ascensão direta ou dois valores aceitáveis da inclinação não poderão diferir em mais que 1".

Procuremos agora a lei do movimento do sol, isto é, duas fórmulas que permitem calcular, a cada instante de duração, o valor da ascensão direta do centro do sol e o valor da inclinação do mesmo ponto. Não é evidente que podemos adotar, para representar a trajetória da ascensão direta em função do tempo, não apenas uma única fórmula, mas uma infinidade de fórmulas diferentes, contanto que, a um mesmo instante todas essas fórmulas nos conduzam a valores da ascensão direta diferentes entre si em menos de 1"? Não é evidente que acontecerá o mesmo para a inclinação? Poderemos, pois, representar igualmente bem nossas observações sobre o caminho do sol por uma infinidade de leis diferentes. Essas diversas leis exprimir-se-ão por equações que a análise considera incompatíveis, por equações tais que, se uma dentre elas for verificada, nenhuma outra o será. Entretanto, para o físico, todas essas leis são igualmente aceitáveis, pois elas determinam a posição do sol com uma aproximação superior àquela que comporta a observação; o físico não tem o direito de dizer de alguma destas leis que ela é verdadeira à exclusão das outras.

Sem dúvida, entre essas leis, o físico tem o direito de escolher e, em geral, ele escolherá; mas os motivos que guiarão sua escolha não terão nem a mesma natureza, nem a mesma necessidade imperiosa daquela que obriga a preferir a verdade ao erro. Ele escolherá uma certa fórmula porque é mais simples que as outras. A fraqueza de nosso espírito nos constrange a atribuir uma grande importância às considerações dessa ordem; mas não estamos mais no tempo em que se supunha que a inteligência do Criador estava afetada pela mesma debilidade, tempo em que se recusava, em nome da simplicidade das leis da natureza, toda lei que exprimisse uma equação algébrica muito complicada. O físico preferirá sobretudo uma lei a outra, quando a primeira derivar de teorias que ele admite. Ele exigirá, por exemplo, da teoria da atração universal as fórmulas que deve preferir entre todas aquelas que poderiam representar o movimento do sol. Mas as teorias físicas são apenas um meio de classificar e de ligar entre si as leis aproximadas a que as experiências estão submetidas. As teorias não podem, pois, modificar a natureza de uma dessas leis e lhe conferir a verdade absoluta.

Assim, toda lei da física é uma lei aproximada; por conseguinte, para o lógico estrito, ela não pode ser nem verdadeira, nem falsa. Toda lei que represente as mesmas experiências com a mesma aproximação pode

pretender tão justamente quanto a primeira, o título de lei verídica, ou de modo mais rigoroso, de lei aceitável.

3. Que toda lei da física é provisória

O caráter essencial de uma lei é a fixidez. Uma proposição só é uma lei porque, verdadeira hoje, ela ainda será verdadeira amanhã. Dizer de uma lei que ela é provisória, não é enunciar uma contradição? Sim, se se entende por leis aquelas que o senso comum nos revela, aquelas das quais se pode dizer, no sentido próprio da palavra, que são verdadeiras. Essa lei não pode ser verdadeira hoje e falsa amanhã. Não, se se entende por leis as leis que a física enuncia na forma matemática. Tal lei é sempre provisória; não que seja necessário entender por isso que uma lei da física é verdadeira durante um certo tempo e falsa em seguida, pois ela não é em nenhum momento nem verdadeira, nem falsa. Ela é provisória, posto que representa os fatos aos quais se aplica com uma aproximação que os físicos julgam atualmente suficiente, mas que deixará um dia de satisfazê-los.

Observamos que o grau de aproximação de uma experiência não é alguma coisa fixa; ele cresce à medida que os instrumentos tornam-se mais perfeitos, que as causas de erro são mais estritamente evitadas, ou que correções mais precisas permitem uma melhor avaliação. medida que os métodos experimentais progredem, a indeterminação do símbolo abstrato que a experiência física faz corresponder ao fato concreto vai diminuindo. Muitos dos juízos simbólicos que deviam ser vistos, em uma época, como representando bem um fato concreto determinado, não serão mais aceitos em outra época como sinais desse fato. Por exemplo, os astrônomos de um século aceitarão, para representar a posição do sol em um instante dado, todos os valores da ascensão direta, ou todos os valores da inclinação, que não se desviarem em menos de 1", porque seus instrumentos não lhes permitem distinguir entre dois pontos cuja distância angular seja inferior a 1". Os astrônomos do século seguinte terão instrumentos cujo poder ótico será dez vezes maior, exigirão, então, que as diversas determinações da ascensão direta do centro do sol a um instante dado e que as diversas determinações da inclinação não se desviem entre si em mais de 0,1". Uma infinidade de determinações, que contentariam seus predecessores, serão rejeitadas por eles.

À medida que se restringe a indeterminação dos resultados da experiência, a indeterminação das fórmulas que servem para condensar esses resultados vai diminuindo. Um século aceitava, como lei do movimento do sol, todo um grupo de fórmulas que forneciam a cada instante, as coordenadas do centro desse astro com uma aproximação de um segundo; o século subsequente imporá a toda lei do movimento do sol a condição de lhe dar essas coordenadas do centro do sol com uma aproximação de 0,1". Uma

infinidade de leis aceitas pelo primeiro século serão assim rejeitadas pelo segundo.

Toda lei física, sendo uma lei aproximada, está sujeita a um progresso que, aumentando a precisão das experiências, tornará insuficiente o grau de aproximação comportado por essa lei. O físico deve sempre considerá-la como provisória.

Não é somente por ser aproximada que uma lei da física é provisória; mas também por ser uma relação simbólica. Encontram-se sempre casos em que os símbolos aos quais a lei se refere não são capazes de representar a realidade de uma maneira satisfatória.

Para estudar um certo gás, o físico lhe dá uma representação esquemática. Representa-o como um fluido perfeito, que tem uma certa densidade, está submetido a uma certa temperatura e a uma certa pressão. Entre esses três elementos, densidade, temperatura, pressão, ele estabelece uma certa relação: a lei da compressibilidade e da dilatação do gás. Essa lei é definitiva?

Coloquemos esse gás entre as placas de um condensador elétrico fortemente carregado. Determinemos sua densidade, sua temperatura, a pressão que ele suporta. Os valores desses três elementos não verificam mais a lei da compressibilidade e dilatação do gás. O físico surpreender-se-á em ver que sua lei é defeituosa? Colocará em dúvida a fixidez das leis da natureza? Não; ele dirá simplesmente que a relação defeituosa era uma relação simbólica, que ela não se referia ao gás real que ele manipula, mas a um certo gás esquemático definido por sua densidade, sua temperatura e sua pressão; que, sem dúvida, esse esquema era bastante simples, bastante incompleto, para representar as propriedades do gás real colocado nas condições em que se encontra atualmente. Ele procura, então, completar esse esquema, tornando-o mais apto a exprimir a realidade. Ele não se contenta mais em definir o gás simbólico por meio de sua densidade, temperatura e da pressão que ele suporta, mas lhe atribui um poder dielétrico, introduz na representação desse corpo a intensidade do campo elétrico no qual ele está colocado; ele submete esse símbolo mais completo a novos estudos e obtém a lei da compressibilidade do gás dotado de polarização dielétrica. É uma lei mais complicada que a obtida anteriormente. Ela abarca a anterior como um caso particular; porém, mais abrangente, ela será verificada nos casos em que a anterior era imperfeita.

Essa nova lei é definitiva?

Tomemos o gás ao qual ela se aplica, coloquemo-lo entre os pólos de uma eletroimã e encontramos que ela é, por sua vez, desmentida pela experiência. Não creiam que esse novo desmentido surpreende o físico; ele sabe que se trata de uma relação simbólica e que o símbolo que criou, imagem fiel da realidade em certos casos, não lhe será parecido em todas as circunstâncias. Ele retoma, pois, sem desencorajar-se, o esquema do gás que ele experimenta. Para permitir que esse esquema represente os fatos, ele

acrescenta novos traços. Não é mais suficiente que o gás tenha uma densidade, uma temperatura, um poder dielétrico, que ele suporte uma pressão e que seja colocado num campo elétrico de intensidade dada. Ele lhe atribui também um coeficiente de imantação e leva em conta a intensidade do campo magnético em que ele se encontra, e, ligando todos esses elementos através de um conjunto de fórmulas, ele obtém a lei da compressibilidade e da dilatação do gás polarizado e imantado; lei mais complicada, porém mais abrangente que as que ele havia anteriormente obtido. Lei que será verificada numa infinidade de casos em que as outras são desmentidas, e, entretanto, uma lei provisória. O físico prevê que um dia se perceberão condições em que essa lei será imperfeita. Nesse dia, será necessário retomar a representação simbólica do gás e acrescentar-lhe novos elementos. Esse símbolo é como um mecanismo em que a flexibilidade é tanto maior quanto maior o número de peças que o formam; à medida que ele se complica, mais estreitamente se aplica aos fatos. Mas esse mecanismo por mais que se torne minucioso e preciso, permanecerá sempre um simulacro grosseiro e provisório da realidade.

Esse trabalho de contínuo retoque, pelo qual as leis da física evitam os desmentidos da experiência, representa um papel de tal modo essencial no desenvolvimento da física, que nos permitiremos insistir um pouco mais nisso e estudar seu caminho através de um segundo exemplo.

De todas as leis da física, a mais bem verificada por suas inumeráveis consequências é seguramente a lei da atração universal. As observações mais precisas sobre os movimentos dos astros não puderam, até aqui, mostrar que ela é imperfeita. É uma lei definitiva? De modo algum, mas uma lei provisória, que deverá modificar-se e complicar-se para ser colocada em acordo com a experiência.

Suponhamos um recipiente com água. A lei da atração universal nos faz conhecer a força que age sobre cada uma das partículas dessa água. Essa força é o peso da partícula. A mecânica nos indica a figura que a água deve simular: qualquer que seja a forma do recipiente, ela deve terminar num plano horizontal. Vejamos de perto a superfície em que termina essa água; horizontal longe da borda do vaso, ela deixa de sê-lo nas proximidades das paredes do vidro. Ela se eleva ao longo dessas paredes. Num espaço estreito, ela sobe mais alto e se torna completamente côncava. Eis onde a lei da atração universal é imperfeita. Para evitar que os fenômenos capilares desmintam a lei da gravitação, será necessário modificá-la; será necessário considerar a fórmula da razão inversa do quadrado da distância como uma fórmula aproximada; é preciso admitir que essa fórmula faz conhecer com uma precisão suficiente a atração de duas partes materiais distantes, mas que se torna incorreta quando se trata de exprimir a ação de dois elementos mais próximos; é preciso introduzir nas equações um termo complementar que, complicando-os, torna-os aptos a representar uma classe mais extensa de

fenômenos e permitem-lhes abraçar, numa mesma lei, os movimentos dos astros e os efeitos capilares.

Essa lei será mais abrangente que a de Newton, mas não estará, por isso, a salvo de toda contradição. Numa série de casos, as leis da capilaridade estarão em desacordo com as observações. Para fazer desaparecer esse desacordo, será preciso retomar a fórmula das ações capilares, modificá-la e completá-la, levando em conta as cargas elétricas a que se referem as partículas de fluido e das forças que se exercem entre essas partículas eletrizadas. Assim, continuar-se-á indefinidamente essa luta entre a realidade e as leis da física. A toda lei formulada pela física, a experiência oporá o brutal desmentido de um fato; mas, infatigável, a física retocará, modificará, complicará a lei desmentida, para substituí-la por uma lei mais abrangente, em que a exceção levantada pela experiência terá, por sua vez, encontrado a sua regra.

É através dessa luta incessante, desse trabalho que completa as leis, reenquadrando as exceções, que a física progride. É porque um pedaço de âmbar friccionado com lã mostrou serem imperfeitas as leis da gravidade que a física criou as leis da eletrostática; é porque um ímã produz efeitos contrários a essas mesmas leis da gravidade que ela imaginou as leis do magnetismo; é porque Oersted encontrou uma exceção às leis da eletrostática e do magnetismo, que Ampère inventou as leis da eletrodinâmica e do eletromagnetismo. A física não progride como a geometria, que acrescenta novas proposições definitivas e indiscutíveis às proposições definitivas e indiscutíveis que ela possuía antes; ela progride porque, sem cessar, a experiência faz surgir novos desacordos entre a teoria e a realidade, e que, sem cessar, os físicos retocam e modificam a teoria para dar-lhe uma mais perfeita semelhança com a realidade.

4. As leis da física são mais detalhadas que as leis do senso comum

As leis que a experiência não científica nos permite formular são juízos gerais cujo sentido é imediato. Diante de um desses juízos, pode-se perguntar: é verdadeiro? Em geral, a resposta é fácil. A lei reconhecida como verdadeira, é verdadeira em todos os tempos e sem exceção.

As leis científicas fundadas sobre as experiências da física são relações simbólicas cujo sentido permaneceria ininteligível a quem não conhecesse as teorias físicas. Sendo simbólicas, elas nunca são verdadeiras, nem falsas. Como as experiências sobre as quais repousam, elas são aproximadas. A aproximação de uma lei, suficiente hoje, tornar-se-á insuficiente no futuro, em conseqüência do progresso dos métodos experimentais; de sorte que uma lei da física é sempre provisória. Ela é provisória também porque liga não realidades, mas símbolos, e sempre há casos em que o símbolo não

representa mais a realidade. As leis da física só podem, pois, ser mantidas por um trabalho contínuo de retoques e de modificações.

O problema da certeza das leis da física se coloca de uma maneira completamente diferente, de uma maneira mais complicada e mais delicada que o problema da certeza das leis do senso comum. Poder-se-ia pretender extrair a conclusão estranha de que o conhecimento das leis da física constitui um estágio da ciência inferior ao do simples conhecimento das leis do senso comum. aqueles que procuram deduzir das considerações precedentes essa consequência paradoxal, nos contentaremos de responder, repetindo para as leis da física o que dissemos para as experiências científicas: uma lei da física possui uma certeza muito menos imediata e muito mais difícil de apreciar do que uma lei do senso comum; mas ela ultrapassa esta última pela minuciosa precisão dos detalhes.

Se comparamos esta lei do senso comum: em Paris, o sol nasce todos os dias no oriente, eleva-se no céu, depois desce e esconde-se no ocidente; com as fórmulas que, a cada instante, fazem conhecer com a aproximação de um segundo as coordenadas do centro do sol, ficaremos convencidos da exatidão dessa proposição.

É esse cuidado com a minuciosa exatidão e com a análise precisa que distingue a ciência física do senso comum. É esse cuidado que dá a suas leis um caráter provisório e aproximado. Tudo o que acabamos de dizer dessa característica é como se fosse um comentário deste pensamento de Pascal: "A verdade é um ponto tão sutil que nossos instrumentos são muito insensíveis para tocá-la exatamente. Se eles chegam a isso, pisam-lhe a ponta, e apoiam-se em tudo à volta, mais sobre o falso que sobre o verdadeiro".

Se, depois disso, alguém ainda se surpreende de ver o espírito humano, grosseiramente esclarecido sobre os fenômenos naturais pelas leis certamente verdadeiras, solicitar um conhecimento mais detalhado desses mesmos fenômenos por fórmulas que são somente aproximadas e provisórias, eu me contentarei de deixar para suas meditações o seguinte apólogo:

Um botânico pesquisando uma árvore rara, encontra dois camponeses, aos quais solicita esclarecimentos. "Neste bosque, lhe diz um, há uma dessas árvores."—"Tome, lhe diz o outro, o terceiro caminho que encontrar, ande cem passos e estará ao pé mesmo da árvore que procura." O botânico toma o terceiro caminho, anda cem passos, mas não atinge o objeto de suas pesquisas; para chegar ao pé da árvore é preciso ainda cinco passos.

Dos dois esclarecimentos que ele recolheu, o primeiro era verdadeiro, o segundo era falso. Entretanto, qual dos dois camponeses é o que tem mais direito a seu reconhecimento?

CONCLUSÃO

Destas reflexões referentes ao método experimental empregado na física, poder-se-á muito bem deduzir conclusões; eu não quero reter mais que uma.

Destas reflexões referentes ao método experimental empregado na física, poder-se-á muito bem deduzir conclusões; eu não quero reter mais que uma.

Os metafísicos são levados, sobretudo em nossa época, a emprestar as leis da física para usá-las na edificação ou na ruína dos sistemas filosóficos. A fé, um pouco supersticiosa, que professam os homens de nosso tempo no poder e infalibilidade da ciência positiva, a reprovação freqüente e violentamente endereçada aos filósofos de permanecer afastados das conquistas dessa ciência, tudo contribui para fortificar essa tendência. Evitarei negar que ela seja, no fundo, legítima; mas ela é, seguramente, cheia de perigos para os que a ela se abandonam imprudentemente, e são esses perigos que eu desejo assinalar.

Que o filósofo evite considerar uma lei da física como uma verdade absoluta, compartilhando a certeza das proposições matemáticas das quais ela toma a forma. A física não conhece essas verdades absolutas. Ao tomar a linguagem dos matemáticos, longe de participar de sua infalibilidade, ela não pode enunciar suas leis na linguagem da álgebra e da geometria senão sob a condição de considerá-las como aproximadas.

Que o filósofo não considere jamais uma lei da física como uma verdade inabalável e ilimitada, que permanecerá eternamente verdadeira, que nunca encontra exceções; lei aproximada, com uma aproximação que nos satisfaz, mas que não satisfará mais nossos sucessores, toda lei da física aceita hoje está destinada a ser um dia rejeitada. Lei simbólica, que se aplica não à realidade, mas a um esquema bastante simples, toda lei da física é essencialmente provisória. O número de casos aos quais se aplica é sempre infinitamente pequeno comparado ao número de casos que lhe escapam, incessantemente, ela se modifica e se completa para abarcar os fatos que a desmentem, sem jamais esgotar as exceções.

Que, sobretudo, o filósofo não se esqueça desse caráter simbólico das leis da física. As grandezas que ligam as equações pelas quais essas leis se exprimem são apenas sinais. Para interpretar esses sinais, é preciso uma chave, chave complicada constituída pelas teorias físicas. O filósofo que quiser fazer uso das leis da física deve ter dessas teorias um conhecimento aprofundado. Na falta desse conhecimento, a significação que ele emprestar a essas leis não será mais que um contra-senso.