Parte II - Implicações filosóficas da teoria quântica

O realismo de Einstein e sua crítica da mecânica quântica

Christoph Lehner

SciELO Books / SciELO Livros / SciELO Libros

FREIRE JR, O., PESSOA JR, O., and BROMBERG, JL., orgs. *Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais* [online]. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física, 2011. 456 p. ISBN 978-85-7879-060-8. Available from SciELO Books <<http://books.scielo.org>>.

All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported.

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença Creative Commons Atribuição - Uso Não Comercial - Partilha nos Mesmos Termos 3.0 Não adaptada.

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported.

O realismo de Einstein e sua crítica da Mecânica Quântica¹

Christoph Lehner

1 Introdução

Poucos anos antes de suas mortes, o velho confidente de Albert Einstein, Michele Besso, deve ter-lhe escrito uma carta referindo-se a ele, de sua forma tipicamente entusiasmada, como um “gigante e velho amigo” (*gewaltiger alter Freund*). Einstein respondeu com seu próprio, não menos típico, sarcasmo:

Caro Michele,

Um velho amigo eu sou, mas à referência “gigante” só posso adicionar “coitado” [*nebbish*], se você está familiarizado com esta reveladora palavra de nossos antepassados. Ela expressa uma mistura de compaixão e desprezo. Cinquenta anos de ruminações conscientes não me trouxeram mais perto de uma resposta para a pergunta: “O que são quanta de luz?” Hoje em dia qualquer pé-de-chinelo pode achar que sabe, mas engana-se.²

A citação dá a avaliação um tanto desoladora do próprio Einstein de sua luta ao longo da vida com a Teoria Quântica³. Ilustra também de forma concisa dois aspectos desta luta, nos quais a presente contribuição se concentrará:

1 Em Janssen, Michel & Lehner, Christoph (orgs.), *The Cambridge Companion to Einstein*. Cambridge: Cambridge University Press, no prelo. Tradução feita por Mayane da Nóbrega e Osvaldo Pessoa.

2 Albert Einstein para Michele Besso, 12 de dezembro de 1951. (SPEZIALI, 1972, p. 453)

3 Um relato detalhado com uma extensa seleção de citações de Einstein pode ser encontrado em Stachel (1986).

a) A busca de Einstein para o *entendimento* dos fenômenos quânticos em um sentido forte, em oposição a uma mera descrição empiricamente adequada.

b) A crítica de Einstein de que a Mecânica Quântica, como foi formulada nos anos posteriores a 1925 (que obviamente é o reino dos pés-de-chinelo do comentário de Einstein), não nos oferece um entendimento do fenômeno, nesse sentido forte.

Estes dois aspectos estão fortemente conectados: é preciso ponderar o que estava envolvido para Einstein no elusivo conceito de “entendimento” na Física para avaliar a sua crítica do que ele próprio admitiu ser uma teoria de enorme sucesso.

A crítica de Einstein à Mecânica Quântica é naturalmente uma questão de grande interesse para o historiador interessado no pensamento dele, já que transcende as discordâncias técnicas com seus contemporâneos e concerne a suas ideias sobre o método e os objetivos da própria Física. Mas também é de grande interesse para físicos e filósofos da Física que se esforçam para a compreensão da Mecânica Quântica, já que se trata de um dos mais bem sucedidos e pensativos físicos da história e um dos pais da própria Teoria Quântica. No entanto, a crítica de Einstein era vista pela maioria de seus contemporâneos como a consequência de um ideal de ciência ultrapassado e somente nas últimas décadas filósofos e físicos a têm estudado mais de perto. Um importante papel neste desenvolvimento foi o trabalho de John S. Bell sobre a estatística de medições em estados emaranhados, que claramente demonstrou o conflito entre a Mecânica Quântica e as expectativas clássicas, e que foi construído a partir do exemplo que Einstein, Podolsky e Rosen propuseram em seu famoso experimento mental. Isto levou a um renovado interesse nas questões de fundamentos da Física Quântica, mas também ao próspero campo da preparação experimental e estudo dos estados emaranhados, exemplos paradigmáticos da estranheza do mundo quântico.

Atualmente, existe uma vasta literatura sobre a crítica de Einstein à Mecânica Quântica e a presente resenha não poderia tratar o tema em toda sua amplitude. Em vez disso, apresentarei o que vejo como o cerne da crítica de Einstein, um princípio metodológico que está na raiz de todos os seus argumentos relacionados ao entendimento da Mecânica Quântica. Este princípio é complementado por vários pressupostos físicos nos vários argumentos de Einstein, mas ele é mais geral que qualquer um destes pressupostos.

Pode-se argumentar que uma análise que buscasse encontrar um princípio básico simples para a disputa de Einstein com os vários defensores de uma leitura ortodoxa da Mecânica Quântica, necessariamente simplificaria as complexidades

históricas e desconsideraria uma série de fatores não-teóricos que contribuíram para esta disputa. Embora, certamente, seja verdade que a história completa envolveu mais do que o debate abstrato entre duas posições teóricas, é igualmente certo que não se pode sequer começar a contar tal história completa sem compreender as questões teóricas em jogo. Por outro lado, defenderei que as questões filosóficas não podem ser compreendidas sem atenção ao contexto histórico concreto do debate.

2 A evolução inicial das visões de Einstein

O trabalho inicial de Einstein sobre Teoria Quântica foi acompanhado por sua esperança de finalmente chegar a uma teoria construtiva dos fenômenos quânticos, que a velha teoria quântica, antes de 1925, descrevia como um conjunto incompleto e um tanto *ad hoc* de condições quânticas. Einstein (1919c) explicou explicitamente o significado de “construtivo” em artigo de divulgação sobre a relatividade geral, escrito para o *Times* de Londres: nele, apresentou a distinção entre ‘teorias de princípio’, fundada em princípios gerais e bem confirmados empiricamente (como a termodinâmica, baseada na primeira e segunda leis da termodinâmica), e ‘teorias construtivas’, que constroem uma descrição da realidade física, a partir de partes simples, como os átomos da mecânica estatística de Boltzmann ou o campo eletromagnético da teoria de Maxwell do eletromagnetismo. Em sua comparação, Einstein deixou claro que, embora as teorias de princípio tivessem a vantagem de estar firmemente baseadas em conhecimento empírico, uma teoria física verdadeiramente fundamental deveria ser construtiva. As ideias de Einstein sobre como essa base construtiva para a Teoria Quântica poderia parecer não estão bem documentadas em suas publicações; elas têm que ser colocadas juntas a partir de observações marginais e algumas afirmações em sua correspondência. Uma vertente característica em seu pensamento era que uma modificação não-linear das equações de Maxwell poderia trazer vários benefícios: uma explicação da natureza quântica da radiação eletromagnética e uma explicação das propriedades do elétron. Por alguns anos, em volta de 1909, ele buscou vigorosamente construir tal teoria, até que desistiu temporariamente, passando a focar seus esforços na teoria relativística da gravitação, que se tornaria seu maior triunfo pessoal.

Depois de 1915, quando encontrou as equações de campo da relatividade geral após uma longa e árdua luta, duas mudanças teriam uma profunda influência no desenrolar dos acontecimentos:

Em 1913, Niels Bohr havia aplicado a Teoria Quântica ao modelo de Rutherford do átomo. Essa combinação ousada de dois novos empreendimentos teóricos - a

Teoria Quântica e a Física Atômica - propeliu a Teoria Quântica de uma especialidade teórica um tanto obscura para a vanguarda da pesquisa em fundamentos da Física. Isto impressionou tanto Einstein que 35 anos depois ele escreveu em suas *Notas autobiográficas*:

Que esse fundamento inseguro e contraditório [da velha teoria quântica] fosse suficiente para permitir a um homem, com o instinto e a sensibilidade únicos de Bohr, descobrir as leis principais das linhas espectrais [...] pareceu para mim como um milagre – e até hoje parece para mim um milagre. Esta é a forma mais elevada de musicalidade na esfera do pensamento. (EINSTEIN, 1949, p. 45-47)

É plausível assumir que o sucesso de Bohr reacendeu o interesse de Einstein na Teoria Quântica. Em 1916, este publicou seu artigo sobre a emissão e a absorção de radiação pelo átomo de Bohr, conectando o novo modelo à sua velha especialidade, a hipótese do quantum de luz. Retornarei ao trabalho de Einstein sobre Teoria Quântica adiante. Antes, discutirei um segundo desenvolvimento de importância menos óbvia para as visões de Einstein sobre a Mecânica Quântica.

O sucesso da relatividade geral confirmou a convicção de Einstein na sensatez de um programa construtivo que baseasse a Teoria Quântica em uma teoria de campo; já em 1919, ele propôs uma modificação da relatividade geral com o objetivo de derivar elétrons como soluções das equações de campo. (EINSTEIN, 1919a) Este programa levaria, eventualmente, ao programa da teoria de campo unificado, no qual Einstein começou a trabalhar nos anos 20 e pelo resto de sua vida. Naquele momento, todavia, ele foi confrontado com muito ceticismo sobre sua abolição radical da realidade física do espaço e tempo. Colocado no centro das atenções da sociedade pela espetacular confirmação de suas previsões a respeito do desvio da luz do sol, mas por outro lado criticado vigorosamente pela Matemática de difícil compreensão e pela dificuldade de se intuir sua teoria, respondeu com uma série de artigos defendendo a sensatez física e epistemológica de sua teoria, tanto para seus colegas quanto para o público em geral. Isto o obrigou a pensar detidamente sobre os fundamentos e os métodos da Física e muitos dos seus mais importantes artigos filosóficos foram escritos nestes anos. (EINSTEIN, 1918c, 1918d, 1919b, 1919c, 1920, 1921)

Na próxima seção, argumentarei que, nesses anos, sob a influência dominante de sua experiência com a relatividade geral, as visões maduras de Einstein sobre a natureza e o método da Física foram formadas, especialmente seu chamado 'realismo', o princípio metodológico central na base da sua crítica à Mecânica Quântica. No restante desta contribuição, tentarei mostrar o quão profundamente este ponto de vista sobre a Física influenciou a posição de Einstein em relação à Mecânica Quântica e à pretensão desta de ser a nova base da Física.

3 O realismo de Einstein

A mais conhecida citação de Einstein sobre a Mecânica Quântica é indubitavelmente sua máxima “Deus não joga dados”, expressa em uma carta a Max Born, seu colega e amigo de longa data, que se tornou um de seus principais oponentes na disputa sobre o estatuto da Mecânica Quântica⁴. Max Born foi um dos criadores da mecânica matricial e lhe é creditada a primeira formulação da interpretação estatística da Mecânica Quântica em seu trabalho sobre o tratamento mecânico ondulatório do processo de espalhamento. (BORN, 1926) Como muitos depois dele, Born viu o indeterminismo como a quebra fundamental da Mecânica Quântica em relação à Física clássica e entendeu a crítica de Einstein à Mecânica Quântica, como um preconceito contra a possibilidade de uma Física radicalmente determinista.⁵ Esta leitura tornou-se, em larga medida, a visão-padrão sobre a posição de Einstein: o velho revolucionário que matou o espaço e o tempo absolutos agora tornou-se conservador, agarrando-se teimosamente a suposições metafísicas antiquadas. Entretanto, este é um mal-entendido em relação à posição de Einstein, talvez compreensível do ponto de vista de Born e seu orgulho em ter feito com o determinismo o que Einstein fez com o espaço absoluto, mas demasiado simplista para fazer justiça à avaliação feita por Einstein da Mecânica Quântica. E embora historiadores da ciência com sensibilidade filosófica⁶ tenham apontado que as visões de Einstein eram muito mais complexas (e muito mais bem fundamentadas), a caricatura ainda se impõe fora da pequena comunidade dos estudiosos de Einstein.

Defendo esta posição com uma testemunha-chave: Wolfgang Pauli, apelidado de “a consciência da física”. Sendo ele próprio um dos vigorosos defensores da Mecânica Quântica, certamente não era condescendente com Einstein. Apenas um ano antes da morte de Einstein, ele e Max Born travaram mais uma vez um debate bastante acalorado sobre a Mecânica Quântica, após a contribuição de Einstein para o *Festschrift* de Born, no qual criticara a Mecânica Quântica com um experimento mental discutido mais à frente (seção 7). Pauli, que na época estava em Princeton com Einstein, interveio para aplinar as crespas ondas. Ele escreveu para Born:

4 Albert Einstein para Max Born, 4 de dezembro de 1926. (EINSTEIN; BORN, 1969, p. 127)

5 Esta visão está expressa nos comentários de Born, em Einstein e Born (1969). Também Pais (1982), a biografia de Einstein geralmente muito cuidadosa, desconsidera completamente a crítica dele à Mecânica Quântica.

6 As discussões clássicas das visões filosóficas de Einstein podem ser encontradas em Jammer (1966), Howard (1984, 1985, 1993) e Fine (1996a).

Em particular, Einstein não considera o conceito de “determinismo” tão fundamental quanto se costuma sustentar (como ele falou-me enfaticamente muitas vezes). [...] o ponto de partida de Einstein é mais “realista” do que “determinista”, o que significa que seu preconceito filosófico é diferente.⁷

Não surpreendentemente, é o conceito de realidade que está no coração do argumento de Einstein-Podolsky-Rosen (EINSTEIN; PODOLSKY; ROSEN, 1935) e é *Mecânica quântica e realidade* o título de um segundo artigo no qual Einstein apresentou uma versão mais simples do argumento. (EINSTEIN, 1948) No desenrolar de nossa discussão, encontraremos muitas evidências da preocupação de Einstein com a realidade que a Mecânica Quântica descreveria. Mas qual é o realismo que consiste no “preconceito filosófico” de Einstein? Pauli, que queria banir todas as imagens da descrição dos fenômenos atômicos, considerou-o como a tentativa ingênua e antiquada de continuar fazendo modelos mecânicos intuitivos na tradição da física do século XIX e, assim, o resultado de sua avaliação quanto à posição de Einstein não é mais positivo que o de Born. Mais tarde, comentadores de orientação mais filosófica concentraram-se na crítica de Einstein ao positivismo lógico e igualaram sua posição com a de um realismo epistemológico tradicional, que defende dever ser a ciência uma imagem fiel de “como as coisas realmente são”, uma verdade independente do observador, que transcende nosso conhecimento empírico. (HOLTON, 1968) Tanto os positivistas lógicos, quanto os defensores da interpretação de Copenhagen da Mecânica Quântica, gostavam de rotular esta posição de “realismo ingênuo”, implicando mais uma vez que isto significava um apego a ideias ultrapassadas sobre a possibilidade do conhecimento científico. Mas esta rejeição ignorava que Einstein, o estudante entusiasta de Hume, Mach e Poincaré, certamente não era ingênuo quando se tratava da epistemologia da ciência⁸. Ele aprendera, há tempos, a lição do empirismo e positivismo de que ciência não é simplesmente uma imagem do “mundo lá fora”; e não esqueceu esta lição em sua velhice, como mostra a seguinte citação:

O “real” não nos é dado de maneira alguma imediatamente, somente as experiências dos seres humanos nos são dadas. [...] A postulação do “real” como algo que existe independentemente da minha experiência é uma totalidade de construções intelectuais [...]. Nossa confiança no sistema de crença sobre a realidade repousa apenas no fato que aqueles conceitos e relações [postos como reais] estão em uma

7 Wolfgang Pauli para Max Born, 31 de março de 1954, em Einstein e Born (1969, p. 286).

8 Ver discussão em Howard (1993)

relação de correspondência com nossa experiência; este é o único fundamento para a “verdade” de nossas afirmações. (EINSTEIN, 1951)

Einstein contrasta acentuadamente seu ponto de vista com o de Herbert Samuel, para quem a realidade é aquilo “lá fora” que a ciência deveria retratar. A verdade da ciência não está em ser uma imagem fidedigna de uma realidade independente da mente, mas no seu sucesso em contabilizar nossas experiências (aqui está o empirismo de Hume e Mach); e, de maneira mais importante para nossos propósitos, a própria realidade não é o “lá fora” independente da mente da epistemologia cartesiana, mas uma construção intelectual, posta pela ciência (aqui está o convencionalismo de Poincaré).

Se o realismo de Einstein não é um simples realismo epistemológico, o que é então? O que pode significar ser um realista sobre um construto intelectual? Arthur Fine havia proposto que Einstein “enteoriza” o realismo, significando que o realismo de Einstein não é uma tese epistemológica sobre a relação entre a ciência e a realidade independente da mente, mas sim uma tese metodológica sobre a correta estrutura interna da ciência e a escolha de seu aparato metodológico. Fine (1986, p. 86-111) vê o realismo de Einstein em um conjunto de requisitos para uma teoria fundamental satisfatória: a teoria deve falar sobre objetos independentes de observação, deve representá-los em um quadro espaço-temporal, deve consistir de leis deterministas. Fine também adicionou algumas exigências secundárias que não são tão centrais para Einstein.

Apresentando o realismo de Einstein desta forma, pode-se fazer este realismo parecer menos ingênuo, mas ele ainda parece um tanto carregado de preconceito: Einstein se apegava a um conjunto de exigências *a priori* sobre a física e está disposto a descartar todo o bem-sucedido campo da Mecânica Quântica porque este não se encaixa nessas exigências. Tentarei fornecer um contexto histórico para as convicções metodológicas de Einstein, que mostrará que elas não são *a priori*, mas sim que resumem as lições que ele achou ter aprendido de seus próprios sucessos em Física teórica e que também estreitará a noção, um tanto vaga, de um conjunto de requisitos que Fine propôs para um único princípio fundamental (com alguns corolários), que proponho chamar de *o realismo construtivo* de Einstein. Por último, esta contextualização histórica fará com que as exigências de Einstein pareçam muito mais plausíveis, enquanto preceitos metodológicos gerais, mesmo à luz da Física contemporânea.

O contexto a ser olhado, como anunciado acima, é o período “filosófico” de Einstein, depois da publicação da Teoria da Relatividade geral, época em que ele conceituou e defendeu os princípios metodológicos que o levaram a seu maior sucesso teórico. E não há melhor lugar para começar, senão com a correspondência entre ele e Moritz Schlick, que havia escrito uma das primeiras análises

filosóficas da relatividade geral: o artigo *Raum und Zeit in der gegenwärtigen Physik* (Espaço e tempo na física contemporânea). Einstein havia elogiado a sua “insuperável clareza de redação e organização”.⁹ Alguns meses depois, Einstein estava estudando o livro, versão ampliada do artigo, e teceu um comentário sobre a crítica de Schlick ao positivismo de Mach. Schlick havia acrescentado um novo capítulo - *Relações com a filosofia* - que Einstein também achou excelente. Lá, Schlick defendeu um conceito mais amplo de realidade física, para além das sensações imediatas de Mach, e defendeu que é mais satisfatório também chamar de ‘reais’ os eventos físicos que não são diretamente perceptíveis. A resposta de Einstein ilustra de maneira linda sua própria visão sobre a questão do realismo, por isso vou citá-la por completo:

Sua concepção contrasta com a de Mach de acordo com o seguinte esquema:

Mach: Reais são somente as sensações.

Schlick: Reais são sensações e eventos (de natureza física).

Parece-me que a palavra “real” é entendida de duas maneiras diferentes, dependendo se é dita sobre sensações ou sobre eventos, isto é, questões de fato, no sentido da física.

Se duas pessoas fazem física independentemente uma da outra, elas criarão sistemas que certamente concordam no que diz respeito às sensações (os “elementos” no sentido de Mach). Os construtos intelectuais que ambas imaginam para conectar estes “elementos” podem diferir vastamente. Os dois construtos também não precisam concordar no que diz respeito aos “eventos”, porque estes certamente pertencem aos construtos conceituais. Reais no sentido de serem “irrefutavelmente dados na experiência” são somente os “elementos” e não os “eventos”.

Porém, se designarmos como “real” o que é ordenado por nós no esquema do espaço e tempo, como você fez em sua epistemologia, então, sem dúvida, são principalmente os eventos que são reais.

O que agora designamos “real” na física é, indubitavelmente, o “ordenado espaço-temporalmente”, e não o “dado imediatamente”. O dado imediatamente pode ser uma ilusão. Inversamente, o ordenado espaço-temporalmente pode ser um conceito estéril, que não contribui para a elucidação

9 Albert Einstein para Moritz Schlick, 6 de fevereiro de 1917, CPAE 8, doc. 297.

das conexões entre os dados imediatamente. Eu gostaria de propor aqui uma separação clara dos conceitos.¹⁰

Einstein está propondo aqui uma clara distinção entre uma *realidade fenomênica*, como a base epistemológica do nosso conhecimento (aquilo que é irrefutavelmente dado na experiência), e uma *realidade física* dos eventos ordenados espaço-temporalmente, que é uma construção intelectual (com a qual duas pessoas – ou cientistas – não precisam concordar). Por que Einstein propõe esta distinção? Apenas para uma clarificação metodológica? Eu prefiro supor que ele, que em frase célebre chamou a si mesmo de um “oportunista epistemológico”, tinha uma questão concreta de Física na mente. E não é difícil imaginar o que isso poderia ser em 1917.

A relatividade geral tinha dilacerado de uma maneira até então inimaginável a congruência entre a postulada estrutura espaço-temporal fundamental de uma teoria física e as nossas intuições pré-teóricas sobre espaço e tempo (ou talvez apenas nossas intuições moldadas pelas teorias anteriores). Einstein tinha que defender tal escândalo, não apenas contra os filósofos - que protestavam que as leis do espaço e tempo não constituíam questão a ser decidida pela ciência empírica -, mas também contra muitos físicos - que se ressentiam de que os fundamentos da Física tornaram-se cada vez mais removidos para um nível abstrato e não-intuitivo da Física-Matemática. (É nesta situação que ele encontrou apoio no convencionalismo de Henri Poincaré, cujo postulado era de que os fundamentos da ciência não são leis empíricas nem necessidades *a priori*, mas convenções livres, escolhidas por conta da simplicidade e da coerência da estrutura teórica). Contra essa crítica, Einstein poderia argumentar que a separação entre os fundamentos da teoria e os fatos empíricos não era meramente uma perda, mas também a base para um novo e poderoso princípio metodológico: o princípio da covariância geral. A intenção deste princípio era tirar das coordenadas qualquer significado físico enquanto medida da distância espacial e temporal. No entanto, não significava, como popularmente, mas de modo equivocado, se achava que agora “tudo é relativo”. Pelo contrário, a particular força da covariância geral é a descoberta de uma nova estrutura de *invariância* por trás dos fenômenos.

Esta descoberta não foi trivial, como mostra a longa luta de Einstein com a questão da covariância das equações de campo para o campo gravitacional.¹¹ Após a descoberta no final de 1915, no entanto, Einstein pôde anunciar que todas as entidades fundamentais na relatividade geral eram, agora, grandezas com covariância geral. O fato de que as próprias equações de campo têm covariância

10 Albert Einstein para Moritz Schlick, 21 de maio de 1917, CPAE 8, doc. 343.

11 Ver Janssen e Renn (2007) para o complicado desenvolvimento das ideias de Einstein, durante este período.

geral significa que a estrutura gravito-inercial (a união dos efeitos gravitacionais e inerciais, requerida pelo princípio da equivalência) não é dada por uma determinação *a priori*, como ocorria com o espaço absoluto newtoniano, mas sim através de um campo evoluindo dinamicamente que interage com a matéria, da mesma forma que o campo eletromagnético. Não se tratava apenas de uma descoberta física, mas também de uma novidade conceitual, como mostra a comparação com a teoria anterior, conhecida como *Entwurf* (esboço): nesta teoria, não estava claro o quanto da estrutura espaço-temporal era dada *a priori* e o quanto dela era causada dinamicamente; e Einstein lutou por um longo tempo para esclarecer essa divisão, buscando propriedades de invariância das equações de campo.

Agora, com a covariância geral, essa divisão é simples: *qualquer* sistema de coordenadas é igualmente admissível para a descrição do espaço-tempo. Portanto, somente entidades covariantes, como tensores e vetores, definidas independentemente de uma escolha específica do sistema descritivo (coordenado), podem ser consideradas como definidas objetivamente. As leis fundamentais (como as equações de campo) só podem ser definidas em tais objetos invariantes. A propriedade de invariância matemática da covariância geral torna-se, portanto, uma marca da *objetividade* no sentido de independência do observador. Por outro lado, medições físicas não revelam essas próprias entidades objetivas, mas suas representações nos sistemas de coordenadas locais, que são grandezas não-invariantes. Tais medições não são menos reais, mas são reais em um sentido diferente: sua realidade é *fenomênica*, dependente de um observador situado de uma maneira específica. Se medirmos a força gravitacional na superfície da Terra, esta medição faz perfeito sentido, mas ela depende da especificação do referencial de repouso, ou seja, no caso, o aparelho de medição está fixo em relação à superfície da terra.

A associação de invariantes descritivos com a realidade objetiva tornou-se um padrão metodológico na Física moderna, sendo a base conceitual não só da relatividade geral, mas de todas as teorias de calibre, também em suas formas quânticas. Ela também permeia a própria Mecânica Quântica, desde a sua formulação como *teoria da transformação* por London, Dirac e Jordan, que também está baseada na distinção entre fatos físicos e suas representações em diferentes sistemas de referência (aqui, as diferentes bases do que logo seria chamado espaço de Hilbert). Como tal, essa associação também se tornou um tema bem tratado na história e filosofia da Física moderna. (NORTON, 1992) Por outro lado, a associação de entidades dependentes da descrição com uma realidade fenomênica não criou muita comoção. Desta forma, olharei para um exemplo marcante do uso que o próprio Einstein fez desta associação: a interpretação dos símbolos de Christoffel da métrica do espaço-tempo a partir do campo da força gravitacional. Os símbolos de Christoffel descrevem como o movimento geodésico em uma dada métrica desvia de um movimento que é “linear” em um dado sistema de coordenadas. Eles, portanto, dependem essencialmente (não apenas covariantemente)

da escolha do sistema de coordenadas. Por esta razão, a interpretação de Einstein (e a afirmação relacionada de que a energia do campo gravitacional é dada por uma grandeza dependente de coordenadas) foi criticada até mesmo pela maioria dos adeptos da relatividade geral¹²; e nas modernas apresentações livres de coordenadas da relatividade geral, o ponto de Einstein é ignorado, na maior parte das vezes. Mesmo assim, a interpretação de Einstein faz sentido físico. Trata-se exatamente do ponto do princípio da equivalência, que foi a intuição original de Einstein que o levou à relatividade geral, segundo o qual o campo gravitacional é inteiramente dependente da escolha do sistema de referência: um observador em repouso na superfície da terra sente o campo gravitacional da Terra, ao passo que um observador em queda livre (como em um satélite que circunda a terra) sente “gravidade zero”. O próprio princípio da equivalência foi uma questão central para os críticos da relatividade geral, que argumentavam que Einstein confundira a diferença essencial entre o campo inercial fictício e o campo gravitacional *real*. Para nós, é especialmente interessante como Einstein respondeu a esta crítica:

Em primeiro lugar, devo salientar que a distinção “real” versus “não-real” não pode ser muito útil aqui. [Einstein refere-se a uma discussão anterior, sobre como a energia na física clássica é uma grandeza que depende da escolha do referencial.] Em vez de distinguir entre “real” e “não-real”, façamos uma distinção mais clara entre grandezas que são inerentes ao próprio sistema físico (independente da escolha das coordenadas) e grandezas que dependem do sistema de coordenadas. Seria imediatamente plausível requerer que a física devesse introduzir em suas leis apenas grandezas do primeiro tipo. No entanto, acontece que esse caminho não é realizável na prática, como já foi mostrado pelo desenvolvimento da mecânica clássica.

[A Física] não pode ser feita sem o sistema de coordenadas e portanto tem que usar, junto com as coordenadas, grandezas que não podem ser entendidas como os resultados de medições definíveis. De acordo com a relatividade geral, as quatro coordenadas do contínuo espaço-temporal são até parâmetros escolhidos de maneira completamente livre, desprovidos de qualquer significado físico independente. Parte dessa liberdade também afeta aquelas grandezas que usamos para descrever a realidade física (os componentes do campo). [...] Assim, não se pode dizer nem que o campo gravitacional em um ponto seja algo “real”, nem que seja algo “meramente fictício”.¹³

12 Ver a discussão e referências em CPAE 8, Introdução, p. li.

13 Albert Einstein, 1918k, p. 699-700; CPAE 7, doc. 13.

A grandeza empírica mensurável “campo gravitacional” não pode ser expressa como uma entidade puramente objetiva, pois sua medição depende essencialmente do estado do observador. Mas isso não a faz fictícia. Pelo contrário, é parte do que chamo realidade fenomênica de um observador especificamente situado.

‘Eventos Físicos’		
Invariante (independente de coordenada) descrição	↔	Objetivo (independente de observador) realidade
Exemplo: tensor métrico		
‘Eventos Machianos’		
Relativo (dependente de coordenada) descrição	↔	Fenomênico (dependente do observador) realidade
Exemplo: campo gravitacional		

Figura 1 - Realidades objetiva e fenomênica

Afirmo, então, que este é o ambiente teórico específico para a distinção de Einstein entre os dois significados de realidade, na carta para Schlick. Os ‘elementos machianos’ de que Einstein fala em sua carta para Schlick são reais nesse sentido fenomênico; os ‘eventos físicos’ são reais no sentido objetivo (Figura 1). Mas esses dois conceitos de realidade são bastante independentes de qualquer afirmação epistemológica a respeito da relação da Física com o ‘mundo real’. O que Einstein aborda não é o problema cartesiano, mas a metodologia da Física: *dentro da Física*, é preciso distinguir entre o que a teoria afirma serem fatos objetivos (independentes da descrição) e fatos fenomênicos (dependentes da descrição). Evidentemente, essa distinção é meramente analítica e não impõe qualquer restrição sobre as teorias físicas. Mas ela motiva um princípio substancial, isto é, a seguinte exigência metodológica: somente fatos objetivos (dados pelos invariantes da descrição) podem entrar nas leis fundamentais da Física.

Pode-se chamar a essa exigência de o *realismo metodológico* de Einstein, tendo em mente que não tem muito a ver com o realismo epistemológico com o qual os filósofos têm se preocupado.¹⁴ O fundamento desse princípio metodoló-

14 Evidentemente, essas formas do realismo não são necessariamente contraditórias entre si e pode-se argumentar que Einstein, às vezes, também defendeu um realismo epistemológico mais tradicional. No entanto, como as citações acima mostram, há evidência suficiente de que, pelo menos em seu escritos de orientação mais filosófica, ele foi bastante crítico a respeito. Mais importante, como argumentarei nas seções seguintes, é que o seu realismo metodológico é suficiente para sua crítica da Mecânica Quântica.

gico não é o fato de que a Física é, em qualquer sentido, ingenuamente realista, uma ‘imagem da realidade’, mas sim uma teoria de invariantes, cujo objetivo é construir uma estrutura simples e coerente por trás da multidão vertiginosa de fenômenos. O princípio é bem semelhante aos princípios regulativos de Kant e mais tarde, em sua vida, Einstein iria reconhecer essa afinidade com um filósofo que ele inicialmente não gostava muito, enquanto defensor do conhecimento *a priori*.¹⁵ O ponto importante é que o realismo metodológico de Einstein não faz quaisquer afirmações sobre a realidade, além de sua invariância. Este é o ponto em que minha leitura de Einstein difere substancialmente de outras propostas, como as de Arthur Fine e Don Howard, que pensam que o realismo de Einstein implica determinismo ou separabilidade, respectivamente.

4 A Teoria Quântica do átomo

Os anos que se seguiram à proposta do modelo atômico de Bohr viram a ascensão rápida da Teoria Quântica para uma teoria cada vez mais complexa e sofisticada da microfísica e Einstein estava profundamente envolvido em seu desenvolvimento. Mesmo assim, ele estava insatisfeito com a falta de compreensão fundamental dos processos responsáveis pelos fenômenos quânticos. Havia um crescente corpo de evidência de que algumas suposições fundamentais, que formavam a base de toda a Física, teriam que ser abandonadas, mas não ficara claro quais modificações seriam necessárias para dar conta do estranho mundo dos *quanta*. Einstein reconheceu, há muito tempo, os problemas que a dualidade da luz introduzira para a mecânica e a eletrodinâmica, mas também na física atômica não havia no horizonte um relato consistente da dualidade de estados estacionários e saltos quânticos.

Mais uma vez, foi Einstein (1916) quem apontou uma consequência perturbadora do sucesso da teoria de Bohr. Ele conseguiu mostrar que a distribuição de energia de Planck para a radiação do corpo negro podia ser derivada do modelo atômico de Bohr, com o auxílio de algumas suposições simples sobre a *probabilidade* de emissão e absorção de radiação. Ele pôde ainda mostrar (EINSTEIN, 1917) que a radiação emitida tinha que ter um momento definido, ou seja, que ela era emitida em uma direção específica e não como uma onda esférica, tal como era descrito pela teoria eletrodinâmica clássica. Esta foi uma ruptura bastante radical com a visão clássica, na qual um corpo emite radiação continuamente a

15 Na época, Einstein expressou seus pensamentos sobre Física e realidade mais diretamente na sua palestra *Motivos para pesquisa* (EINSTEIN, 1918c), onde enfatizou que a busca pelo absoluto, que estaria por trás dos fenômenos variáveis, seria a motivação mais fundamental para se fazer física.

uma determinada taxa em todas as direções. No modelo de Einstein, haveria atos individuais de emissão em direções específicas que estariam distribuídas apenas estatisticamente (como o próprio Einstein comentou, isto era semelhante à lei do decaimento radioativo). Seria o próprio ato da emissão fundamentalmente indeterminístico? Hoje em dia, esta parece ser uma conclusão bastante plausível, já que temos uma teoria de enorme sucesso que determina as probabilidades de tais eventos elementares e nada mais do que as probabilidades. Einstein, contudo, não estava pronto para abandonar o determinismo. O que teria feito a hipótese de uma lei genuinamente estatística inaceitável para Einstein? O relato-padrão defende que o comprometimento de Einstein com o determinismo seria uma crença conservadora, profundamente enraizada que ele não se dispôs a abandonar em face do aumento das evidências contrárias. Quero argumentar, no entanto, que a atitude de Einstein para com o determinismo é (1) mais complexa que uma simples crença dogmática e (2) motivada pelo que ele acreditou ter aprendido de seu bem-sucedido trabalho anterior sobre os fundamentos da mecânica estatística e teoria do espaço-tempo.

Einstein considerava que sua contribuição central para a física estatística nos anos 1902-1904 fora o esclarecimento do conceito de probabilidade que entrava na definição estatística da entropia de Boltzmann: $S = k \ln W$. Ele explicou a probabilidade de um estado termodinâmico, como a fração de tempo que o sistema permanece naquele estado, em média, durante sua evolução dinâmica complexa. Isto implica que um sistema em equilíbrio não permanece simplesmente em seu estado mais provável (o estado de mais alta entropia), mas que também alcança outros estados com uma probabilidade expressa pela entropia destes. Assim, o estado do sistema flutuaria em torno do estado de equilíbrio de certa maneira bem definida. Esta teoria de flutuações em torno do equilíbrio levou Einstein a suas mais importantes contribuições, não somente em mecânica estatística (movimento browniano), mas também na nascente Teoria Quântica. O sucesso desses trabalhos deu apoio aos aspectos ainda controvertidos da mecânica estatística de Boltzmann: a segunda lei da termodinâmica não seria uma lei exata, mas apenas uma regularidade estatística, e as grandezas termodinâmicas macroscópicas não nos dariam sempre uma descrição exata do estado objetivo do sistema. Para um sistema de energia definida, por exemplo, o microestado (a especificação das posições e velocidades de todas as suas moléculas) tem que estar em uma região específica do espaço de estados (a superfície de energia), já que a energia total é simplesmente a soma de todas as energias das moléculas. Porém, um sistema a uma dada temperatura não tem uma energia definida, mas somente sua energia média é especificada. Desta forma, seu microestado também não está especificado em uma determinada região do espaço de estados e pode-se somente dizer que apresenta alta probabilidade de estar próximo da superfície energética definida pela energia média.

Isto confirmou para Einstein uma clara divisão entre os estatutos das descrições microscópica e macroscópica de um sistema físico: somente os microestados e suas dinâmicas – cuja realidade foi demonstrada dramaticamente em 1905 pela predição de Einstein sobre o movimento browniano – fornecem uma determinação completa e objetiva de um sistema físico. A macrodescrição e suas leis termodinâmicas são somente descrições incompletas, regularidades estatísticas aproximadas, derivadas da lei dos grandes números. Grandezas macroscópicas, tais como temperatura e entropia, são médias temporais definidas somente no limite de tempo infinito, de forma que para sistemas realísticos suas definições são apenas aproximadas.

Esta divisão adquiriu peso adicional com o desenvolvimento da Teoria da Relatividade de Einstein. Quando ele anunciou que “o fisicamente real no *Weltgeschehen* [os acontecimentos do mundo] (em oposição ao que depende da escolha de um sistema de referência) consiste das coincidências no espaço-tempo e nada mais”¹⁶, isto teve uma implicação importante para a mecânica estatística. Dado que o fisicamente real (no sentido discutido na seção anterior) é dado pela estrutura quadridimensional atemporal dos eventos no espaço-tempo, todos os eventos tanto no passado como no futuro existem objetivamente. Assim, não haveria a possibilidade de um futuro aberto que permitiria uma genuína indeterminação de eventos futuros. Qualquer lei dinâmica probabilística é, portanto, necessariamente uma descrição incompleta de eventos futuros. Esta observação exacerba a tensão entre a direcionalidade da termodinâmica e a ausência de direção do tempo na mecânica, que preocupava os defensores da mecânica estatística no século XIX. Einstein resolveu esta tensão invocando a distinção entre as realidades objetiva e fenomênica discutidas na seção anterior. Tanto a direcionalidade temporal, quanto a indeterminação de processos macroscópicos, são partes da realidade fenomênica e assim não estão em conflito com a atemporalidade da realidade objetiva.

A descrição objetiva é dada pelos microestados. Sua dinâmica é determinística, garantindo a compatibilidade com a teoria da relatividade e sua completa especificação através de leis gerais. Macroestados, no entanto, são estados fenomênicos que dependem de um particionamento convencional do espaço de estados para sua definição. Suas leis (tais como a segunda lei da termodinâmica) não são fundamentais, mas são leis estatísticas que podem coexistir com a determinação fundamental da dinâmica. Esta identificação dos macroestados estatísticos com o sentido da realidade fenomênica, discutida na seção anterior, adquiriria importância central para a compreensão que Einstein tinha da Teoria Quântica. Há, porém, uma diferença importante entre os dois casos de estados fenomênicos (na relatividade e na mecânica estatística) que discutimos: na mecânica estatística, a

16 Einstein para Ehrenfest, 26 de dezembro de 1915, CPAE 8.

descrição é *incompleta*, fornecendo apenas uma caracterização parcial do estado objetivo, ou seja, pode-se dizer que a relação entre descrição e estado é de um-para-muitos (cada descrição refere-se a muitos estados objetivos possíveis). As descrições não-invariantes da relatividade não são descrições incompletas neste sentido. Ao contrário, elas são “sobrecompletas”, cada estado de coisas objetivo pode ser descrito em diferentes sistemas de referência, de forma que a relação entre descrição e estado é de muitos-para-um. Podemos dizer que a descrição *não é absoluta*, mas relativa a um sistema de referência. Em ambos os casos, esta relação não é biunívoca (um-para-um), mas por razões diferentes. O princípio do realismo metodológico de Einstein implica em ambos os casos que a descrição não se refere a um estado objetivo e, portanto, não pode entrar em leis fundamentais¹⁷.

A descrição da emissão e absorção de radiação, que Einstein forneceu em 1916, só poderia ser para ele uma descrição fenomênica, apesar de seu sucesso, e não uma lei dinâmica fundamental. Einstein continuou buscando esta teoria fundamental. Na esperança de encontrar pistas para tal teoria, ele começou a desenvolver a ideia de um “experimento crucial” que decidisse sobre a natureza do ato de emissão de luz de um átomo, na esperança de esclarecer o aspecto mais misterioso do modelo atômico de Bohr: o salto descontínuo e instantâneo entre duas órbitas atômicas, que, aliás, de acordo com Bohr, deve produzir uma onda de luz estendida de frequência constante. (Não era apenas o mecanismo do salto que era obscuro, mas o fato de que ele deveria produzir uma onda de luz comparativamente imensa parecia completamente absurda.) Einstein propôs diversos experimentos durante os anos de 1920 que deveriam forçar uma resposta sobre se o ato de emissão seria instantâneo ou espacialmente e temporalmente estendido¹⁸. Todavia, nenhum dos experimentos produziu a resposta inequívoca que Einstein esperava. Parece que o fracasso em elaborar experimentos que reforçassem o esforço construtivo fez Einstein cada vez mais cético quanto à possibilidade de uma abordagem indutiva para a desejada teoria fundamental.

Relativamente pouco é conhecido sobre as especulações teóricas de Einstein no período compreendido aproximadamente entre 1915 e 1925, já que ele não publicou suas ideias e parecia até relutante em discuti-las em sua correspondência. Um vislumbre interessante pode ser obtido de Hendrik A. Lorentz (1927) que, tanto em uma carta a Einstein¹⁹, quanto em uma palestra dada em Pasadena em 1921, relata sobre uma teoria da luz que Einstein tentativamente considerava na época. Nesta teoria, *quanta* e ondas de luz coexistiriam. Enquanto os *quanta*

17 O importante papel da biunivocidade na relatividade geral é discutido em Howard (1992).

18 Um primeiro experimento mental é descrito em Klein (1970), outro posterior em van Dongen (2007a, 2007b).

19 H. A. Lorentz para Albert Einstein, 13 de novembro de 1921.

seriam partículas pontuais transportando pacotes de energia necessários para explicar os efeitos dos *quanta* de luz, seus movimentos seriam determinados por uma onda guia, de forma muito parecida como Louis de Broglie também imaginaria alguns anos mais tarde. Einstein nunca publicou um relato de suas ideias. Wigner relatou, a partir de discussões feitas na época em Berlim, que Einstein desistira da ideia da onda guia porque esta não daria conta dos processos de espalhamento: a correlação exata dos ângulos de espalhamento exigidos pela conservação de energia e momento não poderia ser causada por duas ondas que emanam em todas as possíveis direções de espalhamento²⁰. Era um problema semelhante ao que iria também refutar a teoria BKS proposta logo depois (próxima seção). Todavia, este cenário explica o entusiasmo inicial de Einstein para os esforços construtivos de de Broglie e Erwin Schrödinger, bem como sua percepção aguda dos seus problemas fundamentais.

Em 1923, Einstein publicou um artigo intitulado *A teoria de campos oferece possibilidades para a solução do problema quântico?* (EINSTEIN, 1923d), em que enunciou pela primeira vez, de maneira detalhada e programática, a esperança que ele levaria pelo resto de sua vida: derivar as propriedades das partículas elementares e seus comportamentos quânticos a partir de uma teoria de campo unificado, que estenderia a relatividade geral e a eletrodinâmica maxwelliana. Einstein propôs no artigo que as condições quânticas deveriam ser entendidas como consequência de uma sobredeterminação das equações de campo da teoria unificada. Se a teoria contivesse mais equações diferenciais do que variáveis de campo independentes, nem todo conjunto de condições iniciais seria permitido. Desta forma, ele esperava explicar tanto a existência de partículas elementares com propriedades definidas, quanto sua dinâmica quantizada. O truque consistiria em encontrar as equações gerais de campo e Einstein esperava poder repetir o sucesso da Relatividade geral: uma vez que a correta estrutura matemática fosse encontrada (como a geometria riemanniana, no caso da relatividade geral), toda a teoria poderia ser desenvolvida a partir de algumas poucas suposições de grande generalidade (como o princípio da equivalência). Em retrospectiva, seus anos de luta com a física do campo gravitacional²¹ pareciam-lhe um desvio desnecessário da estrada real da Matemática. Essa confiança está expressa muito claramente em suas *Palestras Spencer* de 1933, em Oxford, em que declarou: “Nossa experiência até aqui justifica nossa crença de que a natureza é a realização das mais simples ideias matemáticas concebíveis”. (EINSTEIN, 1933a apud EINSTEIN, 1954, p. 274) A virada de Einstein para a teoria do campo unificado tem, portanto, uma dupla raiz: a frustração com as tentativas de construir mode-

20 Conforme relatado por Wigner (1980, p. 461), citado por Howard (1990).

21 Ver a contribuição de Janssen (2004) para um relato do papel dos argumentos físicos no desenvolvimento da relatividade geral.

los construtivos para os *quanta* e os efeitos quânticos e a esperança de que a teoria que iria resolver estes problemas poderia ser encontrada diretamente através da busca da teoria de campo de “tudo” que fosse matematicamente mais simples e rigorosa. As *Palestras Spencer* são o ponto alto das declarações de Einstein a favor da confiança no valor heurístico da Matemática. Mas mesmo quando ele duvidou, em anos posteriores, se a teoria de campo poderia resolver o enigma quântico, permaneceu convencido de que esta era o único caminho que lhe estava aberto. Durante os anos 1920 e 1930, no entanto, suas esperanças depositadas em seu novo programa de pesquisa eram imensas. É preciso sempre manter isso em mente quando se tenta entender a reação de Einstein para com o desenvolvimento da Mecânica Quântica.

5 A ascensão da Mecânica Quântica

O ceticismo de Einstein decorrente de suas tentativas frustradas de encontrar um fundamento teórico para a velha Teoria Quântica é o pano de fundo que se deve ter em mente ao acompanhar suas reações a diversas tentativas de outros físicos em meados da década de 1920: primeiro, a teoria de Bohr-Kramers-Slater (BKS); depois, as mecânicas matricial e ondulatória e sua unificação na teoria da transformação, o que hoje conhecemos como mecânica quântica. Ele manteve seu interesse, mas acompanhou de fora, ficando até entusiasmado de início, no caso das mecânicas matricial e ondulatória. Mas quando os desenvolvimentos entraram em dificuldades ou em conflito com o que ele considerava princípios gerais bem estabelecidos, ele passou a ver isso como um sinal do fracasso do “programa indutivo”.

A teoria BKS gerou sérios problemas, antes mesmo de ser posta à prova. A ideia básica da teoria era associar a um átomo, em um determinado estado, uma orquestra de osciladores virtuais vibrando em todas as frequências que o átomo poderia emitir naquele estado. Cada oscilador de emissão gera radiação electromagnética (virtual) em sua frequência de oscilação e esta se propaga classicamente de acordo com as equações de Maxwell. Se outro átomo, com um oscilador virtual de absorção na mesma frequência, é exposto a esta radiação, haverá uma probabilidade, determinada pela intensidade da radiação, de que o átomo salte para um estado de maior energia. Einstein discordou da teoria por diversas razões (KLEIN, 1970), entre elas a violação da conservação da energia e a violação do determinismo. Conforme escreveu para Paul Ehrenfest, “essa ideia é uma velha conhecida minha, mas eu não a considero uma coisa real.”²². A teo-

22 Albert Einstein para Paul Ehrenfest, 31 de maio de 1924, citado em Klein (1970).

ria lembrou Einstein de suas próprias tentativas com uma teoria da onda piloto da luz, assim ele estava bem ciente de seus problemas. Quando a teoria BKS foi refutada pelos experimentos de Bothe-Geiger e de Compton-Simon, Einstein só comentou laconicamente com Ehrenfest: “Nós dois não tivemos dúvidas sobre isso.”²³ O ceticismo de Einstein ressurgiria posteriormente com suas questões críticas sobre a Mecânica Quântica, que seriam influenciadas pela experiência de fracasso dessas tentativas.

Werner Heisenberg retirou da teoria BKS não muito mais do que a ideia de osciladores virtuais, quando propôs uma nova Mecânica Quântica em 1925: ele eliminou as órbitas dos elétrons e descreveu os fenômenos atômicos inteiramente em termos da frequência e amplitude das *transições* entre estados. Ele não viu necessidade de substituir as órbitas dos elétrons por alguma outra descrição de estados atômicos. Max Born e Pascual Jordan mostraram que se as amplitudes de transição fossem dispostas em um arranjo bidimensional (matriz) poder-se-ia com estas matrizes realizar cálculos de forma análoga à mecânica clássica. Einstein acompanhou o desenvolvimento da mecânica matricial com interesse, mas com ceticismo. Heisenberg havia justificado a eliminação das órbitas dos elétrons com o argumento positivista de que tal órbita é, em princípio, não-observável. Como ele relata em Heisenberg (1969), Einstein protestou contra este positivismo, para grande surpresa de Heisenberg, já que este havia aceitado a difundida visão de que a Teoria da Relatividade de Einstein seria um paradigma do positivismo de Mach. Heisenberg cita Einstein, que disse: “[...] apenas a teoria decide o que se pode observar” e vê nesta conversa a semente para sua posterior ideia das relações de incerteza como uma consequência do formalismo da Mecânica Quântica. Heisenberg (1927) propôs que se compreendessem as matrizes da Mecânica Quântica como descrevendo grandezas físicas não como números precisos, mas com certo grau de indeterminação. Esta indeterminação corresponde à nossa incapacidade de observar as grandezas físicas com precisão ilimitada. Heisenberg deriva do formalismo matricial uma desigualdade, a relação de incerteza de Heisenberg, que limita a definição simultânea de duas propriedades complementares, como posição e momento de uma partícula. Em seguida, ele tenta mostrar, por meio de um experimento mental simples, que essa relação de incerteza também descreve os limites de nossas possibilidades de medições. Ele supõe que se tenta medir a posição de uma partícula através do espalhamento Compton, com um *quantum* de luz. Para uma medição precisa da posição, a luz tem que ter um comprimento de onda curto, e portanto, o *quantum* de luz tem que ter um grande momento linear. Mas isso significa que a observação perturba o momento da partícula. Assim, as precisões das medições de posição e momento se limitam mutuamente. As relações de incerteza de Heisenberg se tornariam uma das questões centrais na crítica de Einstein à Mecânica Quântica.

23 Albert Einstein para Paul Ehrenfest, 18 de agosto de 1925, citado em Klein (1970)

A mecânica ondulatória de Schrödinger, apresentada no início de 1926, num primeiro momento pareceu para Einstein uma abordagem muito mais promissora para compreender a Teoria Quântica. Em carta a Schrödinger, ele escreveu:

Estou convencido de que você fez um progresso decisivo com sua formulação das condições quânticas, assim como estou convencido de que o caminho de Heisenberg-Born é absurdo. (PRZIBRAM, 1963, p. 24)²⁴

A explicação das órbitas atômicas, como ondas estacionárias, prometeu o retorno a uma descrição contínua, e de acordo com uma teoria de campo, dos fenômenos quânticos, em consonância com o programa do próprio Einstein. Desde 1924, Einstein simpatizava com as ideias das ondas de matéria de de Broglie e fez uso delas no contexto de sua Teoria Quântica do gás ideal, o que por sua vez instigou a pesquisa de Schrödinger na mecânica ondulatória. Schrödinger pôde rapidamente mostrar que a mecânica ondulatória consegue reproduzir as previsões empíricas da mecânica matricial. Mas ela prometia fazer muito mais, já que fornecia um relato dinâmico dos fenômenos atômicos, em oposição à caracterização estática e abstrata dos estados atômicos na mecânica matricial. No entanto, logo se tornou claro que a mecânica ondulatória também apresentava sérios problemas de interpretação. Como o próprio Schrödinger reconheceu, a função de onda de um sistema de várias partículas não era um campo definido no espaço-tempo, mas uma função abstrata em um espaço de dimensão mais alta. Não parecia haver uma maneira de interpretar essa função em um quadro espaço-temporal. Além disso, a esperança inicial de Schrödinger - de que ele poderia representar partículas livres como pequenos pacotes de ondas -, enfrentou a dificuldade de que tais pacotes de onda espalhariam ao longo do tempo.

Diferentemente das intuições de Schrödinger, Max Born propôs entender a função de onda não como um objeto físico extenso, mas como expressando a probabilidade de uma partícula pontual estar em um lugar específico. Esta interpretação estatística forneceu uma explicação natural para a alta dimensionalidade da função de onda, característica para distribuições de probabilidades conjuntas de muitas partículas. Também resolveu o problema da instabilidade do pacote de ondas. Mas frustrou a esperança de que a mecânica ondulatória poderia dar um fundamento à Teoria Quântica em termos de teoria de campo. O entusiasmo de Einstein diminuiu consideravelmente. Se a mecânica ondulatória era uma teoria estatística, ele a via como uma descrição incompleta da realidade objetiva, de acordo com suas convicções de longa data sobre probabilidade. Ele não acreditava que as evidências da física atômica eram fortes o

24 Albert Einstein para Erwin Schrödinger, 26 de abril de 1926, citado em Przibram (1963, p. 24).

suficiente para justificar o abandono do determinismo. Ao final do ano, ele escreveu para Born:

A mecânica quântica é admirável. Mas uma voz interior me diz que ainda não é a palavra final. A teoria fornece muita coisa, mas ela pouco nos aproxima dos segredos do Senhor. De qualquer forma, estou convencido de que *ele* não joga dados.²⁵

Que este juízo também incluía a mecânica ondulatória pode ser visto em uma carta a Paul Ehrenfest de janeiro de 1927, na qual diz que seu coração não se aquece com as “coisas de Schrödinger” [*Schrödingerei*]. (EHRENFEST apud FINE, 1996a, p. 27)

Na primavera de 1927, Einstein tentou adicionar trajetórias de partículas à mecânica ondulatória, revivendo sua ideia anterior de uma teoria dual de partículas e uma onda-piloto. Há um manuscrito não-publicado²⁶ sobre essa tentativa, com uma nota dizendo que Walther Bothe apontou uma dificuldade sobre o esquema proposto por Einstein: no caso de um sistema composto de duas partes que não interagem, a função de onda do sistema composto pode ser representada como o produto das funções de onda das partes. Se a trajetória correspondente à função de onda de uma parte for construída, ela não será idêntica à trajetória que se obteria se a outra parte não existisse. Isso entra em conflito com a suposição de que as duas partes são não-interagentes. Einstein abandonou também esta tentativa de uma teoria da dual de ondas e partículas, mas na reunião de Solvay, de 1927, ele ainda considerava as tentativas semelhantes de de Broglie como promissoras.

6 Os primeiros debates sobre mecânica quântica

Bohr, assim como Einstein, tinha acompanhado o desenvolvimento da Mecânica Quântica como um espectador interessado. Ao contrário de Einstein, ele não foi detido pelas dificuldades que a mecânica matricial e a ondulatória apresentaram para uma interpretação física. Como o seu modelo atômico já tinha mostrado, ele estava disposto a considerar modelos que contivessem elementos contraditórios e o fracasso da teoria BKS confirmara sua suspeita de que a descrição espaço-temporal clássica dos processos atômico tinha de ser abandonada. A natureza abstrata da mecânica matricial parecia para ele mais uma virtude do que

25 Albert Einstein para Max Born, 4 de dezembro de 1926. (EINSTEIN; BORN, 1969, p. 127)

26 Arquivo Einstein, n° 2-100. O manuscrito é discutido por Belousek (1996).

um defeito. Embora ele também recebesse a mecânica ondulatória de Schrödinger como uma expressão adequada do dualismo onda-partícula, ele discordou fortemente da esperança de Schrödinger de que ela levaria de volta para uma descrição dos fenômenos atômicos em termos de teoria de campos. Em vez disso, Bohr imaginou que a Mecânica Quântica deveria apresentar uma simetria entre uma representação de partícula e uma de onda, tanto para a matéria, quanto para a luz. Esta visão se desenvolveria no conceito da complementaridade de Bohr, formulado pela primeira vez em sua palestra em Como, na Itália, em setembro de 1927. Esta palestra foi moldada pela disputa de Bohr com Heisenberg a respeito do artigo deste sobre a incerteza, enviado para publicação sem o consentimento de Bohr. Bohr desaprovou dois pontos no artigo de Heisenberg. Este tinha cometido um erro em seu experimento de pensamento sobre a medição da posição através de espalhamento Compton: o fato de um *quantum* de luz transferir momento para a partícula observada não é em si um impedimento para a determinação do momento da partícula. Poderíamos simplesmente medir o momento do *quantum* de luz antes e depois do espalhamento. Mais importante para Bohr: Heisenberg baseou-se inteiramente numa representação de partícula em sua interpretação da Mecânica Quântica. Bohr mostrou que uma consideração da natureza dual da luz poderia resolver o problema com o experimento mental de Heisenberg. A tentativa de determinar a posição em que o espalhamento aconteceu requereria o uso de um microscópio de “raio gama”, que capta a luz proveniente do ponto de espalhamento. Isto significa que agora temos de considerar a natureza ondulatória do *quantum* de luz. Isto impõe uma limitação, bem conhecida da óptica clássica, sobre a exatidão com que esta posição pode ser determinada. Esta é inversamente proporcional ao comprimento de onda da luz, o que salva a relação de incerteza de Heisenberg. A palestra de Bohr em Como, que passou por várias revisões antes de ser publicada no verão de 1928, contém uma discussão detalhada deste experimento mental e tornou-se a formulação canônica da interpretação da complementaridade de Bohr da Mecânica Quântica. Ela também reflete as discussões de Bohr na conferência de Solvay, em outubro de 1927.

Este encontro marca o início da crítica pública de Einstein à Mecânica Quântica. Ela vem sob a forma de uma questão aparentemente modesta de classificação que, no entanto, aponta um problema com o qual a Mecânica Quântica ainda está lutando hoje em dia: o problema da medição. Einstein propôs o seguinte experimento mental: enviemos partículas com certo momento (representado na mecânica ondulatória por um trem de ondas paralelas) através de uma fenda estreita. Atrás da fenda, a onda será difratada, emanando da fenda sob a forma de cilindros concêntricos. Coloquemos agora uma tela cilíndrica atrás da fenda para detectar as partículas. O que encontramos não são ondas, mas eventos individuais de detecção (minúsculos clarões numa tela fluorescente ou pequenos pontos pretos numa chapa fotográfica). Einstein pergunta como

devemos pensar as ondas na Mecânica Quântica no presente caso. Ele considera duas possibilidades.

Na primeira maneira de pensar, a função de onda apenas descreve um grande número de partículas de uma forma global. O que a função de onda descreve, especificamente, é o número relativo de partículas individuais em um determinado lugar. Usualmente, essa posição tem sido equiparada com a posterior interpretação dos *ensembles* estatísticos de Einstein para a Mecânica Quântica (ao passo que as partículas individuais teriam trajetórias bem definidas, a função de onda fornece apenas uma descrição incompleta dessas trajetórias).²⁷ Esta equiparação é incorreta, o que é mostrado pelo fato de que Einstein diz na sequência de seu texto: a primeira interpretação não pode dar conta da validade das leis de conservação, do resultado do experimento de Bothe-Geiger ou das trajetórias na câmara de Wilson. Estes comentários enigmáticos indicam que Einstein tinha em mente uma ideia bem diferente. Parece que o pano de fundo para sua discussão é seu pensamento sobre a estatística quântica, que ele originalmente queria apresentar em uma palestra na Conferência de Solvay. Diante desse pano de fundo, ele contempla a possibilidade de que a função de onda possa ser vista como a descrição de um coletivo real de partículas, cujo comportamento individual não é especificado. Assim, é compreensível que Einstein pense que a primeira interpretação não possa capturar as correlações entre as posições subsequentes necessárias para a explicação das trajetórias na câmara de Wilson e nem possa explicar a correlação entre as energias das partículas individuais, no experimento de Bothe-Geiger. Essa leitura também explica porque Einstein não endossa a primeira interpretação, como todos os comentadores parecem assumir.

A segunda maneira de pensar a função de onda é entendê-la como uma descrição completa de uma partícula individual, que realmente não teria uma posição definida. Assim, a função de onda descreveria probabilidades de um sentido diferente: ao passo que a partícula antes da detecção não teria uma posição definida, ela dispararia um evento de detecção em um determinado ponto na tela com a probabilidade dada pela função de onda. Conforme apontado por Einstein, deve-se pensar em uma função de onda para cada partícula individual para explicar fenômenos, como o experimento de Bothe-Geiger ou as trajetórias na câmara de Wilson. No entanto, neste caso, encontramos um problema para explicar os eventos de detecção na tela. Considere um trem de ondas correspondendo a apenas uma partícula. Sabemos que se houver um clarão em um ponto da tela, não haverá outro em nenhum outro lugar da tela. Mas como é que a tela sabe? Afinal, a onda incide de forma homogênea sobre toda a tela e se houver, digamos, uma probabilidade de 10% de que ela dispare um clarão em uma

27 Ver, por exemplo, as discussões em Fine (1996a), Howard (1990), Home e Whittaker (2007) e Bacciagaluppi e Valentini (2009).

região da tela, e houver a mesma probabilidade de ela disparar um *flash* em uma segunda região diferente da tela, então deveria haver uma probabilidade de $10\% \times 10\% = 1\%$ de provocar dois clarões em ambas as regiões. Mas não é isso o que a Mecânica Quântica prevê; ao contrário, ela exige sempre que ocorra apenas um único clarão.

Mas, novamente, como é que a tela sabe que deve brilhar apenas uma vez? Parece que no momento em que um clarão ocorre em um ponto, a onda tem que ser “desligada” em todos os outros lugares. Tal processo deve ser, como Einstein colocou, “um mecanismo de ação à distância muito particular, que impede que a onda continuamente repartida no espaço produza uma ação em *dois* lugares da tela.” Einstein apontou um dilema para a nossa compreensão da Mecânica Quântica: uma interpretação como a descrição de um coletivo seria simples, mas estaria em conflito com o formalismo da Mecânica Quântica e com as evidências empíricas. Uma interpretação que descreve uma partícula individual como um objeto espacialmente estendido exigiria uma transição não-física e não-local durante a sua detecção. Este processo é nada mais do que o controvertido “colapso da função de onda”, que von Neumann (1932) iria formalizar alguns anos mais tarde. A conclusão que Einstein retira desse dilema é um cauteloso endosso da proposta de de Broglie, descrevendo o processo com *duas* entidades: uma onda de Schrödinger espacialmente estendida e uma partícula localizada, guiada pela onda, mas que é responsável pela interação local com a tela. É este endosso que corresponde à afirmação posterior de Einstein de que a Mecânica Quântica é uma descrição incompleta dos sistemas individuais.

As várias respostas à pergunta de Einstein constituem a primeira discussão publicada do problema da medição da Mecânica Quântica e, certamente, merecem um tratamento mais detalhado do que se pode oferecer aqui. Vou me concentrar na resposta de Bohr, uma vez que ele, já neste momento, surge como o porta-voz do grupo de físicos teóricos que defendem, contra as críticas de Einstein, que a Mecânica Quântica foi finalizada. Bohr respondeu imediatamente após a contribuição de Einstein, mas a resposta foi cortada dos anais publicados, assim como todas as outras contribuições de Bohr, para ser substituída por uma tradução em francês da palestra de Bohr em Como. A resposta original de Bohr está registrada apenas nas notas um tanto fragmentadas da discussão, preservada nos Arquivos Niels Bohr.²⁸ É plausível supor que o desejo de Bohr de substituir suas contribuições por uma reedição da palestra de Como implica que ele via a palestra como uma expressão mais ampla e coerente de suas respostas. Assim, parece aceitável usar a palestra de Como para extrapolar o significado das notas de discussão.

28 Reimpresso em parte em Bohr (1985, p. 99-106) e em Bacciagaluppi e Valentini (2009, parte 3).

Bohr opõe-se ao dilema de Einstein com um argumento que ele também apresentou na palestra de Como: a Mecânica Quântica é uma coleção de métodos matemáticos adequados para descrever nossas observações. Mas temos que abandonar a esperança de que ela possa nos dar um quadro exaustivo dos processos que ocorreriam entre essas observações. “Exaustivo” aqui deve ser entendido como sendo, por um lado, uma descrição espaço-temporal que, por outro lado, corresponde ao que Bohr chama de “causalidade”, ou seja, a conservação de energia e momento. Bohr argumenta que a impossibilidade de uma descrição exaustiva é devido à impossibilidade de observar os sistemas microscópicos sem uma interação entre o instrumento de medição e o objeto. As limitações específicas da Teoria Quântica resultam do fato de que essa interação envolve sempre, pelo menos, a transferência do *quantum* de ação de Planck.

Não é óbvio o modo como o argumento de Bohr sobre os limites de observabilidade justifica sua afirmação sobre a inaplicabilidade das descrições espaço-temporais na Mecânica Quântica. Nada no dilema de Einstein depende de um pressuposto de observabilidade sem interferência. A única observação que ocorre é a detecção do evento individual. Pelo contrário, a questão de Einstein versa sobre a descrição objetiva de processos não observados. Mesmo assim, há uma boa justificativa física por trás do repúdio de Bohr a uma representação espaço-temporal contínua dos processos atômicos: trata-se simplesmente da longa lista de tentativas frustradas de encontrar tal representação, primeiro na velha Teoria Quântica, depois na própria teoria BKS de Bohr e, finalmente, na mecânica ondulatória de Schrödinger. A justificativa epistemológica da não-classicalidade fundamental, que Bohr tenta colocar no lugar de um menos glamoroso reconhecimento de derrota, tornou-se um tema recorrente na interpretação da Mecânica Quântica. No entanto, ela não satisfaz Einstein por várias razões.

Primeiro, ela está baseada em uma afirmação completamente geral sobre as possibilidades das observações empíricas, que não pode nunca ser comprovada em qualquer nível de generalidade e que foi logo contestada por Einstein, que tentou dar exemplos de medição simultânea de observáveis não-comutativas. A questão da mensurabilidade de observáveis não-comutativas tornou-se tema de discussões acaloradas entre Bohr e Einstein, durante a conferência de Solvay de 1927 e nos anos posteriores. Essas discussões informais não foram gravadas na época. Elas só foram descritas 20 anos depois, na contribuição de Bohr para o volume dedicado a Einstein na *Library of living philosophers*. (BOHR, 1949) Nessas discussões, Einstein tentou construir situações experimentais que permitiriam a medição simultânea de grandezas complementares. Bohr rebateu os argumentos de Einstein, aplicando as relações de incerteza também para o aparelho macroscópico de medição, o que introduziu uma influência incontável do aparelho de medição no objeto observado.

Mais importante, todavia, mesmo admitindo-se a impossibilidade de certas medições de grandezas teóricas, é que isso de forma alguma implica, de maneira geral, na impossibilidade de formar uma teoria coerente e empiricamente bem sucedida a partir dessas grandezas. Portanto, Einstein não se convenceu da impossibilidade de se construir contra-exemplos à relação de incerteza. Ele podia argumentar que a Física está cheia de teorias baseadas em grandezas não observáveis. Este foi o caso da mecânica estatística no século XIX e também era verdade para muitos conceitos teóricos contemporâneos à Mecânica Quântica, tais como o potencial eletromagnético, a entropia ou mesmo o conceito onipresente de energia. Para todos esses, o fato de eles não poderem ser medidos diretamente não era visto como um motivo para limitar geralmente sua utilização teórica.

A conclusão de Einstein a partir dos debates foi que a Mecânica Quântica é uma descrição autoconsistente, mas incompleta, dos processos objetivos. Ela é fenomênica, da mesma forma que a termodinâmica é fenomênica, operando com estados que são dependentes da descrição. Para argumentar neste sentido, Einstein retornou ao tipo de argumento conceitual como o exemplo da única fenda, tentando dirigir a questão sobre a realidade física dos estados quânticos contra Bohr: neste sentido, o artigo Einstein-Podolsky-Rosen é uma continuação direta do argumento da única fenda de Einstein de 1927.

7 O argumento do emaranhamento

A contribuição mais famosa de Einstein para o debate sobre a Mecânica Quântica é o artigo *A descrição da realidade física fornecida pela mecânica quântica pode ser considerada completa?*, em coautoria com Boris Podolsky e Nathan Rosen e publicado em 1935, normalmente conhecido como *Electron paramagnetic resonance* (EPR). Depois de uma réplica de Bohr, que foi um tanto obscura no conteúdo, mas confiante no tom, o artigo foi em larga medida ignorado pela comunidade dos físicos. Isso só mudou com o uso, por parte de J. S. Bell, do exemplo do EPR para um argumento que foi substancialmente além do de Einstein. O artigo de Bell (1964) foi parte do ressurgimento de um interesse nos fundamentos da Mecânica Quântica e uma reavaliação da dominância da interpretação de Copenhague, o que também levou a uma nova apreciação das críticas de Einstein. Olharei brevemente para a relevância de Bell ao argumento de Einstein no epílogo. Motivada pela análise de Bell, uma série de análises da situação física descrita por Einstein foi apresentada nas últimas décadas. Enquanto isso, tam-

bém historiadores e filósofos, com sensibilidade histórica, encontraram detalhes interessantes sobre o contexto histórico do argumento de Einstein.²⁹

Uma faceta interessante da história que os historiadores têm desvelado é que foi Boris Podolsky quem escreveu o artigo e que o próprio Einstein ficou insatisfeito com a maneira como o argumento foi escrito, como ele escreveu para Schrödinger em 19 de junho de 1935: “O principal ponto ficou enterrado, por assim dizer, debaixo da erudição.” Na mesma carta, ele fez uma apresentação muito mais simples do argumento, que repetiu logo depois, em um artigo intitulado *Física e realidade*. (EINSTEIN, 1936) Olharei primeiro para esta apresentação e depois para o argumento de EPR completo. Isso não só ajuda a entender a erudição do argumento de EPR, como também mostra uma diferença importante entre as duas versões.

Na carta para Schrödinger, Einstein inicia com uma explicação de sua ideia de completude. Ele começa com um exemplo simples da vida cotidiana: considere duas caixas com as tampas fechadas. Você sabe que há uma bola que você sempre vai encontrar em uma das caixas quando abrir as tampas. Você descreve o estado das caixas dizendo que a probabilidade de a bola estar em uma dada caixa é $\frac{1}{2}$. A questão agora é: será esta uma descrição completa da situação física? Se você responder não, você está supondo que há um estado de coisas objetivo a respeito da bola estar em uma ou outra caixa, mesmo que você não tenha aberto nenhuma tampa. Se você responder sim, você tem que supor que, sem o ato de abrir a tampa, não há questão de fato a respeito de onde a bola está. Só depois de você abrir uma tampa e encontrar ou não uma bola é que você causa a bola estar em uma caixa específica. Estas duas respostas, obviamente, correspondem às duas possibilidades que Einstein tinha descrito em sua questão sobre o experimento da fenda única na conferência de Solvay. Talvez por isso Einstein anacronicamente chamasse a primeira alternativa de “interpretação de Born”, embora Born já tivesse se unido há muito tempo à ortodoxia de Copenhague; e a segunda alternativa, de “interpretação de Schrödinger”, apesar de Schrödinger apontar, em sua resposta, que ele já ultrapassara “há muito tempo o estágio em que pensava que se pudesse ver a função ψ de alguma forma direta como uma descrição da realidade.”³⁰ No entanto, o verdadeiro inimigo era Niels Bohr, cujo nome não aparece na carta, mas que é referido como “o filósofo talmudista que não dá a mínima para a realidade, o bicho-papão das mentes ingênuas”, que afirma que ambas as interpretações são diferentes apenas no palavreado e que o debate é inútil. A introdução de Einstein deixa bem claro que ele próprio não está inge-

29 Discussões bem conhecidas são as de Howard (1985), Fine (1996b) e Beller e Fine (1993). Referências adicionais podem ser encontradas no panorama apresentado por Home e Whitaker (2007).

30 Schrödinger para Einstein, 19 de agosto de 1935, EA 22-051

nuamente adorando o bicho-papão da realidade. Ele reconhece que não temos nenhuma maneira de conhecer a realidade independentemente da sua descrição física. Portanto, não podemos comparar a descrição física diretamente com a realidade. Desta forma, não está imediatamente claro como podemos decidir qual das duas interpretações é correta. É por isso que Einstein introduz um princípio adicional que ele chama de princípio de separação:³¹ supondo que as caixas estão espacialmente separadas e que não há interação física entre as duas, o estado real de uma caixa e de seu conteúdo é independente do que acontece com a outra. Mas, então, abrindo a tampa de uma e verificando se existe dentro dela uma bola, não pode alterar o estado real da outra caixa. Por outro lado, após abrir a tampa de uma caixa, sabe-se se a bola está na outra ou não. Este fato sobre a outra caixa deve também, portanto, por causa do princípio de separação, ter sido verdade antes de abrir a tampa da primeira caixa. Einstein salienta que a analogia com o caso quântico é imperfeita e que o exemplo cotidiano deve somente ser visto como uma explicitação do conceito de incompletude.

A análise de Einstein do caso quântico está baseada na representação de estados de sistemas compostos na Mecânica Quântica-padrão e, especialmente, o fenômeno para o qual Schrödinger (1935) cunhou mais tarde o termo “emaranhamento”, em um artigo escrito como reação a Einstein. Embora esta representação esteja implícita na formulação de von Neumann da Mecânica Quântica, a questão geral da descrição de estados em sistemas compostos não tinha suscitado muito interesse até então. No formalismo padrão do espaço de Hilbert da Mecânica Quântica, existe, para qualquer observável físico O , um conjunto de valores o_i (os *autovalores* do observável) que este observável pode assumir. Há também um conjunto de *autoestados* Ψ_i , correspondentes aos autovalores o_i , definido pela equação de autovalores

$$\hat{O}\Psi_i = o_i\Psi_i,$$

onde $\hat{O}$ é o operador do espaço de Hilbert correspondente ao observável O . Estes autovalores formam uma base de todo o espaço de Hilbert, ou seja, todo estado Ψ no espaço de Hilbert pode ser representado como uma combinação linear

$$\Psi = \sum_i c_i \Psi_i.$$

31 As discussões do princípio da separação de Einstein (FINE, 1996a; HOWARD, 1985) têm analisado este princípio como consistindo em dois pressupostos logicamente independentes: *separabilidade*, a existência de estados independentes dos dois subsistemas; e *localidade*, o pressuposto de que uma mudança de estado de um subsistema não influencia o estado do segundo. Ninguém na época de Einstein duvidava da localidade e Einstein sempre supôs a conjunção de ambos. Assim, geralmente falarei apenas da separabilidade como pressuposto relevante para a discussão.

Dois observáveis diferentes O e O' terão em geral diferentes conjuntos de autoestados Ψ_i e Ψ'_i .

Novamente, Einstein considera dois sistemas A e B que estão separados um do outro e não interagem fisicamente. Para um observável O^A em A e O^B em B, podemos escrever um estado Ψ^{AB} do sistema composto na forma

$$\Psi^{AB} = \sum_{i,j} c_{ij} \psi_i^A \psi_j^B,$$

onde os ψ_i^A e os ψ_j^B são as bases dos autoestados correspondentes aos observáveis O^A e O^B , respectivamente. Se escolhermos um observável diferente O'^A para o sistema A, podemos igualmente representar Ψ^{AB} na base do auto-estados ψ'_i^A de O'^A :

$$\Psi^{AB} = \sum_{i,j} c'_{ij} \psi'_i^A \psi_j^B.$$

Note que usamos ainda a mesma base do estado para o sistema B.

Esta representação implica uma ruptura radical com as expectativas clássicas: um estado Ψ^{AB} que tem esta forma não pode, em geral, ser escrito como produto de um estado do sistema A e um estado do sistema B. Isto significa que a Mecânica Quântica não nos dá um estado quântico definido para cada componente individual do sistema, quando o sistema composto está em um estado emaranhado. No entanto, o postulado da redução implica em previsões definidas para os estados dos sistemas componentes individuais, se for realizada uma medição em um dos sistemas. Se medirmos, digamos, o observável O^A , o estado Ψ^A do sistema A depois da medição será um dos auto-estados ψ_i^A , ao passo que o estado do sistema B será o correspondente “estado relativo” $\psi^B = \sum_j c_{ij} \psi_j^B$. Se, ao invés disso, medirmos O'^A , o estado Ψ'^A será um dos autoestados ψ'_i^A e o estado ψ_i^B será $\sum_j c'_{ij} \psi_j^B$, que em geral é diferente de ψ^B .

Neste ponto, Einstein aplica o princípio de separação: a situação física do sistema B não pode ser afetada por uma medição no sistema A. Assim, essa situação física deve ser a mesma, não importando se medimos O^A ou O'^A . Isto significaria que a mesma situação física é descrita por dois estados quânticos diferentes ψ^B e ψ'^B . Os estados quânticos não seriam, portanto, uma “descrição biunívoca” da realidade física (ou seja, eles não estariam em uma relação biunívoca com os elementos da realidade física). Até aqui, a argumentação de Einstein é bastante

incontestável. Além disso, ela é um claro reflexo de seu realismo metodológico: ele não faz suposições sobre a realidade objetiva, salvo que esta seja a mesma em ambas as situações.

Mas Einstein não para neste ponto: ele logo conclui que a descrição quântica não é biunívoca, pois ela é incompleta, e que, portanto, a Mecânica Quântica deve ser uma teoria estatística. Conforme já foi discutido na seção 4, esta conclusão não se justifica logicamente. Uma descrição que não é biunívoca não é necessariamente incompleta: por exemplo, na relatividade restrita, pode-se ter descrições diferentes do mesmo estado objetivo (correspondendo a diferentes referenciais). Isto não implica que a descrição seja incompleta, mas que ela não é absoluta. Além disso, a estrutura do argumento torna óbvio que Einstein não conseguiu provar a incompletude, mas a não-absolutidão: o que ele mostrou foi que várias descrições se aplicam a uma única realidade objetiva e não que uma descrição refere-se a diversas realidades objetivas. O salto lógico injustificado é, no entanto, intuitivamente plausível se pensar-se em termos da mecânica estatística, onde ambas as formas de não-univocidade são válidas; e esta era, naturalmente, a intuição que Einstein tinha enquanto fazia o argumento.

Em mecânica estatística, pode-se fazer referência a um microestado, por meio de diferentes distribuições de probabilidade, e uma distribuição de probabilidade se refere a diferentes microestados. A diferença entre essas duas noções de não-univocidade é ilustrada nas figuras abaixo para um sistema de uma partícula que pode estar em diversos microestados a, b, c etc:

Figura 2

Figura 3

A grandeza $P(x)$ plotada nestas figuras dá a probabilidade de encontrar a partícula no estado $x = a$ etc. A figura superior ilustra a incompletude usual do tipo *uma descrição/muitos estados*. Uma e a mesma função de probabilidade $|\Psi(x)|^2$ é compatível com a partícula, estando em muitos estados diferentes a, b, c etc. A figura inferior ilustra a não-univocidade do tipo *muitas descrições/um estado*, que chamamos anteriormente de não-absolutidão: diferentes funções de probabilidade – aqui $|\Psi_1(x)|^2$ e $|\Psi_2(x)|^2$ – são compatíveis com a partícula, estando em um e o mesmo estado a . A descrição por meio do macroestado estatístico é não-unívoca em ambos os sentidos. Einstein havia mostrado que a segunda forma de não-univocidade vale na Mecânica Quântica e inferiu que esta é uma teoria estatística. Embora a não-absolutidão também valeria em uma teoria estatística, uma descrição não-absoluta não é necessariamente estatística, como vimos no caso da relatividade.

Esta lacuna no argumento simples de Einstein é possivelmente a razão para a argumentação mais complicada no artigo EPR. Podolsky pode ter percebido a necessidade de um passo adicional que Einstein achou uma erudição desnecessária. O artigo tenta mostrar diretamente que a descrição quântica é incompleta (e não apenas não-biunívoca), provando que a mesma descrição pode se referir a vários estados diferentes da realidade. Mas, para isso, Podolsky precisa do controvertido “critério da realidade” que é delineado no início do artigo:

Se, sem de modo algum perturbar um sistema, pudermos prever com certeza (ou seja, com probabilidade igual à unidade) o valor de uma quantidade física, então existe um elemento de realidade física correspondente a essa quantidade física. (EINSTEIN; PODOLSKY; ROSEN, 1935, p. 91)

Este critério implica que, se um sistema quântico é descrito por um autoestado do operador correspondente a alguma grandeza física, então existe um “elemento de realidade física” correspondendo ao seu autovalor. O que EPR a

seguir mostram é que se pode construir um tipo específico de estado emaranhado de sistemas separados, onde cada medição da posição da partícula A deixa também B em um autoestado de posição e cada medição do momento da partícula A deixa também B em um autoestado de momento.³² Então, o critério da realidade implica que se uma medição de posição for realizada em A, há um elemento de realidade correspondendo à posição de B; e se uma medição de momento for realizada em A, há um elemento de realidade correspondendo ao momento de B. Mas o princípio de separação implica que esses elementos de realidade da partícula B existem independentemente do que foi feito ou medido na partícula A. Mas não há nenhum estado quântico que permitiria à partícula B ter, ao mesmo tempo, posição definida e momento definido. Assim, a Mecânica Quântica é incompleta no sentido estrito. O que permite EPR chegar a esta conclusão é o critério da realidade. Este critério permite concluir, a partir do resultado da medição na partícula A, uma afirmação sobre a real situação da partícula B. No entanto, isto implica um sentido mais forte de realismo do que o realismo metodológico de Einstein. Se alguém aceita o realismo tradicional, supondo que qualquer resultado de medição reflete um elemento da realidade, então a conclusão não é problemática. Se, como Einstein na carta a Schlick, uma distinção estrita for feita entre fenômenos e realidade física objetiva como uma construção intelectual, então não é evidente que uma medição e as previsões que seguem a partir dela fornecem realidade objetiva para a grandeza medida: o campo gravitacional na relatividade geral pode ser medido perfeitamente bem, mas isso ainda não mostra que o campo gravitacional tenha realidade objetiva na teoria fundamental. O desconforto de Einstein com o artigo de EPR também pode ter a ver com essa “bagagem metafísica” adicional. Como Einstein escreveu a Schrödinger: “A única coisa que é essencial para mim é que Ψ^B e Ψ'^B sejam diferentes. [...] Se Ψ^B e Ψ'^B podem ser interpretados como autofunções de diferentes observáveis não me interessa [*ist mir wurst*].” E de fato, o simples argumento de Einstein é suficiente para mostrar que a Mecânica Quântica não oferece a descrição invariante que para ele era o marco da objetividade. Isso certamente foi suficiente para que ele justificasse seu programa de encontrar uma descrição mais fundamental. No entanto, isso não justifica a confiança de Einstein de que os enigmas da Mecânica

32 Este exemplo específico é um pouco infeliz, já que os autoestados de momento são completamente “delocalizados” (cada autoestado é uma onda plana que se estende por todo o espaço). Portanto, é problemático supor que as partículas possam ser separadas espacialmente. Este problema foi evitado por David Bohm (1951), que propôs pela primeira vez considerar um estado onde o *spin* das partículas está emaranhado. Tais estados podem ser bem-localizados, então não há problema em pensar um estado de duas partículas muito separadas e sem interagirem, que, no entanto, apresentam *spin* emaranhado. Discussões modernas do argumento de EPR geralmente operam com este estado. Além disso, estados emaranhados de *spin*, de partículas e de fótons, têm sido a realização experimental usual da montagem de EPR e se tornaram objeto de estudo experimental extensivo. Ver Bertlmann e Zeilinger (2002) para vários trabalhos sobre a história de realizações experimentais do experimento de EPR-Bohm.

Quântica pudessem ser explicados como efeitos estatísticos dentro de uma interpretação dos *ensembles* estatísticos (ver seção 6).

Foi essa confiança que Schrödinger criticou. Ele enviou para Einstein uma longa carta com uma réplica a seu argumento de que a Mecânica Quântica sofre de incompletude.³³ Ele argumentou que a interpretação dos *ensembles* estatísticos de Einstein para a função de onda fracassa se considerarmos as relações funcionais entre observáveis diferentes. Ele considera o conjunto de operadores $O_a = (p^2/a + ax^2)/\hbar$ para qualquer valor de a . Cada um destes operadores pode somente ter autovalores discretos $(2n + 1)$ para alguma função de onda Ψ possível. Isso é fácil de ver: para um oscilador harmônico com frequência $\omega = a/m$ (onde m é a massa da partícula), O_a seria o operador de número que conta o estado de excitação do oscilador. Em geral, O_a não terá este significado físico, mas ele ainda pode ser definido formalmente e terá o mesmo espectro de autovalores. Para explicar este espectro a partir de uma teoria de *ensemble*, temos que supor que qualquer Ψ descreve uma partícula com valores definidos de p e x , de tal forma que O_a seja inteiro para todo valor de a . Obviamente, se ajustamos p e x para que O_a seja inteiro para algum a , e agora variamos a por uma quantidade pequena, O_a deixará de ser inteiro. Este exemplo simples mostra que não pode existir uma interpretação de *ensemble* que dê conta dos valores de funções de observáveis, a partir dos valores desses observáveis.³⁴ Todavia, o ponto feito por Schrödinger não foi assimilado por Einstein. Em sua resposta, ele escreveu: “Se eu afirmasse que entendi sua última carta, seria uma grande mentira.” Isto não o desencorajou. Duas sentenças depois, ele introduz suas próprias ideias sobre o assunto com bom humor: “Agora, se eu deslizar sobre tudo o que não entendi, eu não vejo porque é contraditório supor que a função Ψ se refere a um *ensemble* estatístico.”

A resposta de Bohr ao artigo de EPR veio em duas partes: um breve anúncio preliminar (BOHR, 1935a) e uma discussão um pouco mais longa. (BOHR, 1935b) Esta última também fez referência a uma vindoura exposição detalhada que, no entanto, nunca apareceu. Era óbvio que Bohr tinha de questionar o critério de realidade de EPR, a fim de evitar o dilema do EPR entre a não-localidade e a incompletude, já que ele concordava que a Mecânica Quântica não deveria permitir um distúrbio mecânico à distância. A resposta direta seria negar que possa haver um conceito significativo de realidade objetiva na Mecânica Quântica:

33 Schrödinger para Einstein, 19 de agosto de 1935, EA 22-051.

34 Esta é uma versão mais específica do argumento de von Neumann (1932) contra variáveis ocultas, que tem sido injustamente criticada como sendo fisicamente improcedente. Schrödinger (1935) escolhe um exemplo que está ainda mais perto da observação física: em vez de O_a , ele usa o conjunto de momentos angulares L_a com relação a qualquer origem de coordenadas a . Mais uma vez, $L_a/\hbar$ tem que ser um número inteiro em todos os instantes, mesmo que possamos mover a de forma contínua.

enquanto o formalismo nos permite fazer previsões experimentais bem sucedidas, temos que aceitar que não há uma imagem consistente da realidade que possa ser construída a partir dela. Esta seria a resposta radicalmente positivista. Contudo, Bohr não queria ir tão longe: ele queria mostrar que um senso apropriado de realismo é reconciliável com a completude da Mecânica Quântica. Portanto, ele apenas argumenta que o critério de realidade de EPR contém uma ambiguidade que a torna inaplicável no caso considerado, ao passo que uma influência física a partir da medição de uma partícula até a outra partícula é excluída, Bohr (1935b, p. 103-104) afirma que

[...] mesmo nesse estágio existe essencialmente a questão de uma influência sobre as próprias condições que definem os tipos possíveis de previsões relativas ao comportamento futuro do sistema.

Ele tenta mostrar que esse critério não é cumprido no caso de EPR, considerando uma realização experimental do estado de EPR. Bohr considera duas partículas com momentos definidos, passando simultaneamente através de duas fendas de um anteparo. Se as fendas forem suficientemente estreitas, sabemos precisamente a diferença entre as posições das duas partículas. Se medirmos o momento do anteparo antes e depois da passagem das partículas, também sabemos o momento total de ambas as partículas após a passagem. A medição do momento do anteparo nos impede saber a sua posição, portanto, as posições absolutas das duas partículas também são desconhecidas. Também não sabemos os momentos individuais das partículas, já que elas trocaram um momento indefinido durante sua passagem através das fendas. Após a passagem pelo anteparo, a medição do momento de uma partícula permite deduzir o momento da outra, já que o momento total é conhecido. Alternativamente, a medição da posição da primeira partícula permite que se deduza a posição da segunda, uma vez que a distância entre as duas é conhecida. Naturalmente, a realização de ambas as medições simultaneamente é impossível. Esse fato seria suficiente para o positivista radical negar que o argumento de EPR fosse conclusivo. Bohr, por outro lado, tenta dar um argumento físico de porque a medição de uma partícula interfere nas “condições que definem os tipos possíveis de previsões relativas ao comportamento futuro do sistema.” No entanto, não está claro como este critério deve ser aplicado para a montagem experimental que Bohr idealizou. Dugald Murdoch (1987, p. 176) a analisa dizendo que

[...] não podemos significativamente atribuir uma propriedade física a um objeto a menos que as pré-condições para o uso significativo do predicado em questão estejam satisfeitas, e essas pré-condições são a presença de um arranjo experimental adequado que seja capaz de ser utilizado para medir a propriedade em questão.

Ao contrário de Murdoch, não creio que possa haver um argumento, a partir da montagem física da situação, dizendo que essas pré-condições não foram cumpridas. O argumento teria que ser que a medição, digamos, da posição de uma partícula excluiria a possibilidade de medir o momento da outra partícula. Murdoch acha que a medição da posição da primeira partícula envolveria a transferência do momento da partícula para o corpo, definindo o referencial espacial comum, e que essa transferência interferiria com a medição do momento da segunda partícula. Este argumento está errado, já que o corpo que define o referencial comum pode ser tão pesado quanto se queira. Portanto, a velocidade do referencial é afetada apenas por uma quantidade que pode ser feita arbitrariamente pequena e, portanto, o corpo ainda pode ser utilizado para uma medição do momento da segunda partícula.³⁵ Também as palavras do próprio Bohr não apoiam claramente esta leitura. Ele escreve:

[...] eliminamos, com esse procedimento, qualquer possibilidade futura de aplicar a lei de conservação da quantidade de movimento [momento] ao sistema constituído pelo diáfagma [anteparo] e pelas duas partículas, e assim perdemos nossa única base para uma aplicação inequívoca da ideia de quantidade de movimento em previsões relativas ao comportamento da segunda partícula. (BOHR, 1935b, p. 103)

Se isso significa que a transferência do momento da primeira partícula para o referencial impede qualquer possibilidade de aplicar a lei da conservação do momento ao sistema total, então, a frase é verdadeira, mas irrelevante. Bohr parece supor que só podemos inferir o momento da segunda partícula através de uma aplicação da lei da conservação do momento. No entanto, podemos medir o momento da segunda partícula diretamente e isso é tudo que precisamos para a aplicação do seu próprio critério de significado³⁶. Beller e Fine (1993) propõem um argumento mais sutil do lado de Bohr: na montagem de Bohr, a correlação entre as duas posições das partículas é válida apenas no instante da passagem através do anteparo. Imediatamente depois, como as posições das partículas espalham, esta correlação é destruída. Portanto, uma medição da posição da primeira partícula tem que acontecer imediatamente após a passagem pelo anteparo, para permitir quaisquer inferências sobre a posição da segunda partícula. Mas, neste

35 Casos semelhantes são considerados em Bohr e Rosenfeld (1933), onde Bohr corretamente reconhece a possibilidade de tais medições.

36 Se esta é a leitura correta, o erro de Bohr pode se originar da equiparação do exemplo EPR com o caso de uma medição de escolha demorada, que ele discute tanto em Bohr (1935b), quanto em discussão posterior de EPR em Bohr (1939b). No caso de uma medição da escolha demorada, a conservação do momento realmente desempenha um papel importante, já que permite a determinação do momento inicial da partícula, a partir do momento do anteparo, após a medição e do momento final da partícula.

caso, medir a posição da primeira partícula equivale a uma medição da posição do próprio anteparo e, por conseguinte, interfere na preparação do estado, que dependia de o anteparo ter um momento definido. Beller e Fine vêm isso como a razão pela qual Bohr diz que a medição da posição da primeira partícula exclui qualquer possibilidade de aplicar a lei da conservação do momento para o sistema inteiro: a medição simplesmente interfere com a preparação do estado emaranhado em si. Sob a leitura de Beller e Fine, não é surpreendente que Bohr considere que a medição da posição de uma partícula interfira nas condições para fazer previsões sobre este sistema: ela simplesmente interfere com a preparação do estado total. Esse problema, porém, é um “artefato” (efeito espúrio) da montagem de Bohr para preparar o estado EPR. O problema subjacente é que a correlação da posição no estado de EPR só existe para um instante de tempo, já que a posição não é uma invariante do movimento. No entanto, não é necessário supor que o instante do tempo em que a correlação acontece seja o instante em que a preparação do estado foi realizada. E só neste caso é plausível supor que a medição interfere na preparação.

Embora a resposta de Bohr a EPR ainda esteja escrita usando o paradigma fundamental de que a medição leva a um distúrbio incontrollável do objeto medido, vários autores observaram que Bohr mudou o seu critério de significado após 1935, presumivelmente percebendo a natureza problemática de sua resposta. (BELLER; FINE, 1993; MURDOCH, 1987) Bohr exige um critério muito mais rigoroso de significado em Bohr (1939b): uma grandeza física pode ser significativamente atribuída a um sistema, somente quando ocorrer uma medição real da grandeza. Este critério, em geral, impedirá a possibilidade de considerar as diferentes descrições fenomênicas da mesma situação real ou de construir uma teoria de invariantes que valem para diferentes experimentos. Assim, está em conflito com o realismo metodológico de Einstein. Além disso, está em conflito com a intuição de Einstein sobre a separabilidade, já que a realidade de uma grandeza definida em um sistema dependerá de medições realizadas em outro sistema espacialmente separado. O critério rigoroso de Bohr foi considerado como uma possível objeção pelos próprios EPR:

De fato, nossa conclusão não seria alcançada se insistíssemos em que duas ou mais quantidades físicas só poderiam ser encaradas como elementos simultâneos de realidade *quando pudessem ser simultaneamente medidas ou previstas*. (EINSTEIN; PODOLSKY; ROSEN, 1935, p. 96)

Eles desconsideraram essa postura por causa de seu conflito com o pressuposto da separabilidade:

Isso faz as realidades de P e Q dependerem do processo de medida executado no primeiro sistema, o qual não perturba

de modo algum o segundo. Nenhuma definição razoável de realidade pode permitir tal coisa.

A única reação publicada de Einstein à resposta de Bohr foi uma breve caracterização da posição de Bohr:

Não há razão para que qualquer existência (estado da realidade) mutuamente independente deva ser atribuída aos sistemas parciais A e B, vistos separadamente, nem mesmo se os sistemas parciais estiverem espacialmente separados uns dos outros no instante particular considerado. (EINSTEIN, 1949)

Retirando a acusação de que a posição de Bohr não era razoável, Einstein admitiu que tal posição é defensável em contribuição para um número da revista filosófica *Dialectica*, editada por Wolfgang Pauli (EINSTEIN, 1948). Neste artigo, sua última exposição detalhada do argumento do emaranhamento, ele apresenta o argumento como mostrando a incompatibilidade da suposição de que a Mecânica Quântica seja completa e do princípio de separabilidade. Ele agora tece um argumento detalhado do motivo da suposição da separabilidade, embora não seja logicamente necessário, está no fundamento de todo o nosso pensamento físico e, em especial, do conceito de um campo regido por equações de campo locais. Ela é uma condição necessária para a possibilidade de formular e testar as leis da Física. Portanto, Einstein conclui que ele não pode aceitar a completude da Mecânica Quântica.

Há um problema adicional com o critério estrito de significado de Bohr para o qual Einstein chamou a atenção: é impossível limitar seu uso aos fenômenos microscópicos. Adaptando o exemplo do gato de Schrödinger (1935), Einstein (1949) considera a seguinte situação: o decaimento de um átomo radioativo é registrado macroscopicamente por uma marca em uma tira de papel, indicando o instante de decaimento. Einstein argumenta que, neste caso, o defensor da completude está comprometido em dizer que não há questão objetiva de fato sobre a localização da marca no papel, até que uma observação tenha sido feita. Mais uma vez, Einstein admite que essa posição seja logicamente sustentável, mas “é muito pouco provável que alguém estivesse inclinado a considerá-la seriamente.” Embora este argumento possa parecer um apelo ao realismo ingênuo, deve ser visto no contexto do debate com Bohr, que queria manter o realismo para a Física clássica dos objetos macroscópicos e que associava a não-classicalidade da Mecânica Quântica com o fracasso dos nossos meios de observação no mundo microscópico.

Na mesma linha deste argumento, Einstein (1953) apresenta outro exemplo, na *Festschrift Born* (volume em homenagem a Max Born): ele considera uma esfera

macroscópica, perfeitamente elástica, ricocheteando entre duas paredes paralelas. Os autoestados de energia desta esfera são completamente delocalizados. Em uma interpretação estatística, isso significa apenas que a probabilidade de encontrar a esfera em um determinado local é praticamente a mesma em toda parte. Mas se quisermos manter que a descrição quântica é completa, é em princípio impossível atribuir uma posição para a esfera. Mesmo se permitíssemos apenas estados quânticos que são aproximadamente localizados (pacotes de onda) para a descrição da esfera, isso não resolveria o problema, já que estes pacotes de onda tornar-se-iam cada vez mais delocalizados ao longo do tempo. Assim, é impossível afirmar que, no limite macroscópico, a descrição quântica será aproximadamente a mesma que a descrição clássica da esfera. No debate que se seguiu (EINSTEIN; BORN, 1969), Born insistiu que o espalhamento do pacote de ondas seria uma manifestação do nosso conhecimento incompleto das condições iniciais da esfera e que, portanto, a descrição quântica espelha exatamente a descrição clássica, se uma incerteza nas condições iniciais for permitida. Born supôs que Einstein queria criticar o indeterminismo da Mecânica Quântica, expresso no espalhamento do pacote de ondas. Ele não percebeu que sua resposta concedia o ponto de Einstein de que a descrição quântica só pode ser entendida como a descrição de um *ensemble* estatístico e não de um caso individual. Como já foi mencionado na introdução, Pauli enviou duas cartas detalhadas sobre a discordância para Born (EINSTEIN; BORN; BORN, 1969, p. 285-291), salientando que o determinismo não era a questão na qual Einstein estava interessado. A resposta de Pauli ao argumento de Einstein foi que a ideia de realidade independente da observação tem de ser abandonada, tanto no mundo macroscópico, quanto microscópico. Pauli se opôs ao discurso de Einstein sobre descrição incompleta, já que esta implica a existência de um esquema conceitual mais completo, o que para ele refletia um preconceito metafísico. Já alguns anos antes, Einstein criticara a ideia de Pauli de que a Mecânica Quântica ofereceria um esquema conceitual autocontido para a descrição de fenômenos, em uma carta a Michele Besso:

Você também notou como foi ilógica a resposta de Pauli [para o artigo de Einstein na *Dialectica*]? Ele nega que essa forma de descrição [por meio de uma função de onda] é incompleta, mas diz no mesmo trecho que a função ψ é uma descrição *estatística* do sistema, a descrição de um *ensemble* de sistemas. Só que isso é apenas outra forma de dizer que a descrição do sistema único (individual) é incompleta!³⁷

Colocando a crítica de Einstein em uma forma linguística mais próxima às ideias de Pauli: falar sobre distribuições de probabilidade sobre valores possíveis de uma grandeza pressupõe que o discurso sobre os valores desta grandeza

37 Einstein para Besso, 24 de julho de 1949, em Speziali (1972, p. 403).

seja significativa. Se, em acordo com Pauli, tal significado for negado antes que uma medição seja realizada, então também a descrição quântica, por meio de uma função de onda sobre esses valores, torna-se sem sentido. Até hoje em dia, a forma padrão de pensar sobre a Mecânica Quântica consiste em uma oscilação entre uma interpretação da ignorância (há partículas cujas posições não são conhecidas com exatidão) e uma interpretação de propensão (existe uma função de onda que colapsa com a observação). Os vários experimentos mentais de Einstein são, antes de tudo, expressão da impaciência de Einstein com este tipo de indecisão teórica.

À luz da defesa de Einstein de uma interpretação da Mecânica Quântica como uma teoria incompleta, é à primeira vista surpreendente que ele tenha desconsiderado a tentativa de David Bohm de reavivar e refinar a interpretação dual de onda-partícula de de Broglie para a mecânica quântica. (BOHM, 1952) Considerando que Einstein já havia pensado longamente sobre teorias duais, tanto no início dos anos 1920 quanto em conexão com suas tentativas de compreender a mecânica ondulatória, seu ceticismo era de se esperar. A interpretação de Bohm sofreu dos mesmos problemas que fizeram as tentativas anteriores inaceitáveis para Einstein: a função de onda definida num espaço de configuração de muitas dimensões não poderia ser interpretada como um campo físico. Pelo contrário, ela estabelece correlações não-locais entre partículas distantes, dando assim a resposta menos atraente ao dilema de Einstein sobre os estados emaranhados. No *Born Festschrift*, Einstein (1953) acrescenta que a interpretação de Bohm também não consegue dar conta satisfatoriamente do limite macroscópico da Mecânica Quântica: na interpretação de Bohm, a esfera que deveria ricochetejar entre as paredes, em um estado de energia definido, permanece absolutamente imóvel.

Em seus últimos anos, depois de muitas tentativas fracassadas para construir uma teoria do campo unificado, Einstein reconheceu a possibilidade de que a hipótese de uma descrição objetiva e local da realidade, que fundamenta a teoria de campo, talvez tenha que ser abandonada, e que um fundamento totalmente novo para a Física talvez tivesse que ser encontrado, mas para ele isso significaria um colapso total dos fundamentos da Física contemporânea: “No entanto, considero inteiramente possível que a física não possa ser fundamentada no conceito de um campo, ou seja, em construtos contínuos. Então, *nada* restará do meu castelo no ar, incluindo não só a teoria da gravitação, mas também todo resto da física contemporânea.” Contudo, ele permaneceu convencido de que a Mecânica Quântica não poderia ser essa teoria fundamental.

8 Epílogo: o sonho de Einstein destruído?

O argumento de EPR viria a desempenhar um papel importante nas discussões posteriores dos fundamentos da Mecânica Quântica. Nos anos de 1960, John Bell mostrou que é impossível recuperar a estatística prevista pela Mecânica Quântica ao assumir-se, com Einstein, que dois estados localmente separáveis determinam os resultados de medições em cada componente do estado emaranhado. (BELL, 1964) Bell mostrou que, se fosse esse o caso, as correlações dos resultados de medições em experimentos do tipo EPR deveriam satisfazer as chamadas desigualdades de Bell. As previsões da Mecânica Quântica, por outro lado, contradizem as desigualdades de Bell. Já como um experimento mental, esta prova é de grande importância porque mostra a impossibilidade da ideia de Einstein de que a Mecânica Quântica poderia ser entendida como uma descrição incompleta de uma realidade que é objetiva e localmente definida. Permaneceu uma questão empírica sobre qual das duas visões seria corroborada: a de Einstein ou a da Mecânica Quântica?

Muitos experimentos foram realizados para testar as desigualdades de Bell, desde o início dos anos 1970. (BERTLMANN; ZEILINGER, 2002) Seus resultados têm confirmado cada vez mais as previsões da Mecânica Quântica e a violação das desigualdades de Bell, apesar de alguns críticos que apontaram possíveis furos (*loopholes*) nas realizações experimentais (por exemplo, FINE, 1996b). Fine também argumentou que Einstein não acreditava em uma teoria de variáveis ocultas que simplesmente adiciona à Mecânica Quântica padrão um valor pré-existente para resultados de medição. No entanto, o argumento de Bell também se aplica a uma teoria de campo local como Einstein havia concebido: também um campo definido localmente é uma variável oculta local no sentido de Bell e Einstein certamente teria concordado que as previsões estatísticas da Mecânica Quântica deveriam ser deriváveis de sua teoria fundamental, pelo menos aproximadamente. Mas as desigualdades de Bell proíbem que uma teoria de campo local faça previsões que sejam mesmo aproximadamente idênticas às da Mecânica Quântica.

Apesar de a conclusão de Einstein, a partir de EPR, não parecer viável, as perguntas que ele levantou sobre a interpretação da Mecânica Quântica permanecem válidas. O efeito paradoxal do trabalho de Bell foi trazer essas questões de volta à consciência de mais do que uma ínfima minoria de físicos e filósofos. Além disso, a clareza conceitual do pensamento de Einstein continua sendo útil como um quadro para os debates sobre a interpretação da Mecânica Quântica. Seguindo o modo como reconstruí as críticas de Einstein à completude da Mecânica Quântica, há basicamente três suposições no argumento que poderiam ser abandonadas:

- a) *Pode-se abandonar o realismo metodológico de Einstein.* Isto significa que se renuncia à possibilidade de ter uma descrição de estado completa e objetiva na Mecânica Quântica: estados quânticos seriam sempre fenomênicos e não poderíamos encontrar uma descrição invariante dos fatos por trás dos fenômenos. A esperança de Bohr de que esta solução pudesse ser consistente com um realismo de senso comum sobre os objetos macroscópicos tornou-se cada vez menos plausível. Dado que o mundo quântico hoje é, de longe, não tão impenetrável experimentalmente como era nos dias de Bohr, torna-se difícil acreditar que deva ser epistemologicamente diferente do mundo macroscópico. Mas então, ter-se-ia que aceitar a posição de Pauli e desistir, de modo geral, até mesmo de um realismo metodológico mínimo. Como Einstein salientou repetidamente, esta é uma posição logicamente defensável. Ela não apenas é sustentada pelos defensores da ortodoxia de Copenhague, mas também pelos proponentes de uma abordagem de teoria da informação e provavelmente pela maioria dos adeptos de visões pragmatistas ou instrumentalistas da Mecânica Quântica. No entanto, esta posição está em desacordo com a prática da Física, tanto hoje como nos dias de Einstein: a ideia de invariantes descritivos tornou-se um dos instrumentos teóricos fundamentais em toda a Física contemporânea, especialmente na Mecânica Quântica e na teoria quântica de campo. Sem um realismo metodológico, no sentido de Einstein, esta ideia é completamente *ad hoc*.
- b) *Pode-se aceitar o realismo metodológico de Einstein (a teoria quântica precisa de algum tipo de descrição completa de um estado objetivo) e aceitar a afirmação de Einstein de que a descrição-padrão da Mecânica Quântica é incompleta.* Se o argumento de Einstein para a necessidade de um realismo metodológico for seguido, aceitando-se sua afirmação de que a descrição quântica padrão (ao menos em um caso como EPR) é incompleta, então é preciso construir uma descrição mais completa, ou pela adição de variáveis físicas suplementares ou pela modificação da dinâmica para permitir um “colapso físico”, ou seja, por algum mecanismo que dê realidade física aos resultados da medição, antes da sua observação. Mas, como as desigualdades de Bell têm mostrado, isto requer uma não-localidade explícita na dinâmica. Isso se aplica aos vários tipos de interpretações de variáveis ocultas, como a interpretação de de Broglie-Bohm ou a interpretação modal, e também às teorias de colapso físico, como a Mecânica Quântica não-linear ou a interpretação de Ghirardi-Rimini-Weber. Há pelo menos duas razões que tornam esta solução pouco atraente com bases físicas: como Einstein já havia salientado, aceitar a possibilidade de interações não-locais derruba a justificativa teórica de qualquer teoria de campo, incluindo a teoria

quântica de campos. Há um argumento ainda mais forte que, até onde eu saiba, não tem sido considerado neste contexto. A própria Mecânica Quântica confirma a localidade de todos os processos físicos observáveis, como é demonstrado pelos diversos teoremas de não-sinalização, que mostram que o emaranhamento não pode ser usado para a transferência de informação. No entanto, isto significa que a não-localidade das interpretações mencionadas acima reside inteiramente na estrutura teórica e não nos fenômenos.

- c) *Pode-se manter tanto o realismo metodológico de Einstein quanto seu princípio da separação*, rejeitando sua conclusão de que a não-univocidade da Mecânica Quântica implica sua incompletude. Como foi indicado na seção 7, a prova de EPR da incompletude da Mecânica Quântica se baseia em um sentido mais forte de realismo do que Einstein estava geralmente disposto a admitir. Mas, o argumento favorito de Einstein envolvendo o emaranhamento só pode mostrar a não-univocidade das descrições quânticas, não a sua incompletude. Haveria a possibilidade de construir uma interpretação da Mecânica Quântica que considera os estados quânticos como descrições não-absolutas, no mesmo sentido da Teoria da Relatividade? Esta possibilidade foi explorada por Hugh Everett (1973) em sua “interpretação do estado relativo” da Mecânica Quântica, aplicando a distinção de Einstein entre realidade fenomênica e realidade objetiva de um modo radicalmente novo. Everett propôs que os resultados das medições não nos dão informação direta sobre o estado objetivo, que nunca entra em colapso. Os resultados das medições são apenas refletidos em um estado relativo não-invariante, que, como as descrições dependentes de coordenadas na relatividade, descrevem uma perspectiva fenomenal não-única. Isto permite uma explicação natural do argumento simples do emaranhamento de Einstein: os dois estados quânticos para a segunda partícula que resultam da medição da primeira partícula seriam simplesmente duas perspectivas fenomênicas. Ao contrário do que foi suposto por EPR, eles não refletem elementos da realidade objetiva. Portanto, nenhuma violação do princípio da separação de Einstein é necessária para explicar as previsões na Mecânica Quântica. Embora a interpretação de Everett certamente divirja radicalmente das intuições de Einstein sobre como o mundo é, esta interpretação é, como o próprio Everett apontou, a mais fiel aos princípios metodológicos de Einstein.

Referências

- BACCIAGALUPPI, Guido; VALENTINI, Antony. *Quantum theory at the crossroads: reconsidering the 1927 Solvay Conference*. Cambridge: Cambridge University, 2009.
- BELL, John Stewart. On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics*, v. 1, p. 195–200, 1964.
- BELLER, Mara; FINE, Arthur. Bohr's Response to EPR. In: FAYE, J.; FOLSE, H. J. (Org.). *Niels Bohr and contemporary philosophy*. Dordrecht: Kluwer, 1993. p. 1–31.
- BELOUSEK, Darrin W. Einstein's 1927 unpublished Hidden-variable theory: its background, context and significance. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics*, v. 27, p. 437–461, 1996.
- BERTLMANN, Reinhold A.; ZEILINGER, Anton (Org.). *Quantum (un)speakables: from bell to quantum information*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2002.
- BOHM, David. *Quantum theory*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1951.
- _____. A suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables. *Physical Review*, v. 85, p. 166–193, 1952.
- BOHR, Niels. Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?" *Physical Review*, v. 48, p. 696–702, 1935b. Em português: "A descrição da realidade física fornecida pela mecânica quântica pode ser considerada completa?". Trad. C.W. Abramo. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, v. 2, p. 97–106, 1981.
- _____. The causality problem in atomic physics. In: *New Theories in Physics* (Conferência em Varsóvia). Paris: Institut International de Coopération Intellectuelle, 1939b. p. 11–38. Les nouvelles théories de la physique. Proceedings
- _____. *Collected Works*, v. 6: foundations of Quantum Physics I (1926–1932). Org. por Jørgen Kalckar. Amsterdam: North-Holland, 1985.
- _____. *Collected Works*, v. 2: works on Atomic Physics (1912–1917). Org. por Ulrich Hoyer. Amsterdam: North-Holland, 1981.
- _____. Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics. In: SCHILPP, Paul A. (Org.). *Albert Einstein: philosopher-scientist*.

Evanston, IL: Library of Living Philosophers, 1949. p. 199-242. Em português: “O debate com Einstein sobre problemas epistemológicos na física atômica”. In: BOHR, N. *Física atômica e conhecimento humano*. Trad. Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995. p. 41-83.

_____. Quantum mechanics and physical reality. *Nature*, v. 136, p. 65, 1939a.

BOHR, Niels; ROSENFELD, Léon. Zur Frage der Meßbarkeit der elektromagnetischen Feldgrößen. *Kgl Danske Videnskabernes Selskab. Matematisk-fysiske Meddelelser*, v. 12, p. 1-65, 1933.

BORN, Max. Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, v. 37, p. 863-867, 1926.

CPAE 7. *The collected papers of Albert Einstein*, v. 7: the Berlin years: writings, 1918-1921. Org. por Michel Janssen et al. Princeton: Princeton University, 2002.

CPAE 8. *The collected papers of Albert Einstein*, v. 8: the Berlin years: correspondence, 1914-1918 (parts A and B). Org. por Robert Schulmann et al. Princeton: Princeton University, 1998.

DONGEN, Jeroen van. Emil Rupp, Albert Einstein and the Canal Ray Experiments on Wave-Particle Duality: Scientific Fraud and Theoretical Bias. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, v. 37, p. 73-120, 2007a. Supplement.

_____. The interpretation of the Einstein-Rupp experiments and their influence on the history of quantum mechanics. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, v. 37, p. 121-131, 2007b. Supplement.

EINSTEIN, Albert. *Äther und Relativitätstheorie*. Berlin: Julius Springer, 1920.

_____. Autobiographical notes. In: SCHILPP, Paul A. (Org.). *Albert Einstein: philosopher-scientist*. Evanston, IL: Library of Living Philosophers, 1949. p. 2-94. Em português: *Notas Autobiográficas*. Trad. A. S. Rodrigues. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1982.

_____. Bietet die Feldtheorie Möglichkeiten für die Lösung des Quantenproblems? *Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Physikalisch-Mathematische Klasse. Sitzungsberichte*, p.359-364, 1923.

_____. Dialog über Einwände gegen die Relativitätstheorie. *Die Naturwissenschaften*, v. 6, p. 697-702, 1918a. Reimpresso em CPAE 7, op. cit., Doc. 13.

_____. Der energiesatz in der allgemeinen Relativitätstheorie. *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Physikalisch-Mathematische Klasse. Sitzungsberichte*, p. 448–459, 1918b. Reimpresso em CPAE 7, op. cit., Doc. 9.

_____. Elementare Überlegungen zur Interpretation der Grundlagen der Quanten-Mechanik. In: _____. *Scientific Papers Presented to Max Born*. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1953. p. 33-40.

_____. *Geometrie und Erfahrung*. Berlin: Julius Springer, 1921.

_____. *Ideas and opinions*. New York: Crown, 1954. Reimpressão: New York: Modern Library, 1994.

_____. Induktion und deduktion in der physik. *Berliner Tageblatt*, 25 dez. 1919b.

_____. Letter from Dr. Albert Einstein. In: HERBERT, L. Samuel. (Org.). *Essay in Physics*. Oxford: Blackwell, 1951.

_____. *Mein Weltbild*. 27. ed. Org. por Carl Seelig. Amsterdam: Querido, 1934. Em português: *Como Vejo o Mundo*. Trad. H.P. de Andrade. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1981.

_____. Motive des forschens. In: WAMBURG, Emil et al. (Org.). *Zu Max Plancks sechzigstem Geburtstag*. Karlsruhe: Karlsruhe I.B.: C.F. Müllersche Hofbuchhandlung M.B.H., 1918c. p. 29–32. Reimpresso em CPAE 7, op. cit., Doc. 7.

_____. Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, v. 55, p. 241–244, 1918d. Reimpresso em CPAE 7, op. cit., Doc. 4.

_____. Physics and reality. *Franklin Institute Journal*, v. 221, p. 313–337, 1936.

_____. Quanten-mechanik und Wirklichkeit. *Dialectica* v. 2, p. 320–324, 1948.

_____. Spielen gravitationsfelder im Aufbau der materiellen Elementarteilchen eine wesentliche Rolle? *Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin), Sitzungsberichte*, p. 349–356, 1919a.

_____. Strahlungs-emission und -absorption nach der quantentheorie. *Deutsche Physikalische Gesellschaft. Verhandlungen* v. 18, p. 318–323, 1916.

_____. Time, space, and gravitation. *The Times*, London, p. 13–14, 28 nov. 1919c.

_____. Zur Quantentheorie der Strahlung. *Physikalische Zeitschrift*, v. 18, p. 121–128, 1917.

_____.; BORN, Max; BORN, Hedwig. *Briefwechsel 1916–1955*. München: Nymphenburger Verlagshandlung, 1969. Em inglês: *The Born-Einstein Letters*, Macmillan, New York, 1971.

EINSTEIN, Albert; PODOLSKY, Boris; ROSEN, Nathan. Can quantum mechanical description of reality be considered complete?. *Physical Review*, v. 47, p. 777–780, 1935. Em português: “A descrição da realidade física fornecida pela mecânica quântica pode ser considerada completa?. Trad. C.W. Abram. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, v. 2 p. 90–96, 1981.

EISENSTAEDT, Jean; KOX, Anne (Org.). *Studies in the History of General Relativity*. Einstein Studies. Boston: Birkhäuser, 1992.

EVERETT, Hugh. The theory of the universal wave function. In: DEWITT, Bryce; GRAHAM, Neill (Org.). *The many-worlds interpretation of quantum Mechanics*. Princeton: Princeton University, 1973. p. 3–140.

FINE, Arthur. Einstein’s realism. (1986). In: _____. *The shaky game: Einstein, realism and the quantum theory*. 2. ed. Chicago: University of Chicago, 1996a. p. 86–111.

_____. *The shaky game: Einstein, realism and the quantum theory*. 2. ed. Chicago: University of Chicago, 1996b.

HEISENBERG, Werner. *Der Teil und das Ganze: Gespräche im Umkreis der Atomphysik*. Munich: Piper, 1969. Em português: *A parte e o todo*. Trad. Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

_____. Über den anschaulichen Inhalte der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, v. 43, p. 172–198, 1927.

HOLTON, Gerald. Mach, Einstein, and the Search for Reality. *Daedalus*, v. 97, p. 636–673, 1968. Reimpresso em: HOLTON, G. *Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein*. Cambridge, MA: Harvard University, 1988. p. 237–277.

HOME, Dipankar; WHITAKER, Andrew. *Einstein’s struggles with quantum theory*. New York: Springer, 2007.

HOWARD, Don. Einstein and *Eindeutigkeit*: a neglected theme in the philosophical background to general relativity. In: EISENSTAEDT, Jean; KOX, Anne (Org.). *Studies in the History of General Relativity*. Einstein Studies. Boston: Birkhäuser, 1992. p. 154–243.

_____. Einstein on locality and separability. *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 16, p. 171–201, 1985.

_____. Nicht sein kann was nicht sein darf: or the Prehistory of EPR, 1909–1935: Einstein's Early Worries about the Quantum Mechanics of Composite Systems. In: MILLER, Arthur I. (Org.). *Sixty-two Years of Uncertainty: historical, philosophical, physics inquiries into the Foundations of Quantum Physics*. New York: Plenum, 1990. p. 61–111.

_____. Realism and conventionalism in Einstein's philosophy of science: The Einstein-Schlick correspondence. *Philosophia Naturalis*, v. 21, p. 616–629, 1984.

_____. Was Einstein really a realist?. *Perspectives on Science: Historical, Philosophical, Social*, v. 1, p. 204–251, 1993.

JAMMER, Max. *The conceptual development of quantum mechanics*. New York: McGraw-Hill, 1966.

JANSSEN, Michel. 'No Success like Failure...': Einstein's Quest for General Relativity, 1907-1920. In: JANSSEN, Michel; LEHNER, Christoph (Org.). *The Cambridge Companion to Einstein*. Cambridge: Cambridge University, 2010. No prelo.

_____.; RENN, Jürgen. Untying the Knot: how Einstein found his way back to field equations discarded in the zurich notebook." In: RENN, Jürgen (Org.). *The genesis of general relativity*. New York; Berlin: Springer, 2007. v. 2, p. 839–925.

KLEIN, Martin J. The first phase of the Bohr-Einstein dialogue. *Historical Studies in the Physical Sciences*, v. 2, p. 1–39, 1970.

LORENTZ, Hendrik A. *Problems of modern physics*. Boston: Ginn, 1927.

MURDOCH, Dugald. *Niels Bohr's Philosophy of Physics*. Cambridge: Cambridge University, 1987.

NEUMANN, Johann von. *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin: Springer, 1932. Em inglês: *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. Princeton: Princeton University, 1955.

NORTON, John D. The physical content of general covariance. In: EISENSTAEDT, Jean; KOX, Anne (Org.). *Studies in the History of General Relativity*. Einstein Studies. Boston: Birkhäuser, 1992. p. 281–315.

PAIS, Abraham. *'Subtle is the Lord ...': the science and life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University, 1982. Em português: *"Sutil é o Senhor..."*: a ciência e a vida de Albert Einstein. Trad. F. Parente e V. Esteves. Nova Fronteira: Rio de Janeiro, 1995.

PAULI, Wolfgang. *Scientific correspondence with Bohr, Einstein, Heisenberg, a.o. Vol. 1. 1919–1929*. Org. por Armin Hermann, Karl von Meyenn e V. F. Weisskopf, V.F. New York: Heidelberg; Berlin: Springer, 1979.

PRZIBRAM, Karl (Org.). *Briefe zur Wellenmechanik*. Vienna: Springer, 1963.

SCHILPP, Paul A. (Org.). *Albert Einstein: philosopher-scientist*. Evanston, IL: Library of Living Philosophers, 1949.

SCHRÖDINGER, Erwin. Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften*, v. 23, p. 807–812, 823–828, 844–849, 1935.

SPEZIALI, Pierre (Org.). *Albert Einstein – Michele Besso : correspondance 1903–1955*. Paris: Hermann, 1972.

STACHEL, John. Einstein and the Quantum: fifty years of Struggle. In: COLODNY, Robert G. (Org.). *From Quarks to Quasars: Philosophical Problems of Modern Physics*. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 1986b. p. 349–385.

_____. Einstein's Search for General Covariance, 1912–1915. In: HOWARD, D; STACHEL, J (Ed.). *Einstein and the history of general relativity..* Boston; Basel: Stuttgart: Birkhäuser, 1989. (Einstein Studies, 1).

_____. *Einstein from 'B' to 'Z'*. Boston: Birkhäuser, 2002. (Einstein Studies, 9).

WHEELER, J.A.; ZUREK, W. H. (Org.). *Quantum theory and measurement*. Princeton: Princeton University, 1983.

WIGNER, Eugene. Thirty years of knowing Einstein. In: WOOLF, H. (Org.). *Some Strangeness in the Proportion: a Centennial Symposium to Celebrate the Achievements of Albert Einstein*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1980. p. 461–468.