



O estilo científico de Einstein na exploração do domínio quântico (uma visão da relação entre a teoria e seu objeto)

Michel PATY



RESUMO

As primeiras pesquisas físicas de Einstein (principalmente aquelas do ano de ouro de 1905) concentraram-se em dois domínios que ele tratava independentemente: o domínio atômico e radioativo, de um lado, e a teoria eletromagnética, de outro. Posteriormente essas duas direções de pesquisa cristalizaram-se na direção da teoria quântica para a primeira, e das teorias da relatividade e do campo contínuo para a segunda. Pode-se discernir desde o início, ao seguir o trabalho de Einstein nessas duas direções (que ele conduzirá constantemente em paralelo), dois tipos de aproximações diferentes: uma, heurística, que põe em obra um método probabilista de investigação suscitado pela termodinâmica (cálculos de flutuações), tendo em vista caracterizar as propriedades específicas do novo domínio da física quântica; a outra, imediatamente *fundamental*, que organiza o trabalho teórico em torno de princípios físicos, em particular, de invariância. Esses dois modos de abordagem não correspondem a uma oposição entre duas atitudes de pensamento, empirista de um lado e teórico-racional do outro (como muitos comentadores quiseram crer, reportando-os a dois períodos distintos da obra de Einstein), mas a uma maneira diferenciada que lhe é própria de conceber o trabalho teórico, em função da inteligibilidade possível de seu objeto, em termos de conceitos e de princípios sempre pensados fisicamente. Essa maneira define o estilo próprio de Einstein enquanto pesquisador em física, ao mesmo tempo crítico e construtivo, que se constitui desde seus primeiros trabalhos.

PALAVRAS-CHAVE • Completude. Einstein. Teoria fundamental. Heurística. Forma matemática. Conceitos e princípios físicos. Física quântica. Estilo científico.

INTRODUÇÃO. UM CIENTISTA EM TRABALHO: O ESTILO CIENTÍFICO DE EINSTEIN

As primeiras pesquisas físicas de Einstein (principalmente aquelas do ano de ouro de 1905) concentraram-se em dois domínios que ele tratava independentemente: o domínio atômico e das radiações de um lado (ponho-os juntos por motivos de simplicidade em vista do que objetivo neste artigo, embora inicialmente também eles fossem

distintos),¹ a eletrodinâmica e o princípio de relatividade de outro lado.² Essa atitude difere daquela de outros cientistas que tratam desses problemas no mesmo período: ou eles consideravam apenas uma dessas direções (eletrodinâmica ou fenômenos de radiação ou constituição molecular da matéria), ou tentavam abarcá-los conjuntamente em uma perspectiva unificadora, considerando que todas essas direções revelam aspectos novos, e sem dúvida relacionados, da estrutura da matéria, tal como Paul Langevin em seu artigo de 1904 intitulado *La physique de l'électron*. Posteriormente, Einstein elaboraria a teoria geral da relatividade e procuraria por uma teoria unificada do campo que muitas pessoas considerariam como muito abstrata e matemática, especulativa e muito afastada do mundo físico ordinário. Ao mesmo tempo, Einstein criticaria alguns aspectos da teoria quântica e principalmente a “interpretação de Copenhague” dominante, críticas que muitos físicos consideraram como reflexo de uma preocupação metafísica ao invés de física. Em geral, os físicos (seguidos pela opinião pública), assim como os historiadores da ciência, compartilharam uma concepção recebida da atividade científica de Einstein segundo a qual ele começara como um empirista e continuou como um cientista especulativo e metafísico, declarando-se que o trabalho correspondente a esse último período foi estéril.³

De fato, as tendências das pesquisas contemporâneas na física mostram-se opostas a tais juízos. Por exemplo, o resultado decisivo obtido por John S. Bell, nos anos 1960, acerca da não-separabilidade na mecânica quântica (cf. os trabalhos de 1964 e 1966, in Bell, 1987; Paty, 1986), permitiu, com base no questionamento de Einstein e conscientemente inspirado por ele, esclarecer um aspecto da mecânica quântica que teria, sem isso, permanecido obscuro. Ou, em uma direção diferente, aquela da teoria das partículas e campos quânticos, ouvimos ontem Yang afirmar que o *insight* de Einstein sobre o problema de uma teoria do campo unificado tinha grande alcance e era inspiradora (cf. Yang, 2005). Esse juízo emana de um dos especialistas mais qualificados nesse domínio e eu desejo acrescentar que, de certo modo, a descoberta por ele e R. Mills das teorias de invariância de gauge generalizadas (não abelianas) (cf. Yang & Mills, 1964), que têm sido tão frutíferas, foi obtida por meio de uma investigação intelectual que relembra em certos aspectos o caminho seguido por Einstein, quando elaborava sua teoria da relatividade geral (cf. Einstein, 1916a). Em particular, permitindo, uma vez que se tenham formulado os princípios ou as exigências físicos, seguir o guia do formalismo matemático, deixando provisoriamente de lado o significado físi-

¹ Sobre os escritos científicos de Einstein no seu primeiro período e publicados em *Annalen der Physik*, cf. Renn, 2005a.

² Sobre essas contribuições de Einstein, ver Renn, 2005b; Cassidy, 2005.

³ Com matizes, este é também o julgamento de um físico informado e atento (porém com uma orientação bohriana forte) tal como Abraham Pais (cf. Pais, 1982).

co prévio das magnitudes envolvidas. As magnitudes adquirirão seu novo significado ou conteúdo físico efetivo (suas propriedades específicas) após o trabalho teórico-formal ter sido realizado. Desejo também observar de passagem que a constituição da própria mecânica quântica foi obtida através de um raciocínio do mesmo tipo (partindo do formalismo hamiltoniano da física clássica). Evocarei posteriormente como esse apelo à forma matemática para dirigir o pensamento físico apareceu em Einstein, em certo momento da evolução de seu pensamento, e constituiu desde então uma característica de seu “estilo” na física teórica.⁴

Esta última consideração antecipa aquelas que formularei em minha conclusão; retorno agora à diversidade de abordagens empregadas por Einstein para os problemas físicos ao início de suas investigações científicas (cf. Howard & Stachel, 2000; Paty, 2004b).

Com efeito, quando examinamos os trabalhos de Einstein, estamos em presença de um poder científico fortemente criativo, em ambos os “períodos” de sua juventude e de sua maturidade e velhice. Por toda sua vida, observamos uma atitude dupla de Einstein com respeito à física teórica, em todos os domínios que ele considerou: uma atitude *crítica* e uma *construtiva*. Observamos também uma preocupação fundamental pelo *físico*, em relação ao papel que Einstein atribuía à teoria física, a saber: representar (ou descrever) adequadamente a realidade e os fenômenos físicos.

Tal poder criativo não é realmente compatível com a mente de um “anarquista epistemológico” (sem um idéia ou critério definido acerca de onde quer chegar)⁵ e tampouco com um pesquisador empiricamente dirigido (desprovido de preocupação teórica geral, e motivado a encontrar soluções para fatos experimentais particulares). Ao contrário, ele se caracteriza por uma consistência interna de pensamento que corresponde a uma poderosa apropriação por sua própria mente daquelas teorias do mundo que são visadas ou que mostram sua insuficiência. Ou, em outras palavras, ele se caracteriza por uma exigência de inteligibilidade e por uma base idiossincrática definida que lhe fornece o quadro do pensamento (com uma forte preocupação racional). É por referência a esse estado de coisas que podemos falar de um “estilo científico” genuíno, que caracteriza todas as pesquisas de Einstein na física.

Investigaremos primeiramente as contribuições feitas por Einstein em 1905 à física com o propósito de saber se, além de seu conteúdo objetivo, elas podem informar-nos acerca de seu estilo científico e da natureza de suas preocupações físicas. Contrariamente a uma interpretação bastante comum que vê essas contribuições como uma

4 Sobre a noção filosófica de estilo científico, ver Granger, 1968; sobre o estilo de Einstein, ver Paty 1993, 1996b; sobre o estilo de Poincaré na física, ver Paty, 1996a.

5 Sobre o anarquismo epistemológico, ver Feyerabend, 1979; ver a crítica dessa concepção atribuída a Einstein (que inventou a palavra) em Paty, 1993, Cap. 8.

manifestação de uma atitude intelectual bastante “oportunista”, encontraremos na diversidade dos métodos em operação em seus artigos uma abordagem consistente. Pode-se ver muito facilmente que o objetivo de Einstein não era empírico, em nenhuma de suas contribuições iniciais, mas que ele tinha uma sólida preocupação teórica em vista de obter a inteligibilidade dos fenômenos, e não apenas sua reprodução modelar.

Esse estilo encontrava-se em construção em seus primeiros trabalhos e pode ser claramente caracterizado, como tentarei esboçar aqui. Isso não significa obviamente que ele não evoluísse conjuntamente com as formulações dos problemas e as realizações de Einstein. Um ponto marcante dessa evolução pode ser indicado, num dado momento de seu caminho em direção à teoria da relatividade geral, como ele próprio reconheceu: uma nova e decisiva apreciação do papel dinâmico da formulação matemática no pensamento físico diante de circunstâncias bem definidas (às quais já aludi). Mas, no geral, mesmo com essa mudança em mente (que ocorreu em 1912) (cf. Einstein, 1912; Paty, 1993, cap. 5), podemos identificar o estilo de pensamento de Einstein ao longo de toda sua vida de pesquisa. Tentaremos agora identificar suas principais características.

I ATITUDE EMPIRISTA OU PREOCUPAÇÃO FUNDAMENTAL? AS PRIMEIRAS ABORDAGENS

Einstein adotou bastante cedo em suas preocupações, desde seus primeiros artigos de pesquisa publicados, um ponto de vista fundacional acerca das teorias, a começar pela termodinâmica. Com efeito, sabemos de sua correspondência e dos manuscritos desse primeiro período, assim como de seus textos de reminiscências, que os aspectos fundacionais da eletrodinâmica estavam desde cedo dentre suas preocupações, produzindo mais questionamentos do que respostas. Seu interesse em algo tal como um “princípio de relatividade do movimento” (ainda não formulado nesses termos por ninguém) (cf. Paty, 1999b) pode ser visto em sua primeira escolha efêmera em favor da teoria eletromagnética de H. Hertz: o éter em movimento (totalmente arrastado na vizinhança de corpos em movimento) implica a relatividade do movimento para a óptica e o eletromagnetismo. Mas ele seria logo impressionado pela significação física da experiência de Fizeau que estabeleceu firmemente as condições de Fresnel correspondentes à idéia de um éter óptico em repouso absoluto; e chegou a conhecer, pela leitura do livro de Drude (por volta de 1902; cf. Drude, 1900), acerca da primeira teoria de Lorentz de 1895, que ele adotou quase imediatamente.⁶

Seus primeiros trabalhos publicados, antes do ano de 1905, tratavam essencialmente da termodinâmica, que lhe pareceu como exemplar para a teoria física, com sua

estrutura baseada em seus dois princípios gerais (tratava-se de princípios físicos: conservação de energia, aumento da entropia para os sistemas fechados e isolados). Apesar dessa preferência,⁷ ele não foi um proponente do energetismo (como Oswald, Mach ou Duhem); tampouco foi um partidário da “concepção eletromagnética do mundo”, compartilhada por um grupo numeroso e diverso (W. Wien, M. Abraham, o próprio H. A. Lorentz, P. Langevin, H. Minkowski), apesar de seu compromisso com a teoria de Maxwell; sendo desnecessário dizer que nunca se sentiu tentado pelo reducionismo mecanicista (como Hertz). Na realidade, a termodinâmica estava implicada de um modo ou de outro em todos os domínios da física pelos quais ele estava interessado. Poderemos ver isso diretamente através de seu interesse pela física molecular e radioativa, mas está também implicado, embora mais indiretamente, em sua abordagem da eletrodinâmica do ponto de vista dos princípios físicos, cuja inspiração se encontra no tipo de teoria que a termodinâmica era a seus olhos (a saber, uma teoria estrutural “de princípios”).

Seu trabalho com a termodinâmica começou com um questionamento crítico da teoria, do ponto de vista de seu significado físico e de suas fundações. Escolheu como a proposição mais importante e eficiente da termodinâmica a fórmula de Boltzmann que implicava a segunda lei.⁸ Essa fórmula, que Einstein chamaria freqüentemente “princípio de Boltzmann”, relaciona, para um dado sistema físico, sua entropia e a probabilidade do estado no qual se encontra o sistema. Observou, em 1903 (cf. Einstein, 1903), em um artigo devotado à termodinâmica e à teoria cinética, que essa formulação era, entretanto, um tanto defeituosa, pois a definição da probabilidade, tal como usualmente assumida (por exemplo, por L. Boltzmann e M. Planck), pela contagem de combinações (no caso de um dado volume de gás molecular repartido em células diferentes), não era realmente física. Propõe, de modo a transformar esse significado aritmético em significado físico, modificar a definição de probabilidade identificando-a à freqüência no tempo: a freqüência no tempo para que o sistema esteja no estado considerado (isto é, a freqüência das ocorrências desse estado no curso do tempo). A probabilidade como freqüência permite a atribuição de um significado físico à probabilidade, de fato, um significado estatístico: fornece uma informação estatística acerca do

6 Para uma descrição mais detalhada e referências aos autores mencionados, bem como para estudos sobre eles, remeto a minha própria análise (Paty, 1993, Cap. 2-4). A ênfase de Einstein na experiência de Fizeau era também a posição de Lorentz e de Poincaré (cf. Paty, 1993, 1999b).

7 Preferência compartilhada por um certo número de físicos e químicos da época, como Pierre Duhem (Duhem enfatizava também a importância dos princípios para uma teoria física, tomando como exemplo a termodinâmica; cf. Duhem, 1906).

8 *As Lições sobre os gases* (Boltzmann, 1896-8) foi um dos livros cujo estudo Einstein privilegiou quando estudante (cf. Einstein, 1949).

estado de um sistema (termodinâmico) que evolui no tempo. A interpretação estatística da probabilidade foi a maneira de Einstein considerá-la em um sentido físico. Ele manteria, desde então, imutável essa concepção de probabilidade e, em particular, na física quântica, onde a probabilidade teria um papel central.

Esse significado físico da probabilidade teve nas mãos de Einstein uma consequência imediata, a obtenção de um instrumento teórico para estudar as propriedades físicas do domínio sob investigação, pois considerar as *frequências* dos estados de um sistema significa considerar os *valores médios* das magnitudes variáveis que descrevem esses estados e, conseqüentemente, também seria *físico* considerar as *flutuações* dessas magnitudes em torno de seus valores médios. Essas flutuações físicas das magnitudes poderiam indicar alguns aspectos subjacentes dos fenômenos relacionados aos estados do sistema. Devemos admitir que esse instrumento teórico para penetrar mais profundamente no entendimento dos fenômenos físicos que escapam a observação imediata foi o resultado de uma preocupação teórica fundamental acerca da física. Provém do desejo de estabelecer um vínculo entre a termodinâmica e a teoria cinética. Einstein já pensava naquela época em dois usos possíveis do “instrumento das flutuações”: a constituição atômica e molecular da matéria, incluindo a explicação do movimento browniano; e o comportamento da radiação, quando se considera um “gás de radiação”.

Einstein fará, de 1905 a 1925, um uso extenso desse instrumento de investigação por ele inventado, com conseqüências frutíferas. Obteve a possibilidade, por meio da derivação de relações adequadas, de colocar em evidência a “realidade molecular” (isto é, a existência de átomos como entidades físicas): o cálculo das flutuações para as distribuições espaciais implicava relações entre as dimensões moleculares e as trajetórias livres médias em termos do número de Avogadro e da constante de Boltzmann, proporcionando em particular a explicação teórica do movimento browniano, graças às observações extremamente precisas de Jean Perrin (cf. Einstein, 1905a; Perrin, 1950 [1909]; Renn, 2005b). E aplicando sua concepção da probabilidade física estatística às flutuações dos fenômenos de radiação, Einstein foi capaz de mostrar novas, e algumas vezes aparentemente estranhas, características dos *fenômenos quânticos*, tais como a quantização da energia de radiação (cf. Einstein, 1905b), a incompatibilidade da quantização com a continuidade da teoria eletromagnética da radiação e a necessidade de modificar essa teoria (em 1906), a extensão da hipótese quântica às transições de energia atômica que conduziu à lei correta dos calores específicos (em 1907), o comportamento onda-partícula da energia de radiação (cf. Einstein, 1909), a evidência da impulsão de radiação (que permitiu considerar de modo completo o comportamento onda-partícula da própria radiação, ao final do ano de 1916, cf. Einstein, 1916b), a derivação da “estatística” de Bose-Einstein para a radiação e os gases monoatômicos

(em 1924-1925), que convergia com o resultado obtido ao mesmo tempo por L. de Broglie acerca do comportamento ondulatório dos corpúsculos (cf. Broglie, 1925).

Por esse uso da termodinâmica como uma teoria fundamental que implica um meio heurístico de obter algum conhecimento daquela matéria que escapa à percepção (direta), Einstein estabeleceu algumas características físicas fundamentais que serviriam, aumentadas pelos trabalhos de outros físicos, como uma base para elaborar uma primeira tentativa de teoria quântica, de cuja necessidade ele era bem consciente (chamando a atenção para isso desde 1906): ele a formulou em 1916. É evidente que em todas essas elaborações, seja pelos fins visados seja pelos métodos usados, Einstein tinha uma sólida visão teórica e conceitual, de modo que dificilmente pode ser considerado como um empirista.

Essa é também a conclusão que pode ser enunciada quando se considera seus trabalhos do mesmo período acerca de outros capítulos, mais “clássicos”, da física, tais como a mecânica, a óptica e o eletromagnetismo (e, posteriormente, a gravidade). Essas teorias da matéria já estavam dadas e eram razoavelmente bem desenvolvidas, mas mostravam insuficiências e limitações, por exemplo, quando era necessário combiná-las de modo a dar conta da óptica e da eletrodinâmica dos corpos em movimento (sendo a mecânica a ciência do movimento). Aqui, como mencionamos, a termodinâmica forneceu a Einstein um guia para a reforma de todas as três teorias, inspirando o modelo de uma “teoria de princípios” (isto é, uma teoria cujos conceitos estão relacionados e estruturados por princípios físicos fundamentais) (cf. Einstein, 1946; Paty, 1993, Caps. 2-4, 9). A maneira de Einstein obter a reformulação dessas teorias é, também aqui e mais do que em qualquer outro lugar, o contrário de uma abordagem empirista: seu principal problema era determinar quais princípios físicos (propriedades gerais dos fenômenos desses domínios) seriam suficientemente sólidos para sustentar toda a arquitetura teórica.

Em nenhum de seus trabalhos científicos, mesmo os do período inicial (em nenhum de seus três artigos de 1905) (cf. Einstein, 1905a, 1905b, 1905c), Einstein toma um simples fato para iniciar a investigação e nunca formula o problema tendo em vista a procura de um modelo particular, em oposição ao que sugerem freqüentemente os comentadores que põem a ênfase em suas descobertas da “explicação do movimento browniano”, do “efeito fotoelétrico” etc. De fato, nos vários domínios considerados, ele tentou chegar a um *insight* dos aspectos conceituais e de princípio, característicos dos fenômenos correspondentes.

Quando atacou os problemas da teoria eletromagnética, Einstein tentou claramente formular um ponto de vista fundamental (de princípio), com base na teoria do elétron de Lorentz de 1895 (cf. Lorentz, 1895; Einstein, 1905c), considerando a eletrodinâmica, a óptica e a mecânica conjuntamente e formulando para elas o princípio de relatividade.

Ele julgava que essa apreensão teórica englobante era possível e era sugerida pelos fenômenos dos três domínios cujas teorias deveriam ser compatíveis a esse respeito. Subjacente a essa posição estava a concepção metateórica da necessária adequação completa da representação teórica com o comportamento fenomênico, tomando especialmente a indução eletromagnética como um fenômeno geral que revelava o cerne profundo das propriedades eletromagnéticas da matéria. A indução eletromagnética foi de fato o primeiro fenômeno geral que Einstein invocou no início de seu texto de 1905 sobre *A eletrodinâmica dos corpos em movimento* (Einstein, 1905c). Ela havia sido mostrada por Faraday em seu trabalho sistemático sobre as relações entre os campos elétrico e magnético, sobre as quais o próprio Einstein fez repetidamente experimentos no laboratório durante seus anos de estudante e aplicou em seu trabalho técnico no Escritório de Patentes de Berna, e era diretamente expressa nas equações eletromagnéticas de Maxwell.

Esse fenômeno, tal como manifestado nos experimentos (a produção de uma corrente num circuito elétrico fechado quando este último é posto em movimento relativamente a um ímã), exibia a relatividade do movimento, de modo similar aos fenômenos ópticos e mecânicos. Isso significava para Einstein que a relatividade do movimento devia ser considerada como uma propriedade fundamental geral da natureza e deveria adquirir o *status* correspondente na física teórica, isto é, o *status* de um princípio. Essa posição consistia em colocar-se na “*perspectiva dos princípios*” acerca da teoria relevante e indicava a direção na qual a teoria eletromagnética de Maxwell e Lorentz devia ser modificada segundo Einstein. A “*perspectiva dos princípios*”, à qual acabamos de referir, corresponde a uma apreensão sintética de muitos fenômenos similares e portadores de um mesmo significado ou conteúdo físico que poderia ser expresso como uma lei física geral ou um *princípio físico*. Notamos uma tendência, no modo de pensar de Einstein acerca dos fenômenos físicos, aqui e a partir de seus primeiros trabalhos termodinâmicos, em adotar um ponto de vista fundamental, inquirindo diretamente as teorias em seu domínio de validade e confrontando-as (em 1903, a termodinâmica e a teoria cinética do gases, em 1905, o eletromagnetismo e a mecânica), ao invés de um interesse por resultados empíricos peculiares e “*modelização*”.

A aparente relatividade do movimento para os fenômenos eletromagnéticos tem correspondência com a aparente relatividade dos fenômenos ópticos evidenciados na óptica e na astronomia (ambas estavam em contradição com o conceito de éter imóvel) e com a relatividade dos movimentos puramente mecânicos, aceita há muito tempo e que tampouco concordava conceitualmente com o espaço e tempo absoluto newtoniano; a relatividade na mecânica estava funcional e formalmente fundada no conceito de causalidade física, expressa por equações diferenciais de segunda ordem (pois a primeira ordem já era governada pelo princípio de inércia) (Einstein, 1927; Poincaré, 1905. Cf. Paty, 1987, 1999b, 2004a).

A formulação original de Einstein para a dificuldade ou para o caráter não satisfatório da teoria (a teoria eletromagnética nesse caso) conduziu-o a uma reforma da teoria. Na verdade, a teoria a ser modificada não era somente a teoria eletromagnética, mas esta última juntamente com a teoria da mecânica clássica; mas isto aparece como uma condição conseqüente, advinda do “problema da velocidade”: colocar a teoria eletromagnética em conformidade com o princípio de relatividade significava fixar a velocidade da luz no vácuo como uma constante dos movimentos inerciais em todas as direções e, portanto, abandonar a adição galileana clássica de velocidades e modificar a lei de composição das velocidades de tal modo a preservar a constância da velocidade da luz (isto é, sua unicidade, independente dos movimentos do referencial). Quando se tornou consciente dessa necessidade, Einstein formulou a solução do problema como uma reforma conjunta da teoria eletromagnética e da mecânica, por meio de uma harmonização de seus princípios físicos fundamentais: o princípio de relatividade para a segunda, o princípio da velocidade da luz para a primeira. Obteve essa harmonização tornando físicos os conceitos-magnitudes de espaço e tempo, como mencionamos anteriormente. Note-se aqui que enunciar a relatividade do movimento na mecânica como um princípio físico significava uma certa liberdade de espírito com relação ao espaço absoluto e para isso as lições de Mach e as conferências de Poincaré foram, sem dúvida, úteis. Note-se também que o próprio Poincaré tinha *essa* liberdade de espírito, pois havia falado, um ano antes, do “princípio de relatividade” da mecânica (cf. Poincaré, 1904).

A solução notável imaginada por Einstein para livrar-se da “contradição aparente” entre seus dois princípios foi a de tornar físicos o espaço e o tempo, para com isso submetê-los aos dois princípios físicos gerais que ele tinha formulado. Um ingrediente de sua elaboração era a realização da sincronização entre as coordenadas espaciais e os tempos em ambos os sistemas de referência em movimento mútuo. Para esse propósito ele podia vincular a sua própria familiaridade técnica com o assunto, que pertencia de algum modo à “cultura material” da época, mas para a qual ele devia também inovar, pois tinha de considerar os sistemas referenciais que não mais estavam em repouso absoluto, mas em movimento relativo.

Contudo, mesmo para o caso da teoria da relatividade especial, muitos comentaristas afirmaram que a elaboração do jovem Einstein era o fruto de uma mente de orientação empirista, colocando a ênfase (no caso da relatividade especial) em uma suposta posição operacionalista com respeito à redefinição dos conceitos de espaço e tempo. Mas esqueceram-se de dois fatos. Primeiro, o raciocínio de Einstein não se deu primariamente sobre o espaço e tempo, mas sobre a formulação teórica correta e apropriada das teorias acima mencionadas e a necessidade de modificá-las e reformulá-las, particularmente a teoria eletromagnética (para pôr a teoria eletromagnética dos

corpos em movimento em concordância com os fatos experimentais gerais e livrá-la de contradições). Segundo, quando Einstein entendeu que a solução do problema eletromagnético era uma redefinição do espaço e tempo enquanto magnitudes físicas (de modo a obter uma concepção de velocidade que estaria em concordância com o “princípio da luz” (isto é, o princípio da constância da velocidade da luz no vácuo independentemente do movimento de sua fonte), essa decisão teórica lhe sobreveio como a necessidade de tratar com *conceitos* verdadeiramente *físicos* (e não primeiramente da preocupação de medição).

Para tornar esses conceitos físicos, e não meramente matemáticos como eram na mecânica newtoniana e clássica, e daí para a física clássica, ele teve a idéia de submetê-los a condições físicas universais tais como os dois princípios físicos que tinha delineado desde o início (o princípio de relatividade para os sistemas inerciais e o “princípio da luz”, este último como expressão da parte mais sólida da teoria eletromagnética, que permaneceria após a reforma da teoria). A partir daí estudou o significado físico de magnitudes tais como as coordenadas espaciais e o tempo, considerando-as em sistemas referenciais em movimento relativo e relacionando-os por meio de processos de sincronização entre esses sistemas. É inapropriado reduzir tal raciocínio mental acerca do significado físico das magnitudes teóricas a um enunciado puramente empírico acerca da *mensuração* do espaço e do tempo por meio de procedimentos instrumentais.

Pode-se, ao contrário, caracterizar a via de Einstein para a teoria especial da relatividade como uma via teórica fundamental e opor-lhe, como muito mais empíricas (de fato, semi-empíricas), as abordagens correspondentes (e simultâneas à abordagem einsteiniana) dos problemas da eletrodinâmica de Lorentz e Poincaré (cf. Lorentz, 1904; Poincaré, 1905, 1906; Paty, 1993, Cap 2; 1996a, 1996b). Elas partiam, tal como Einstein o fazia de sua parte, da teoria dos corpos em movimento de Lorentz de 1895, e tentavam ajustá-la ao resultado negativo da experiência de Michelson-Morley acerca do vento de éter, adotando (empiricamente) uma fórmula conveniente de transformações de coordenadas (a mesma fórmula era, ao contrário, inteiramente deduzida por Einstein a partir de suas proposições iniciais). Para sumariar em uma sentença as diferenças entre essas duas abordagens com os respectivos resultados obtidos, dir-se-ia que a via semi-empírica de Lorentz e Poincaré concluía com a formulação de uma *eletrodinâmica relativista*, enquanto a via conceitual e princípio-teórica de Einstein desenvolvia uma *teoria da covariância* como uma *condição para a dinâmica*. (Na realidade, pareceu posteriormente a Einstein que a dinâmica da gravitação não a respeitaria, o que obrigaria a generalizar a condição de covariância dos movimentos inerciais para todo tipo de movimentos acelerados.) (cf. Einstein, 1907; Paty, 1993, Cap. 5).

2 CARACTERÍSTICAS DO ESTILO CIENTÍFICO DE EINSTEIN:

O INTERESSE EM CARACTERIZAR O QUE É FÍSICO

(ESPECIFICIDADE DOS FENÔMENOS, CONCEITOS E PRINCÍPIOS FÍSICOS)

Resumamos neste ponto algumas características do estilo científico de Einstein tal como ele se configura do que precedeu. Existe, primeiramente, um *interesse* genuíno e essencial *pelo que é físico* e o propósito de tornar explícito o caráter físico dos *conceitos* (na forma de magnitudes), assim como dos princípios e conseqüentemente da teoria que trata desses conceitos e princípios. Outro aspecto característico, que torna o primeiro efetivo, é a preocupação prioritária por uma abordagem conceitual e teórica apropriada guiada pela especificidade dos fenômenos do domínio considerado.

Nos domínios dos átomos e das moléculas e da radiação, Einstein desenvolveu suas pesquisas com a ajuda do instrumento teórico que indicamos acima. Pode-se dizer que sua abordagem nesses domínios era uma “abordagem heurística”, emprestando a própria expressão de Einstein em seu primeiro artigo sobre a radiação: “De um ponto de vista heurístico (...)”. É útil enfatizar o fato de que esses domínios da física correspondem a entidades e fenômenos que escapam a percepção imediata pelos sentidos. Quando se lida com eles, costuma-se idealizá-los pelo uso de conceitos matemáticos (por exemplo, na mecânica dos fluidos ou mecânica dos “meios contínuos”, que posteriormente recebeu o nome de “física da matéria condensada”. Esse era, tradicionalmente, o domínio do cálculo diferencial com derivação parcial e da “física matemática”. A divisão ao infinito era uma convenção que operava dentro de limites que não se manifestaram até a introdução dos *quanta*. À abordagem continuísta, acabou por opor-se a descontinuidade.⁹ O problema nesses domínios era o de como lidar teórica e conceitualmente com as novidades recém-chegadas (os *nouveau venu*).

Para o domínio quântico (que inclui a estrutura atômica e de radiação da matéria), todas as características atribuídas aos fenômenos com base nas variações de entropia e nos cálculos de flutuações (ver a seção precedente) são definitivamente *características físicas* (quanto às flutuações, elas foram calculadas como físicas, considerando-se as magnitudes dadas e suas distribuições em torno de seus valores médios). Assim, são características físicas a energia de quantização, os calores específicos, o comportamento onda-partícula da luz, considerando a energia e, posteriormente, também a impulsão. A evidência para a impulsão da radiação (tal como obtida na primeira teoria quântica de Einstein de 1916, cf. 1916b) era de importância particular com res-

⁹ Sobre a descontinuidade quântica, as equações diferenciais e a probabilidade, ver as discussões muito interessantes da Conferência Solvay de 1911 e as considerações respectivas de Paul Langevin, Henri Poincaré e Albert Einstein (Broglié & Langevin, 1912; Poincaré, 1912; Langevin, 1913; cf. Paty, 2002).

peito à caracterização dos fenômenos quânticos. Conduziu diretamente a predições acerca da possibilidade de ter a luz dispersada em elétrons atômicos, de acordo com um comportamento corpuscular com conservação da energia de impulsão, tal como verificado pelo experimento de Compton, em 1923, e pelos experimentos de Geiger e Bothe, em 1925 (cf. Bothe & Geiger, 1925); estes últimos experimentos exibiam correlações entre o fóton e o elétron emitidos pela colisão, evidenciando o caráter individual (no sentido de singular) do processo, contrariamente a uma interpretação puramente coletiva e estatística tal como na teoria de Bohr-Kramers-Slater (cf. Bohr, Kramers & Slater, 1924). Incidentalmente, podemos encontrar o requerimento de Einstein, já nesse estágio, de que os fenômenos quânticos sejam referidos a entidades individuais singulares (Einstein, 1926; cf. Paty, no prelo), mesmo se os fenômenos somente podem ser levados a nosso conhecimento através de resultados experimentais estatísticos, pois os indivíduos escapam a nossa percepção sensorial.

Na eletrodinâmica, na óptica e na mecânica, os fenômenos físicos revelam um comportamento comum: a relatividade do movimento, concebida como uma propriedade física universal, um princípio físico. É um requisito que o espaço e o tempo, enquanto magnitudes das quais as outras magnitudes, e particularmente as dinâmicas, são funções, sejam físicos e, por isso, que se submetam aos dois princípios físicos básicos.

Também com a relatividade geral, o problema em discussão já havia sido enunciado desde 1907 por Einstein em termos físicos. Novamente, como no caso da teoria especial, dois princípios, reivindicados como *físicos*, foram propostos. O primeiro é a generalização do princípio de relatividade (ou de covariância), considerado até então para os movimentos lineares e uniformes (inerciais), para todos os tipos de movimentos acelerados: a justificação desta generalização era que não existe na natureza uma coisa tal como sistemas inerciais, pois estes são definidos como inerciais somente por nossa situação relativa com respeito a movimentos mais gerais. Esse argumento aparece não tanto como um argumento teórico, mas como metateórico ou epistemológico (como tinha consciência o próprio Einstein) e pode ser entendido como uma consideração de tipo copernicano, baseada numa visão realista (não-subjetiva) do mundo.

Note-se, a esse respeito, que no pensamento científico clássico, do século xvii até o início do século xx, o privilégio dos sistemas inerciais era devido a uma interpretação do princípio de inércia segundo uma concepção geral de “movimento natural” (expressa por d’Alembert no século xviii: Alembert, 1758[1743]): considerava-se como tal aquele movimento cuja expressão em função do tempo é a mais simples (linear). Pode-se dizer que, ao abandonar o privilégio dos sistemas de referência inerciais, Einstein estava abandonando a idéia de “movimento natural” como uma referência absoluta, por assim dizer, pois a idéia de movimento é, em geral, sempre relativa. A “naturalidade” do movimento não correspondia à objetividade procurada pela física,

mas à escolha antropocêntrica de um ponto de vista localizado e particular. Pode-se também dizer, retrospectivamente, que uma tal perspectiva impunha uma situação muito estreita até então no Universo para o homem e seu conhecimento, limitada pela mecânica celeste ao interior do Sistema Solar: agora procurava-se as propriedades mais gerais dos movimentos que poderiam ser consideradas em qualquer lugar do espaço. Juntamente com o impulso que seria posteriormente dado pelo “princípio de Mach”, tal como formulado por Einstein (cf. Paty, 1993, Cap. 5), esse primeiro pensamento sobre a relatividade geral contribuiu para preparar o caminho para uma cosmologia científica (cf. Paty, 2004c).

O segundo princípio, invocado para formular a teoria da relatividade geral, é o “princípio de equivalência” entre um campo gravitacional uniforme e um movimento uniformemente acelerado, em conformidade com a lei galileana da queda livre dos corpos e adequado à teoria da gravitação clássica newtoniana, por meio da notada igualdade das massas inercial e gravitacional. Em ambas as formulações, galileana e newtoniana, isso era um fato físico; Einstein o estendeu ao estatuto de um princípio (físico), ao transformar a igualdade ($m_i = m_g$) em uma identidade ($m_i = m_g$).

3 ABORDAGENS TEÓRICAS DIVERSIFICADAS SEGUNDO A ESPECIFICIDADE DO DOMÍNIO

Pode-se caracterizar a abordagem teórica escolhida por Einstein como uma preocupação com a adequação entre a teoria, ou o tipo de aproximação teórica, e as propriedades físicas dos fenômenos ou dos sistemas considerados. Nas contribuições do ano de 1905, temos, de um lado, o artigo sobre o “princípio” de relatividade e, de outro lado, o ponto de vista “heurístico” sobre a radiação, que seria continuado depois em todas as contribuições de Einstein no domínio quântico. E, após a constituição da mecânica quântica que ocorreu por volta de 1926-1927, seu modo de questionar a correção dessa teoria segue claramente as mesmas linhas, questionando o princípio de incerteza e finalmente os subsistemas correlatos do experimento de pensamento EPR como um modo de saber se a mecânica quântica é capaz de descrever sistemas individuais.

O contraste entre suas várias abordagens de 1905 parece retrospectivamente, portanto, a primeira manifestação de seu tratamento bastante diferenciado respectivamente do domínio quântico e do domínio do campo contínuo.

Um argumento de teste em favor da diversificação consciente dos modos teóricos na maneira de Einstein é oferecido por sua conceitualização da radiação de energia quântica. Esse conceito foi obtido por ele em seu esforço “heurístico” do artigo de 1905, acarretando a relação $E = h\nu$ (Einstein, 1905b). Essa relação propunha (1) a propor-

cionalidade entre a energia e a frequência da onda de radiação, e (2) seu caráter discreto (descontínuo) por meio da bem definida constante de proporcionalidade de Planck. Se o segundo aspecto é específico do domínio quântico da matéria, e incompatível com a onda contínua da teoria eletromagnética (contínua para a energia, a frequência e a propagação progressiva no espaço), o primeiro pode ser considerada para ambos, o contínuo e o descontínuo, de fato, na teoria da relatividade especial, a energia e a frequência de onda para um dado sistema físico possuem as mesmas transformações de Lorentz de coordenada-e-tempo. Einstein notou efetivamente este último fato em seu artigo de 1905 sobre a relatividade (Einstein, 1905c), mas não mencionou que tal comportamento similar estava em concordância com a proporcionalidade entre E e ν obtida poucos meses antes em seu artigo “heurístico” sobre a radiação. Pode-se inquirir por que ele não o mencionou, embora obviamente o tivesse notado. Ele poderia simplesmente ter observado, após iniciar as fórmulas de transformação para essas duas magnitudes e fazer referência a seu artigo anterior, que a razão E/ν não é afetada na transformação de um sistema de referência inercial a outro sistema em movimento relativo com o primeiro, isto é, é uma invariante de movimento, uma constante. Ele poderia ter referido a seu artigo “heurístico” sobre a quantização, dizendo que esses dois resultados ($E/\nu = const.$ e $E = h\nu$) eram conjuntamente consistentes. Mas não o fez.

Ele não o fez em 1905, mas sim em 1909, em um artigo apresentado ao Congresso de Salzburg dos Físicos Alemães (cf. Einstein, 1909). De fato, não há nada mais, conceitual e teoricamente, acerca da energia e da frequência, no artigo de 1909 do que aquilo que já estava presente no artigo de 1905 sobre a relatividade. Mas, em verdade, existia uma diferença conceitual entre ambos. O artigo de Salzburg era explícita e intencionalmente dedicado ao problema da radiação eletromagnética do duplo ponto de vista da teoria da relatividade e das concepções quânticas.

O silêncio de Einstein em seu artigo de 1905 sobre a relatividade acerca da proporcionalidade entre a energia e a frequência para a radiação luminosa enquanto consistente com seu resultado heurístico previamente obtido pode ser referido a uma “característica de estilo”, considerando seu “estilo científico” particular: uma abordagem heurística, tal como aquela que ele propunha, para obter alguns *insights* a respeito da natureza da radiação, e uma abordagem fundamental tal como aquela de sua teoria da relatividade especial (que ainda não tinha adquirido esse nome) deveriam ser distinguidos e não misturados, a menos que sejamos compelidos pelas circunstâncias a fazer isso.

Deve-se considerar também outros aspectos do pensamento e do trabalho de Einstein acerca dos fenômenos físicos e do tipo de abordagem teórica que lhes é apropriada, os quais mostrariam o quanto as concepções “metateóricas” de Einstein esta-

vam realmente governadas pela exigência de adequação da representação e da explicação teóricas a seu objeto considerado em bases racionais. Dois deles são marcantes a esse respeito e aqui somente os evoco, expondo em poucas palavras seu objetivo e significado e remetendo aos estudos mais detalhados.

O primeiro aspecto, que comparece em seus esforços em ambos os domínios do campo contínuo e dos *quanta* de matéria, é o conceito de “completude” teórica física, com um significado específico da palavra para cada tipo de teoria, em concordância com o propósito e as modalidades. A completude, no “sentido estrito”, ou “forte”, corresponderia a uma causalidade imanente “absoluta” e seria procurada nos avanços ulteriores da teoria geral da relatividade e da teoria do campo unificado, como minimizando o conjunto de parâmetros arbitrários independentes (cf. Paty, 1993, Cap. 9; 1988b). Dever-se-ia esperar uma completude em “sentido fraco” de uma teoria quântica correta, ainda que provisória, a qual poderia servir como uma base conceitual e teórica para avançar na perspectiva da unificação teórica, e isso é o que se explora no argumento EPR sobre as correlações quânticas dos subsistemas. O problema em jogo, para Einstein, era a possibilidade, ou a negação *a priori*, da descrição teórica do evento (ou sistema) físico individual (cf. Paty, 1986, 1988b, 1995; para o argumento EPR: Einstein, Podolski & Rosen, 1935; Einstein, 1948, 1949a, 1949b; Paty, 1986). Podemos referir a completude no primeiro sentido à completude para uma teoria de “princípios”; e no segundo sentido à completude para uma teoria construtiva, sentido que seria aquele que, para Einstein, a teoria quântica poderia pretender no melhor dos casos.

O segundo aspecto está relacionado à estratégia teórica para o uso da matemática na física e, particularmente, ao arrastamento exercido pela forma matemática sobre o pensamento físico, tal como Einstein o experimentou pela primeira vez durante a elaboração de sua teoria da relatividade geral. De modo a superar a insuficiência do pensamento teórico quando conceitos inteiramente novos estão em jogo, decidiu pôr de lado o conteúdo físico prévio desses conceitos – a saber, distâncias e durações pensadas classicamente e suas referências clássicas (“espaço e tempo de referência” sobre distâncias euclidianas e variações temporais uniformes) – e permitir que a forma matemática dada ao problema (físico) siga seu próprio desenvolvimento, independentemente do conteúdo físico, para satisfazer a exigência formal (a expressão da covariância geral); recuperando no final um novo conteúdo físico dado pela nova estruturação dos conceitos obtidos como consequência, o qual pode ser colocado em correspondência com fenômenos físicos que escapavam antes ao alcance teórico.

4 O PROGRAMA FUNDAMENTAL DE EINSTEIN

De modo geral, a partir do estabelecimento da mecânica quântica (que pode ser datado em 1926-1927), duas teorias paralelas se estabeleceram para a nova física: a teoria da relatividade geral e a teoria quântica, esta última com o nome geral de mecânica quântica que ainda expressa seu quadro formal e conceitual (a partir do qual emergiu a teoria quântica do campo, a teoria dinâmica dominante nas últimas três décadas, graças ao advento das teorias de invariância de gauge). Para Einstein, ambas correspondiam ao “poder impositivo dos fatos”, mas nenhuma das duas era suficiente e definitiva: ambas deviam ser consideradas apenas como aproximações, tal que toda teoria futura teria que levar em consideração seus resultados e suas lições (cf. Paty, 1995).

Essas duas teorias eram incompatíveis do ponto de vista conceitual. O problema era, então, para Einstein, o de saber quais são os fundamentos seguros que se deve considerar para a elaboração de uma teoria unificada da matéria realmente satisfatória. O argumento EPR tinha, com respeito a uma tal interrogação, uma função bastante central. Para Einstein, mostrava que a mecânica quântica não podia servir como a base a partir da qual continuar, porque era incapaz de descrever os sistemas individuais, embora tenhamos evidência da existência ou realidade física desses sistemas. Ao contrário, a “interpretação de Copenhagen” negava qualquer significado à consideração dos sistemas individuais, tendo em vista sua pressuposição observacionista. Convém notar a esse respeito que os desenvolvimentos posteriores da física quântica, até os mais recentes, embora contradissem a exigência einsteniana de separabilidade local, mostraram que as características quânticas, qualquer que seja sua expressão exata (mesmo hoje imersa nas ambigüidades da “interpretação”), devem ser atribuídas a *sistemas físicos individuais*, dando uma resposta positiva à exigência de Einstein (que referia a esses sistemas quando exigiu que alguma *realidade física* fosse o objeto ou propósito da descrição teórica). Correlações, nos experimentos de tipo EPR (enquanto manifestação do emaranhamento quântico),¹⁰ assim como as interferências que os fenômenos produzem nos feixes rarefeitos de partículas ou radiações quânticas (tais que apenas uma partícula interfere consigo mesma), evidenciaram essa característica, em contradição com a proibição da interpretação de Copenhagen. Mas, por outro lado, sistemas quânticos, como foi mostrado, são inseparáveis (Paty, 1988a, 1999a, 2000, 2002, 2003).

De qualquer modo, todas as interrogações de Einstein nesse estágio diziam respeito ao tipo de teoria fundamental da matéria que se devia considerar. Para ele, qualquer futura teoria da matéria deveria integrar as características indicadas pela física

¹⁰ Ver os dois trabalhos famosos de John S. Bell de 1962 e de 1964: cf. Bell, 1987; Clauser, Horne, Shimony & Holt, 1969; Aspect, 1983.

quântica (por assim dizer, a física quântica deveria ser considerada no nível fenomenológico). Ele tinha a esperança de que a direção do conceito de campo contínuo (com uma teoria unificada da gravitação e outras interações na linha da teoria da relatividade geral) forneceria algum tipo de relação de superdeterminação, que corresponderia às condições quânticas.¹¹

5 OBSERVAÇÕES FINAIS ACERCA DA SITUAÇÃO PRESENTE CONSIDERANDO O QUESTIONAMENTO DE EINSTEIN

Para concluir, desejo evocar a situação atual, não da teoria física, mas do questionamento de Einstein sobre o estatuto teórico respectivamente do campo contínuo (ou relatividade geral no sentido extenso) e da teoria quântica. Ambas são incompletas no sentido pleno de completude acima apresentado. Mas a teoria da relatividade geral é completa no sentido fraco (ou parcial) de completude: ela descreve sistemas individuais (tais como uma partícula em seu campo) e essa capacidade é proporcionada por seus conceitos e princípios físicos definidos. De um ponto de vista einsteniano, suas modificações poderiam ser tomadas mudando-se seus princípios, os quais, como resultado, implicarão mudanças em seus conceitos-magnitudes.

Por outro lado, na concepção de Einstein, a mecânica quântica é incompleta tanto no sentido pleno quanto no sentido fraco. Não ser completa no sentido fraco significa que ela não poderia nem mesmo descrever os sistemas físicos individuais: ela dá apenas indicações heurísticas, mas nenhum princípio físico fundamental e nenhum conceito sólido. A mecânica quântica mostrou que os conceitos clássicos são insuficientes, mas, de acordo com Einstein, ainda não possuímos conceitos quânticos apropriados, isto é, conceitos quânticos físicos (diferentes dos clássicos, mas que poderiam ser apreendidos, finalmente, como aqueles a que nos acostumaremos, em uma espécie de via intuitiva dirigida para os fenômenos físicos).

De minha parte, discordando nesse ponto de Einstein, eu diria que hoje podemos considerar que dispomos de *magnitudes ou de conceitos quânticos físicos apropriados*, mas dotados de uma forma matemática diferente das formas usuais (funções com valores numéricos), tais como as funções de estado do espaço de Hilbert, os operadores lineares com valores próprios etc. (Essa diferença é a razão pela qual muitas pessoas hesitam em reconhecê-los como conceitos apropriadamente *físicos*). Apesar dessa forma pouco usual, que os afasta ainda mais dos conceitos e magnitudes clássicos e

¹¹ Einstein [1923] é a sua única comunicação pública sobre o assunto, a qual não raro comenta nas cartas a colegas (Einstein & Born, 1969; Einstein & Besso, 1972; Cartan & Einstein, 1979 etc.). Ver Stachel, 1986; Paty, no prelo.

“diretamente observáveis”,¹² essas entidades não são puramente matemáticas, elas são de fato *físicas*, pois contêm ou implicam, através dessa mesma forma (e particularmente pelo princípio de superposição dos vetores de estado), as relações específicas que correspondem às propriedades quânticas (interferência de um sistema consigo próprio, coerência e implicação, tal como manifestadas por fenômenos como as correlações quânticas à distância, a condensação Bose-Einstein, decoerência, oscilações de estado etc).

Os conceitos expressos por magnitudes que possuem essas formas e propriedades formais, com suas relações, são, portanto, adequados para dar conta dos fenômenos quânticos físicos e podem ser consideradas como *conceitos físicos* no sentido pleno do termo. Então, identificamos os conceitos físicos do domínio quântico. Mas o que acontece acerca dos *princípios físicos* correspondentes ou das propriedades gerais características dos fenômenos e entidades desse domínio da matéria? O que se chama comumente “princípios quânticos”, no sentido de von Neumann não pode ser considerado como a expressão dos princípios físicos no sentido de Einstein. Teriam sido mais apropriadamente chamados “regras quânticas”. Mas pode-se pensar, inspirado pelas lições que se aprendeu do estilo einsteniano na física, de que a física quântica já exhibe fatos gerais que poderiam legitimamente ser considerados como *princípios quânticos físicos*. Tais são as propriedades da “não-separabilidade” (de um sistema físico em constituintes independentes localmente definidos) em uma modalidade considerada enquanto tal por John S. Bell, inspirado pelas objeções de Einstein ao observacionismo de Bohr; ou o “emaranhamento”, apontado por Schrödinger e nomeado por ele em relação às considerações de Einstein, evidenciado recentemente pelo fenômeno da decoerência (decoerência que mostra a transição de um comportamento quântico das magnitudes para um comportamento clássico de um dado sistema físico, induzido por suas interações com outros sistemas (quânticos) do ambiente).

Pode-se ainda dizer algo mais nessa direção, quando se olha, para além da simples mecânica quântica, que é só um quadro teórico-conceitual, para a dinâmica associada a ela, que constitui a teoria quântica em sentido mais geral. A dinâmica das teorias quânticas do campo associadas às várias interações fundamentais determina explicitamente os conceitos e princípios físicos desses campos de interação, à maneira favorecida por Einstein quando tratava com o que ele costuma chamar de “teorias de princípios”. Cada teoria dinâmica está governada por um princípio (físico) específico de simetria que estrutura os conceitos-magnitudes quânticos relevantes por meio de

¹² Estritamente falando, não há magnitudes físicas “diretamente observáveis”, pois são sempre construções conceituais com formas simbólicas.

relações peculiares. As teorias de gauge desenvolvidas a partir de C.N. Yang e R. Mills (cf. Yang & Mills, 1964) com amplo sucesso são, com efeito, desse tipo.

É possível conectar essas duas considerações relativas aos princípios e aos conceitos concernentes respectivamente às teorias quânticas do campo (teorias dinâmicas) e à mecânica quântica (o quadro teórico-conceitual). Pode-se, com efeito, considerar que, no “nível zero da dinâmica”, a mecânica quântica também trabalha do mesmo modo que as teorias dinâmicas quânticas. Seus princípios de simetria são a *indistinguidade* dos sistemas quânticos idênticos, e o *emaranhamento* (que é a contraparte física do princípio de superposição para os vetores de estado). Quanto aos seus conceitos, pode-se considerar que eles são as magnitudes quânticas tais como usadas no “formalismo matemático” que é, de fato, não puramente formal, mas a expressão de uma teoria física, em virtude dos fenômenos específicos aos quais correspondem suas relações.

Estas observações são um tributo ao estilo científico de Albert Einstein, cuja profunda visão da realidade física e de suas exigências está, em grande parte, em harmonia com nosso conhecimento presente, como apontou C. N. Yang em sua conferência neste congresso. ☞

A versão inglesa deste texto foi apresentada no Simpósio “*Einstein in context*” na seção “*Einstein and the quantum revolution*” do xxiiith International Congress of History of Science, Beijing, China, julho de 2005.

Traduzido do original em inglês por Pablo Rubén Mariconda

Michel PATY

Diretor de Pesquisa Emérito do
Centre National de la Recherche Scientifique, França,
Professor Visitante do Departamento de Filosofia da
Universidade de São Paulo, Brasil.

paty@paris7.jussieu.fr

ABSTRACT

Einstein's first researches in physics (particularly those of the golden year 1905) dealt with two domains which he treated independently: the atomic and radiative domain on one side, electrodynamics on the other side. Later on, these two directions would crystallize, the first one towards quantum theory, the second one towards the theories of relativity and of the continuous matter field. When looking at Einstein's works in both directions (which he always maintained in parallel), one sees already at the beginning two different ways of approach: a heuristic one, making use of a probabilistic method of investigation raised up from thermodynamics (calculation of fluctuations), with the aim of characterizing specific properties of the new domain of quantum physics that was breaking with known theories and concepts; and another one, decidedly fundamental, organizing the theoretical work around sound physical principles, in particular invariance principles. These two modes of approach do not show a splitting between two different attitudes of thought, an empiricist one on one side, and a theoretical-rational one on the other side (as many commentators believed, referring them to two distinct periods of Einstein's achievements), but to a differentiated manner, proper to him, of conceiving the theoretical work, in function of the possible intelligibility of its object, in terms of concepts and principles that were always thought physically. This manner defines Einstein's own style as a searcher in physics, at the same time critical and constructive, a style which was being constituted since his first works.

KEYWORDS • Completeness. Einstein. Fundamental theory. Heuristic view. Mathematical form. Physical concepts and principles. Quantum physics. Scientific style.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEMBERT, J. R. d'. *Traité de dynamique*. Paris: David, 1758 [1743].
- ANNALEN DER PHYSIK, 14, 1-3, p. 3-201, 2005. (Special Issue: Commemorating Albert Einstein).
- ASHTEKAR, A.; COHEN, R. S.; HOWARD, D.; RENN, J.; SARKAR, S. & SHIMONY, A. (Ed.). *Revisiting the foundations of relativistic physics: Festschrift in honor of John Stachel*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- ASPECT, A. *Trois tests expérimentaux des inégalités de Bell par mesure de polarisation de photons*. Orsay, 1983. Tese (Doutorado em Física). Université Paris-Sud.
- BELL, J. S. *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- BOHR, N.; KRAMERS, H. A. & SLATER, J. C. The quantum theory of radiation. *The Philosophical Magazine*, 47, p. 785-822, 1924.
- BOLTZMANN, L. *Vorlesungen über Gastheorie*. Leipzig: Barth, 1896-1898. 2 v. (*Lectures on gas theory*. Trad. de S. G. Brush. Berkeley: University of California Press, 1964.)
- BOTHE, W. & GEIGER, H. Über das Wesen des Comptoneffekts; eine experimentelles Beitrag zur Theorie des Strahlung. *Naturwissenschaft*, 13, p. 440-56, 1925; *Zeitschrift für Physik*, 32, p. 639-63, 1925.
- BROGLIE, L. de. Recherches sur la théorie des quanta. *Annales de Physique*, 10ème série, 3, p. 22-128, 1925.
- BROGLIE, M. de. & LANGEVIN, P. (Ed.). *La théorie du rayonnement et les quanta. Communications et discussions de la réunion tenue à Bruxelles du 30 octobre au 3 novembre 1911, sous les auspices de M. E. Solvay*. Paris: Gauthier-Villars, 1912.
- CARTAN, E. & EINSTEIN, A. *Letters on absolute parallelism, 1929-1932*. Princeton: Princeton University Press/Académie Royale de Belgique, 1979.
- CASSIDY, D. C. Einstein and the quantum hypothesis. *Annalen der Physik*, 14, p. 15-22, 2005. Supplement.
- CLAUSER, J. F.; HORNE, M. A.; SHIMONY, A. & HOLT, R. A. Proposed experiment to test hidden variables theories. *Physical Review Letters*, 23, p. 880-4, 1969.

- COLODNY, R. (Ed.). *From quarks to quasars*. Pittsburg: University of Pittsburg Press, 1986.
- DRUDE, P. *Lehrbuch der Optik*. Leipzig: Hirzel, 1900. (*The theory of opticks*. Trad. de V. R. Mann and R. A. Millikan. London: Longmans Green, 1902; New York: Dover, 1919. *Précis d'optique*. Trad. de M. Boll. Prefácio de P. Langevin. Paris: Gauthier-Villars, 1910-1912. 2 v.)
- EINSTEIN, A. Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik. *Annalen der Physik*, ser. 4, 11, p. 170-87, 1903. (Reimp. STACHEL, J.; CASSIDY, D. et al. (Ed.). *The collected papers of Albert Einstein*. Princeton: Princeton University Press, 1989. v. 2, p. 77-94. *Une théorie des fondements de la thermodynamique*. In: EINSTEIN, A. *Oeuvres choisies*. Paris: Seuil/CNRS, 1989. v. 1, p. 18-28.)
- _____. *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen* (Inaugural Dissertation, Zürich Universität). Bern: Wyss, 1905a. (Reimp. STACHEL, J.; CASSIDY, D. et al. (Ed.). *The collected papers of Albert Einstein*. Princeton: Princeton University Press, 1989. v. 2, p. 183-205.)
- _____. Ueber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, ser. 4, 17, p. 132-48, 1905b. (Reimp. STACHEL, J.; CASSIDY, D. et al. (Ed.). *The collected papers of Albert Einstein*. Princeton: Princeton University Press, 1989. v. 2, p. 150-66. *Un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière*. In: EINSTEIN, A. *Oeuvres choisies*. Paris: Seuil/CNRS, 1989. v. 1, p. 39-53.)
- _____. Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, ser. 4, 17, p. 891-921, 1905c. (Reimp. STACHEL, J.; CASSIDY, D. et al. (Ed.). *The collected papers of Albert Einstein*. Princeton: Princeton University Press, 1989. v. 2, p. 275-306. *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement*. In: EINSTEIN, A. *Oeuvres choisies*. Paris: Seuil/CNRS, 1990. v. 2, p. 31-58.)
- _____. Ueber das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 4, p. 411-62, 1907. (Trad. inglesa em STACHEL, J.; CASSIDY, D. et al. (Ed.). *The collected papers of Albert Einstein*. Princeton: Princeton University Press, 1989. v. 2, p. 433-84; p. 494-5. Trad. francesa em EINSTEIN, A. *Oeuvres choisies*. Paris: Seuil/CNRS, 1990. v. 2, p. 84-124.)
- _____. Berichtigungen. *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 5, p. 98-99, 1908.
- _____. Ueber die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung. *Deutsche Physikalische Gesellschaft, Verhandlungen*, 7, p. 482-500, 1909. (Também publicado em *Physikalische Zeitschrift*, 10, p. 817-25, 1909. Apresentado na Conferência de Salzbourg, 21/11/1909. Reimp. STACHEL, J.; CASSIDY, D. et al. (Ed.). *The collected papers of Albert Einstein*. Princeton: Princeton University Press, 1989. v. 2, p. 564-82; *L'évolution de nos conceptions sur la nature et la constitution du rayonnement*. In: EINSTEIN, A. *Oeuvres choisies*. Paris: Seuil/CNRS, 1990. v. 2, p. 86-100.)
- _____. Einstein's manuscript on the special theory of relativity. In: KLEIN, M.; KOX, A. J. et al. (Ed.). *The collected papers of Albert Einstein*. Princeton: Princeton University Press, 1995 [1912]. v. 4, p. 9-108.
- _____. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, ser. 4, 49, p. 769-822, 1916a. (Les fondements de la théorie de la relativité générale. In: EINSTEIN, A. *Oeuvres choisies*. Paris: Seuil/CNRS, 1990. v. 2, p. 179-227.)
- _____. Zur Quantentheorie der Strahlung. *Physikalische Gesellschaft Mitteilungen*, p. 47-62, 1916b. (Reimp. *Physikalische Zeitschrift*, 18, p. 121-8, 1917. *Théorie quantique du rayonnement*. In: EINSTEIN, A. *Oeuvres choisies*. Paris: Seuil/CNRS, 1990. v. 2, p. 134-47.)
- _____. Bietet die feldtheorie Möglichkeiten für die Lösung des Quantenproblems? *Preussische Akademie der Wissenschaften, Phys. Math. Klasse, Sitzungsberichte*, p. 359-64, 1923.
- _____. Observações sobre a situação atual da teoria da luz. *Revista da Academia Brasileira de Ciências*, 1, p. 1-3, 1926. (Comunicação em alemão à Academia Brasileira de Ciências, 7 de maio de 1925. Trad. de R. Marinho. O manuscrito original em alemão, Bemerkungen zu der gegenwärtigen Lage der Theorie des Lichtes, foi publicado em fac-símile. In: TOMLASQUIN, A. T. & MOREIRA, I. C. (Ed.), *Ciência Hoje*, 21, 124, p. 25-7, 1997.)

- _____. Newtons Mechanik und ihr Einfluss auf die Gestaltung der theoretischen Physik. *Naturwissenschaften*, 15, p. 273-6, 1927. (La mécanique de Newton et son influence sur l'évolution de la physique théorique. In: EINSTEIN, A. *Oeuvres choisies*. Paris: Seuil/CNRS, 1993. v. 5, p. 235-41.)
- _____. Autobiographisches. Autobiographical notes. In: SCHILPP, P. A. (Ed.). *Albert Einstein, philosopher-scientist*. La Salle: Open Court, 1949. p. 1-95. (The Library of Living Philosophers).
- _____. Quantenmechanik und Wirklichkeit. *Dialectica*, 2, p. 35-9, 1948. (Mécanique quantique et réalité. In: EINSTEIN, A. *Oeuvres choisies*. Paris: Seuil/CNRS, 1989. v. 1, p. 244-49.)
- _____. Reply to criticism. Remarks concerning the essays brought together in this cooperative volume. In: SCHILPP, P. A. (Ed.). *Albert Einstein, philosopher-scientist*. La Salle: Open Court, 1949. p. 663-93.
- _____. *Oeuvres choisies*. Paris: Seuil/CNRS, 1989-1993. 5 v. (OC)
- EINSTEIN, A; PODOLSKY, B. & ROSEN, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, ser. 2, 47, p. 777-80, 1935. (Peut-on considérer que la mécanique quantique donne de la réalité physique une description complète? In: EINSTEIN, A. *Oeuvres choisies*. Paris: Seuil/CNRS, 1993. v. 5, p. 224-30.)
- EINSTEIN, A. & BORN, M. *Briefwechsel 1916-1955*. München: Nymphenburger Verlagshandlung, 1969. (*Correspondance 1916-1955*. Trad. de P. Leccia. Paris: Seuil, 1972.)
- EINSTEIN, A. & BESSO, M. *Correspondance 1903-1955*. Paris: Hermann, 1972.
- FEYERABEND, P. *Against method. Contre la méthode, esquisse d'une théorie anarchiste de la connaissance*. Trad. de B. Jurdant & A. Schlumberger. Paris: Seuil, 1979.
- FLEURY, N.; JOFFILY, S.; SIMÕES, J. A. M. & TROPER, A. (Ed.). *Leite Lopes Festschrift. A pioneer physicist in the third world (dedicated to J. Leite Lopes on the occasion of his seventieth birthday)*. Singapore: World Scientific Publishers, 1988.
- GREFFE, J.-L.; HEINZMANN, G. & LORENZ, K. (Ed.). *Henri Poincaré. Science et philosophie. Science and philosophy. Wissenschaft und Philosophie. Congrès International, Nancy, France, 14-18 mai 1994*. Berlin/Paris: Akademie Verlag/Albert Blanchard, 1996.
- HOWARD, D. & STACHEL, J. (Ed.). *Einstein, the formative years, 1879-1909*. Boston: Birkhauser, 2000.
- LANDEVIN, P. *La physique depuis vingt ans*. Paris: Doin, 1923.
- _____. La physique du discontinu. Conférence à la Société française de Physique, le 27 novembre 1913. In: _____. *La physique depuis vingt ans*. Paris: Doin, 1923 [1913]. p. 189-264.
- LORENTZ, H. A. Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light. *Verslagen Koninklijke Akademie van Wetenschappen. Proceedings of the section of science*, 6, p. 809-31, 1904.
- MATAIX, C. & RIVADULLA, A. (Ed.). *Física cuantica y realidad. Quantum physics and reality*. Madrid: Editorial Complutense, 2002.
- MORELON, R. & HASNAWI, A. (Ed.). *De Zénon d'Elée à Poincaré. Recueil d'études en hommage à Roshdi Rashed*. Louvain: Editions Peeters, 2004.
- PAIS, A. *Subtle is the Lord. The science and the life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press, 1982.
- PATY, M. La non-séparabilité locale et l'objet de la théorie physique, *Fundamenta Scientiae*, 7, p. 47-87, 1986.
- _____. Einstein et la pensée de Newton. *La Pensée*, 259, p. 17-37, 1987.
- _____. *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*. Paris: Archives Contemporaines, 1988a. (*A matéria roubada. A apropriação crítica do objeto da física contemporânea*. Trad. de M. A. L. de Barros. São Paulo: Edusp, 1995.)
- _____. Sur la notion de complétude d'une théorie physique. In: FLEURY, N.; JOFFILY, S.; SIMÕES, J. A. M. & TROPER, A. (Ed.). *Leite Lopes Festschrift. A pioneer physicist in the third world (dedicated to J. Leite Lopes on the occasion of his seventieth birthday)*. Singapore: World Scientific Publishers, 1988b. p. 143-64.
- _____. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*. Paris: PUF, 1993.

- _____. The nature of Einstein's objections to the Copenhagen interpretation of quantum mechanics. *Foundations of Physics*, 25, 1, p. 183-204, 1995.
- _____. Poincaré et le principe de relativité. In: GREFFE, J.-L.; HEINZMANN, G. & LORENZ, K. (Ed.). *Henri Poincaré. Science et philosophie. Science and philosophy. Wissenschaft und Philosophie. Congrès International, Nancy, France, 14-18 mai 1994*. Berlin/Paris: Akademie Verlag/Albert Blanchard, 1996a. p. 101-43.
- _____. Le style d'Einstein, la nature du travail scientifique et le problème de la découverte. *Revue Philosophique de Louvain*, 94, 3, p. 447-70, 1996b.
- _____. Are quantum systems physical objects with physical properties? *European Journal of Physics*, 20, p. 373-88, 1999a.
- _____. Les trois stades du principe de relativité. *Revue des Questions Scientifiques*, 170, 2, p. 103-50, 1999b.
- _____. Interprétations et significations en physique quantique. *Revue Internationale de Philosophie*, 212, p. 199-242, 2000.
- _____. Poincaré, Langevin et Einstein. *épistémologiques. Philosophie, sciences, histoire. Philosophy, science, history*, 2, 1-2, p. 33-73, 2002a.
- _____. La physique quantique ou l'entraînement de la forme mathématique sur la pensée physique. In: MATAIX, C. & RIVADULLA, A. (Ed.). *Física cuantica y realidad. Quantum physics and reality*. Madrid: Editorial Complutense, 2002b. p. 97-134.
- _____. The concept of quantum state: new views on old phenomena. In: ASHTEKAR, A.; COHEN, R. S.; HOWARD, D.; RENN, J.; SARKAR, S. & SHIMONY, A. (Ed.). *Revisiting the foundations of relativistic physics: Festschrift in Honor of John Stachel*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 451-78. (Boston Studies in the Philosophy and History of Science).
- _____. L'élément différentiel de temps et la causalité physique dans la dynamique de Alembert. In: MORELON, R. & HASNAWI, A. (Ed.). *De Zénon d'Elée à Poincaré. Recueil d'études en hommage à Roshdi Rashed*. Louvain: Editions Peeters, 2004a. p. 391-426.
- _____. Einstein 1905, l'année admirable. *Pour la Science*, 326, p. 26-33, 2004b.
- _____. Le cosmos avant Einstein. *Ciel et Espace. Hors-Série*, p. 29-35, 2004c.
- _____. *Einstein, les quanta et le réel (critique et construction théorique)*. No prelo.
- PERRIN, J. Mouvement brownien et réalité moléculaire. In: _____. *Oeuvres scientifiques*. Paris: CNRS, 1950 [1909]. p. 171-239.
- _____. *Oeuvres scientifiques*. Paris: CNRS, 1950.
- POINCARÉ, H. L'état actuel et l'avenir de la physique mathématique. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, 28, p. 302-24, 1904.
- _____. *La valeur de la science*. Paris: Flammarion, 1905.
- _____. Sur la dynamique de l'électron. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo*, 21, p. 129-176, 1906.
- _____. Sur la théorie des quanta. *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 5ème série, 2, p. 5-34, 1912.
- _____. *Oeuvres*. Paris: Gauthier-Villars, 1916-1965. 11v.
- RENN, J. (Ed.). *Einstein's Annalen papers: the complete collection, 1901-1922*. Berlin: Wiley-VCH, 2005a.
- RENN, J. Einstein's invention of brownian motion. *Annalen der Physik*, 14, p. 23-37, 2005b. Supplement.
- SCHILPP, P. A. (Ed.). *Albert Einstein, philosopher-scientist*. La Salle: Open Court, 1949. (The Library of Living Philosophers).
- STACHEL, J. Einstein and the quantum: fifty years of struggle. In: COLODNY, R. (Ed.). *From quarks to quasars*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 1986.
- YANG, C. N. Conference at the inauguration of the XXIIIth International Congress of History of Science. Beijing, July 2005.
- YANG, C. N. & MILLS, R. L. Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance. *Physical Review*, 96, p. 191-9, 1964.