



**Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Humanas
Departamento de Filosofia**

**A Realidade em Disputa: Entre Sombras
Quânticas e Luz Relativística**

Rodrigo Cleto Jorge

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
FILOSOFIA

Brasília
2026

Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Humanas
Departamento de Filosofia

A Realidade em Disputa: Entre Sombras Quânticas e Luz Relativística

Rodrigo Cleto Jorge

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Roque Freire

Brasília
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Cleto Jorge, Rodrigo.

A Realidade em Disputa: Entre Sombras Quânticas e Luz Relativística /
Rodrigo Cleto Jorge; orientador Alfredo Roque Freire. -- Brasília, 2026.
165 p.

Dissertação de Mestrado (Filosofia) -- Universidade de Brasília,
2026.

1. Realismo científico. 2. Realidade objetiva. 3. Debate Einstein-Bohr. 4.
Relatividade. 5. Mecânica quântica. I. Freire, Alfredo Roque, orient. II. Título.

Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Humanas
Departamento de Filosofia

**A Realidade em Disputa: Entre Sombras Quânticas e Luz
Relativística**

Rodrigo Cleto Jorge

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre.

Trabalho aprovado. Brasília, 27 de Maio de 2026:

Prof. Dr. Alfredo Roque Freire
UnB/ICH/FIL
Orientador

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Freire
UnB/ICH/FIL
Examinador interno

Dra. Diana Taschetto
Utrecht University
Examinador externo

À minha filha Leticia, para quem espero que, um dia, a física e a filosofia possam ser, também, uma fonte de encanto, curiosidade e compreensão do mundo. Aos meus avós, pelo amor, pelos ensinamentos e pelo exemplo.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Professor Alfredo Roque de Oliveira Freire Filho, pela orientação, pela leitura atenta e pelo acompanhamento ao longo desta pesquisa.

Aos professores Rodrigo de Alvarenga Freire e Diana Taschetto, membros da banca, pelas observações, críticas e contribuições, que ajudaram a aprimorar este trabalho.

Agradeço, ainda, aos demais professores das disciplinas cursadas ao longo do mestrado, especialmente ao Professor Alexandre Costa-Leite, Guy Hamelin e André Leclerc, cujas aulas, leituras e discussões contribuíram para a ampliação do meu horizonte filosófico e para o amadurecimento das questões desenvolvidas nesta dissertação.

Agradeço, também, aos colegas do Laboratório de Lógica e Metafísica pelas discussões, leituras compartilhadas e interlocuções que contribuíram para o desenvolvimento das questões aqui trabalhadas. O diálogo coletivo foi importante para amadurecer argumentos, esclarecer dificuldades e ampliar as perspectivas filosóficas desta pesquisa.

À Akemi, pelo incentivo decisivo para que eu ingressasse no mestrado e seguisse adiante neste percurso.

*“Você realmente acredita que a Lua só existe quando você olha para ela?”
(Albert Einstein segundo relato de Abraham Pais em Subtle Is the Lord)*

*“Afirman que la operación de contar modifica las cantidades y las convierte de indefinidas en definidas. El hecho de que varios individuos que cuentan una misma cantidad logran un resultado igual, es para los psicólogos un ejemplo de asociación de ideas o de buen ejercicio de la memoria.”
(Borges, Jorge Luis. Tlön, Uqbar, Orbis Tertius)*

Resumo

Esta dissertação examina o problema da realidade objetiva na física moderna por meio de uma reconstrução filosófica do debate entre Einstein e Bohr, situando a discussão no âmbito mais amplo do realismo científico. A investigação é orientada pela questão de saber se o compromisso de Einstein com a existência de uma realidade física independente do observador sofreu alguma transformação significativa entre a formulação da teoria da relatividade e suas críticas posteriores à mecânica quântica.

No contexto da relatividade, Einstein desenvolveu uma concepção de objetividade física fundamentada na estrutura invariante do espaço-tempo, segundo a qual as leis da física descrevem aspectos do mundo que permanecem independentes de referenciais particulares. Esse quadro preserva uma interpretação realista da teoria física, na medida em que as teorias científicas são compreendidas como tentativas de descrever a estrutura objetiva da realidade. Em contraste, a interpretação da mecânica quântica associada a Niels Bohr parece colocar em questão essa perspectiva ao enfatizar o caráter contextual da medição e ao problematizar a possibilidade de atribuir propriedades físicas determinadas aos sistemas independentemente das condições experimentais.

A dissertação reconstrói os fundamentos filosóficos do realismo de Einstein e investiga se a passagem dos invariantes relativísticos para o debate quântico representa uma revisão de seus compromissos ontológicos ou, ao contrário, a continuidade de uma mesma defesa da realidade objetiva diante de novas circunstâncias teóricas. Por meio de uma análise histórica e conceitual dos argumentos de Einstein, incluindo o argumento EPR e as implicações posteriores do teorema de Bell, o trabalho examina como as noções de localidade, separabilidade e estrutura probabilística se relacionam com o problema mais amplo do realismo nos fundamentos da física.

Argumenta-se que a crítica de Einstein à mecânica quântica não deve ser interpretada como uma rejeição da teoria em si, mas como expressão de um compromisso filosófico duradouro com o realismo científico e com a inteligibilidade das teorias físicas enquanto descrições de uma realidade independente do observador. Sob essa perspectiva, o debate entre Einstein e Bohr emerge como um episódio central na reflexão filosófica sobre o estatuto da realidade na ciência moderna, revelando tensões persistentes entre o sucesso formal da teoria quântica e a aspiração da física de oferecer uma descrição inteligível da estrutura objetiva do mundo.

Palavras-chave: realismo científico; realidade objetiva; debate Einstein–Bohr; relatividade; mecânica quântica.

Abstract

This dissertation examines the problem of objective reality in modern physics through a philosophical reconstruction of the Einstein–Bohr debate, situating the discussion within the broader framework of scientific realism. The study is guided by the question of whether Einstein’s commitment to an observer-independent physical reality underwent a substantive transformation between the formulation of the theory of relativity and his subsequent critique of quantum mechanics.

In the context of relativity, Einstein articulated a conception of physical objectivity grounded in the invariant structure of spacetime. Within this framework, the laws of physics are understood as describing features of the world that remain independent of particular reference frames, thereby preserving a robust realist interpretation of physical theory. By contrast, the interpretation of quantum mechanics associated with Niels Bohr appeared to undermine this perspective by emphasizing the contextual and epistemic character of measurement and by questioning the possibility of attributing determinate physical properties independently of experimental arrangements.

This dissertation reconstructs the philosophical foundations of Einstein’s realism and investigates whether the transition from relativistic invariants to the quantum debate represents a modification of his ontological commitments or rather a consistent defense of objective reality under changing theoretical conditions. Through a historical and conceptual analysis of Einstein’s arguments, including the EPR argument and the subsequent implications of Bell’s theorem, the study explores how the principles of locality, separability, and probabilistic structure intersect with the broader problem of realism in the foundations of physics.

The central claim advanced is that Einstein’s critique of quantum mechanics should be understood not as a rejection of the theory itself, but as part of a sustained commitment to the realist view that physical theories aim to describe the objective structure of the world. On this reading, the Einstein–Bohr debate emerges as a pivotal episode in the philosophical reflection on the status of reality in modern science, revealing enduring tensions between the formal success of quantum theory and the aspiration of physics to provide an intelligible account of an observer-independent physical reality.

Keywords: scientific realism; objective reality; Einstein–Bohr debate; relativity; quantum mechanics.

Lista de figuras

Figura 4.1 Experimento mental EPR	92
---	----

Lista de tabelas

Tabela 5.1	Sentidos de invariância	113
Tabela 5.2	EPR	123

Sumário

1	Introdução	13
2	Equivalência de teorias e o realismo de invariantes na Teoria da Relatividade Restrita	18
2.1	Realismo	18
2.2	Realismo científico	20
2.3	Equivalência empírica entre a Teoria da Relatividade Restrita e a Teoria de Poincaré	22
2.3.1	As transformações de Lorentz	22
2.3.2	O éter e a experiência de Michelson-Morley	25
2.3.3	Poincaré	26
2.3.4	A teoria de Poincaré	27
2.4	A teoria da relatividade restrita	29
2.4.1	Os dois postulados	30
2.4.2	A definição de simultaneidade	31
2.4.3	Dívida com Mach e Hume	31
2.5	Semelhanças e diferenças entre as teorias de Einstein e Poincaré	33
2.6	O Einstein da relatividade	42
3	As teorias científicas como explicações do mundo	50
3.1	A relatividade e o “ <i>a priori</i> ” na filosofia de Arthur Eddington	50
3.2	O transcendentalismo de J. R. Lucas	53
3.3	O empirismo radical de Percy Bridgman	55
3.4	O empirismo dos positivistas lógicos	57
3.5	O convencionalismo	59
3.6	Teorias físicas e simplicidade	62
3.6.1	Simplicidade e subdeterminação: o problema da escolha teórica	63
3.7	Einstein contra Poincaré: éter, assimetrias e parcimônia ontológica	64
3.8	Simplicidade, invariância e realismo estrutural	65
4	A Mecânica Quântica	68
4.1	Histórico	68
4.1.1	O formalismo mínimo da mecânica quântica	71
4.1.2	Einstein e Bohr	73
4.1.3	Desenvolvimentos	78
4.1.4	O princípio da incerteza e a complementaridade	79
4.2	A Conferência Solvay	83

4.3	O artigo EPR	86
4.4	A resposta de Bohr ao EPR: complementaridade e realidade física	93
4.5	O paradigma de Copenhague e o antirrealismo	95
4.6	A questão do antirrealismo	98
4.6.1	A filosofia de Heisenberg	100
4.6.2	Bohr: conceitos clássicos, complementaridade e objetividade	108
5	A tensão entre dois Einsteins	113
5.1	A mecânica quântica como formalismo preditivo	115
5.2	A função de onda e o estado quântico	120
5.3	Invariantes e EPR	127
5.3.1	Leitura neokantiana de Einstein	136
5.3.2	Seria Einstein superdeterminista hoje?	143
5.3.3	A não-separabilidade como propriedade dos estados: realismo estrutural dinamicamente local	148
5.3.4	Objeção: o realismo estrutural ainda é local?	151
	Referências	159

1 Introdução

A questão da realidade objetiva ocupa um lugar central na filosofia da ciência contemporânea, especialmente no contexto das transformações conceituais introduzidas pela física do século XX. A teoria da relatividade e a mecânica quântica não apenas modificaram a descrição científica do mundo físico, mas também colocaram em tensão pressupostos filosóficos fundamentais acerca da relação entre teoria, experiência e realidade. Entre esses pressupostos, destaca-se a ideia de que uma teoria física não deve ser apenas um instrumento de previsão de resultados experimentais, mas deve, ao menos em algum grau, descrever a estrutura objetiva do mundo.

Por “problema da realidade objetiva” entende-se, nesta dissertação, a questão de saber em que sentido uma teoria física pode ser considerada uma descrição de uma realidade independente dos atos de observação, dos procedimentos de medição e das escolhas particulares de representação. O problema não consiste apenas em afirmar genericamente a existência de um mundo externo. Trata-se, antes, de determinar quais elementos de uma teoria podem ser interpretados como correspondentes a estruturas reais do mundo físico, e não apenas como instrumentos formais para organizar previsões empíricas. Em outras palavras, o problema da realidade objetiva diz respeito ao estatuto ontológico das teorias físicas: elas descrevem aspectos da realidade ou apenas sistematizam aquilo que pode ser observado em determinadas condições experimentais?

Essa questão assume formas distintas na relatividade e na mecânica quântica. Na relatividade restrita, grandezas antes tomadas como absoluta, tais como tempo, simultaneidade, comprimento e repouso, revelam-se dependentes do referencial. A questão filosófica que surge, então, é saber se a objetividade física desaparece com a relativização desses conceitos ou se é deslocada para outro nível. A hipótese adotada nesta dissertação é que, em Einstein, a relatividade não elimina a realidade objetiva, mas reformula seus critérios. O que deixa de ser objetivo em sentido fundamental são certas grandezas tomadas isoladamente e de modo absoluto; o que passa a desempenhar papel privilegiado são as estruturas invariantes ou covariantes, isto é, aquilo que permanece estável através das transformações entre referenciais admissíveis.

Na mecânica quântica, o problema reaparece de modo mais radical. A teoria fornece previsões extremamente bem-sucedidas para resultados de medição, mas torna controversa a atribuição de propriedades definidas aos sistemas independentemente do arranjo experimental. O debate entre Einstein e Bohr, especialmente a partir do argumento EPR, incide precisamente sobre esse ponto: a mecânica quântica descreve uma realidade física completa ou apenas as condições de previsão de fenômenos observáveis? Para Einstein, uma teoria física satisfatória deveria representar estados reais de coisas independentes da observação.

Para Bohr, a objetividade deveria ser compreendida a partir das condições experimentais que tornam possível a descrição não ambígua dos fenômenos.

Desse modo, o problema da realidade objetiva funciona como eixo unificador da dissertação. Ele permite conectar a discussão sobre relatividade, invariância e objetividade com o debate quântico sobre complementaridade, EPR, separabilidade e não-separabilidade. A questão central não é apenas saber se a física moderna conserva ou abandona o realismo, mas determinar que tipo de realismo ainda é possível quando a objetividade deixa de poder ser pensada em termos de propriedades absolutas, locais e independentes de qualquer contexto de descrição.

A hipótese interpretativa que organiza esta dissertação é que esse problema revela uma tensão interna no pensamento de Einstein. Essa tensão será formulada, ao longo do trabalho, como a tensão entre “dois Einsteins”. A expressão não designa uma contradição biográfica simples, nem a existência de duas doutrinas explicitamente separadas na obra de Einstein. Ela indica uma diferença conceitual entre dois modos de articular realidade, objetividade e estrutura física.

O primeiro é o Einstein da relatividade restrita. Nesse contexto, Einstein abandona elementos centrais da física clássica, como o repouso absoluto, o tempo absoluto e a simultaneidade absoluta, sem abandonar a pretensão de objetividade da física. Ao contrário, a relatividade mostra que a objetividade pode ser reformulada em termos estruturais, isto é, aquilo que há de objetivo não é necessariamente o que permanece idêntico em todas as descrições particulares, mas o que se conserva através das transformações que relacionam descrições admissíveis. Esse primeiro Einstein é, portanto, o Einstein da objetividade estrutural, para quem a realidade física pode ser compreendida por meio de invariantes, relações e simetrias.

O segundo é o Einstein do debate quântico, especialmente do argumento EPR. Nesse contexto, Einstein parece exigir que uma teoria física completa represente estados reais de sistemas individuais independentemente do ato de medição. Além disso, no caso de sistemas espacialmente separados, sua crítica à mecânica quântica pressupõe uma noção forte de separabilidade: sistemas distantes deveriam possuir estados reais próprios, completos e independentes. Esse segundo Einstein é, portanto, o Einstein da separabilidade, para quem a realidade objetiva parece exigir uma descrição completa dos estados locais.

A tensão central da dissertação consiste em perguntar se essas duas exigências podem ser compatibilizadas. Se a relatividade mostra que a objetividade pode sobreviver ao abandono de absolutos clássicos, seria possível que o realismo de Einstein sobrevivesse também ao abandono da separabilidade forte? Ou, ao contrário, a exigência de estados locais completos e independentes deve ser mantida como condição indispensável de qualquer realismo físico? Essa é a questão que conduz a investigação.

A pergunta pode ser formulada de maneira ainda mais direta: o que se pretende concii-

liar? A dissertação não pretende conciliar, simplesmente, Einstein e Bohr, nem preservar integralmente todas as exigências do realismo clássico. O que se busca conciliar são três elementos conceituais que entram em tensão na física do século XX. Primeiro, a exigência einsteiniana de que a física descreva uma realidade objetiva independente da observação. Segundo, a lição relativística segundo a qual a objetividade não precisa estar fundada em absolutos clássicos, mas pode ser reformulada em termos de estruturas invariantes ou covariantes. Terceiro, o desafio quântico da não-separabilidade, que torna problemática a ideia de que sistemas espacialmente separados possuam estados completos e independentes.

Essa formulação delimita melhor o alcance da investigação. A dissertação não pretende preservar a separabilidade forte em sua forma clássica, isto é, a tese de que sistemas espacialmente separados possuem sempre estados reais próprios, completos e autônomos. O que se procura preservar é o núcleo realista da posição de Einstein, a saber, a exigência de uma realidade física objetiva e a recusa de reduzir a teoria a um instrumento meramente preditivo, operacional ou fenomenológico. A hipótese defendida é que esse núcleo pode sobreviver apenas se for reformulado em termos estruturais, relacionais e globalmente condicionados.

Por essa razão, esta dissertação não tem como objetivo apenas reconstruir filosoficamente o debate entre Einstein e Bohr sobre a realidade quântica. Essa reconstrução constitui o ponto de partida de uma investigação mais ampla: examinar se o núcleo realista do pensamento de Einstein pode ser preservado depois da crise da separabilidade provocada pela mecânica quântica. Assim, o trabalho parte do debate Einstein-Bohr, mas não se limita a ele. Seu percurso conduz a uma avaliação conceitual das alternativas realistas disponíveis diante da não-separabilidade quântica. O objetivo geral da dissertação é analisar a transformação do problema da realidade objetiva no percurso que vai da relatividade restrita ao debate quântico, tomando como fio condutor a tensão entre dois aspectos do realismo einsteiniano. O primeiro aspecto é a reformulação estrutural da objetividade na relatividade, em que a realidade física deixa de ser pensada a partir de absolutos clássicos e passa a ser associada a invariantes, simetrias e relações entre eventos. O segundo aspecto é a exigência de completude e separabilidade presente no argumento EPR, em que Einstein parece requerer que sistemas espacialmente separados possuam estados reais independentes.

A dissertação procura mostrar que essa tensão não deve ser entendida como mera inconsistência no pensamento de Einstein, mas como expressão de um problema filosófico mais profundo: que tipo de realismo ainda é possível quando a física moderna abandona tanto os absolutos clássicos quanto a separabilidade forte? A resposta proposta é que o núcleo realista de Einstein pode ser preservado apenas se for reformulado em termos estruturais e não separáveis, isto é, como uma forma de realismo objetivo que mantém a recusa de uma ação dinâmica superluminal, mas abandona a ideia de estados locais completos e independentes.

A metodologia adotada é predominantemente conceitual e interpretativa. A dissertação

não pretende realizar uma reconstrução histórica exaustiva do desenvolvimento da relatividade, da mecânica quântica ou da evolução intelectual de Einstein e Bohr. A história da física aparece como contexto e material de análise, não como objeto principal da investigação. Os textos originais de Einstein, Bohr, EPR e Bell serão utilizados como pontos de referência, mas a análise será conduzida principalmente a partir da literatura secundária especializada em filosofia da física e história conceitual da física moderna.

No caso de Einstein, a leitura será orientada especialmente por autores como Howard, Fine, Norton, Pais e Janssen, relevantes para a discussão sobre realismo, localidade, separabilidade, invariância e objetividade. No caso de Bohr, a análise será apoiada em Beller, Fine, Howard, Faye, Jammer e Bacciagaluppi, autores que permitem compreender a complementaridade tanto como resposta à crise dos conceitos clássicos quanto como posição filosoficamente controversa diante do problema da realidade física. O objetivo não é tomar esses intérpretes como autoridades definitivas, mas utilizá-los como base para reconstruir os termos conceituais do debate.

Nesse sentido, a dissertação possui dois movimentos complementares. O primeiro é reconstrutivo, qual seja, analisa, com apoio na literatura secundária, o modo como Einstein e Bohr formularam concepções distintas de realidade objetiva, completude, separabilidade e fenômeno. O segundo é avaliativo e propositivo, a partir dos limites identificados tanto na exigência einsteiniana de separabilidade forte quanto na resposta contextualista de Bohr, examina-se a possibilidade de uma posição intermediária, aqui compreendida como uma forma de realismo estrutural globalmente condicionado.

Essa posição não pretende constituir uma nova teoria física. Trata-se de uma hipótese filosófica de interpretação. A tese não é que a mecânica quântica imponha definitivamente uma ontologia estrutural e holista, mas que a não-separabilidade quântica torna filosoficamente plausível uma reformulação do realismo. Essa reformulação preserva a exigência de uma realidade objetiva independente da observação, mas abandona a tese de que essa realidade deve ser composta por sistemas locais plenamente autônomos. O realismo resultante é estrutural, porque desloca o foco de objetos portadores de propriedades intrínsecas para relações, invariantes e estruturas; e é globalmente condicionado, porque reconhece que, em sistemas emaranhados, o todo não se reduz à soma de estados locais independentes.

A conclusão da dissertação deve, portanto, ser entendida como proposta interpretativa, e não como demonstração de uma nova ontologia física. O resultado defendido é que a conciliação possível é parcial. Não é possível preservar simultaneamente, em sua forma forte, a realidade objetiva, a localidade relativística e a separabilidade completa dos estados locais. Algo deve ser reformulado. A proposta aqui defendida é abandonar a separabilidade forte, mas preservar dois elementos centrais do realismo einsteiniano: a exigência de uma realidade objetiva independente da observação e a recusa de uma ação dinâmica superluminal. O realismo resultante não é mais um realismo de sistemas locais completos, mas um realismo

estrutural, no qual os estados locais são compreendidos como aspectos parciais de uma estrutura física global.

A estrutura da dissertação reflete esse percurso. O capítulo 2 examina a relatividade restrita e a comparação entre Einstein, Lorentz e Poincaré, com o objetivo de mostrar como a relatividade permite uma reformulação da objetividade física em termos de invariância. Esse capítulo apresenta o primeiro Einstein: o Einstein da objetividade estrutural, capaz de abandonar absolutos clássicos sem abandonar o realismo. O capítulo 3 analisa algumas interpretações filosóficas da relatividade — epistemológicas, operacionalistas, empiristas e convencionalistas — para mostrar por que a leitura realista de Einstein não deve ser reduzida a nenhuma dessas alternativas. O objetivo é defender que a relatividade não dissolve a realidade objetiva, mas a reconstrói em termos estruturais.

O capítulo 4 introduz a mecânica quântica e o debate Einstein-Bohr. Seu objetivo não é oferecer uma história completa da teoria quântica, mas reconstruir os elementos que tornam problemática a concepção einsteiniana de realidade objetiva. A análise da complementaridade, da interpretação de Bohr, do EPR e da resposta bohriana permite mostrar como a mecânica quântica desloca a discussão da objetividade para o contexto experimental de determinação dos fenômenos. Bohr aparece, nesse percurso, não apenas como adversário de Einstein, mas como aquele que explicita a dificuldade de manter uma noção clássica de propriedades independentes do contexto experimental.

O capítulo 5 formula explicitamente a tensão entre os dois Einsteins. De um lado, retoma-se o Einstein da relatividade, que reformula a objetividade por meio de estruturas invariantes. De outro, examina-se o Einstein do EPR, que exige completude, separabilidade e estados reais independentes. A partir daí, o capítulo analisa a função de onda, o problema do formalismo preditivo, a não-separabilidade, Bell e a possibilidade de uma leitura estrutural e globalmente condicionada do realismo. O objetivo final é avaliar se a lição relativística da objetividade estrutural pode ser estendida ao debate quântico, desde que se abandone a separabilidade forte como critério indispensável da realidade física.

Ao examinar o debate Einstein-Bohr sob a perspectiva do realismo científico, esta dissertação busca mostrar que a questão da realidade objetiva permanece um problema central nos fundamentos da física. Longe de representar apenas um episódio histórico, essa controvérsia revela tensões conceituais profundas entre o sucesso formal das teorias físicas e a aspiração da ciência de fornecer uma descrição inteligível da estrutura do mundo. Nesse sentido, a discussão sobre a realidade física continua a desempenhar papel fundamental na reflexão filosófica sobre a natureza e os limites do conhecimento científico.

2 Equivalência de teorias e o realismo de invariantes na Teoria da Relatividade Restrita

2.1 Realismo

Antes de examinar o realismo científico no contexto da física moderna, é necessário esclarecer, ainda que brevemente, o sentido mais amplo da noção de realismo. Em sua formulação mais geral, o realismo designa o compromisso com a existência de uma realidade cuja estrutura não depende simplesmente de nossas crenças, percepções, convenções linguísticas ou práticas de observação. Essa caracterização, contudo, é ainda insuficiente. Ao longo da história da filosofia, diferentes formas de realismo divergiram justamente quanto ao tipo de realidade que deve ser admitido e quanto ao modo como essa realidade se relaciona com a experiência.

Na tradição antiga, Platão e Aristóteles oferecem dois modelos fundamentais para compreender esse problema. O realismo platônico sustenta que a realidade mais autêntica não se encontra no domínio sensível, marcado pela mudança e pela multiplicidade, mas em um domínio inteligível de Formas ou Ideias. As coisas sensíveis são reais apenas de maneira derivada, na medida em que participam de essências universais, imutáveis e independentes. Assim, a beleza de coisas particulares, por exemplo, remete à Forma da Beleza, sendo que a multiplicidade de objetos iguais remete à Ideia de Igualdade e os particulares sensíveis só se tornam inteligíveis porque participam de estruturas universais que os excedem.

De acordo com Frederick Copleston (p. 177, 2003):

“Na visão de Platão, os objetos que apreendemos nos conceitos universais, os objetos com que a ciência lida, aqueles correspondentes aos termos universais de predicação, são ideias objetivas ou universais subsistentes, existindo em seu próprio mundo transcendental (...).”

Essa posição é relevante para a presente investigação porque introduz uma tese decisiva, qual seja, aquilo que é mais real pode não coincidir com aquilo que é imediatamente dado aos sentidos. O conhecimento da realidade exige, nesse caso, ultrapassar a aparência sensível e identificar uma estrutura inteligível subjacente. Embora a física moderna não seja platônica nesse sentido metafísico forte, a ideia de que a realidade física pode ser compreendida por meio de estruturas abstratas, matemáticas e não imediatamente observáveis reaparecerá, sob outra forma, no debate sobre o realismo científico.

Aristóteles, por sua vez, reformula o problema. Contra a separação platônica entre o mundo sensível e o mundo das Formas, ele sustenta que forma e matéria existem conjuntamente nas substâncias individuais. A forma não pertence a um domínio separado, mas está imanente às próprias coisas. A realidade primária, portanto, não é um universal separado, mas a substância concreta, composta por matéria e forma. O conhecimento não exige abandonar o mundo sensível em direção a um domínio transcendente, mas compreender as essências presentes nas coisas particulares.

A diferença entre Platão e Aristóteles não diz respeito apenas à localização dos universais. Ela antecipa uma tensão que atravessará toda a tradição metafísica e reaparecerá na filosofia da ciência. A realidade deve ser compreendida primariamente como estrutura universal ou como conjunto de entidades individuais dotadas de propriedades próprias? Em Platão, a inteligibilidade do mundo depende de formas universais que ultrapassam os particulares. Já em Aristóteles, os universais são compreendidos a partir das substâncias concretas nas quais se realizam.

Essa oposição conduz ao chamado problema dos universais. A questão consiste em saber qual é o estatuto ontológico de propriedades, tipos ou estruturas que podem ser compartilhados por múltiplos indivíduos. Quando dizemos que dois objetos são vermelhos, que dois corpos possuem a mesma massa ou que dois eventos obedecem à mesma lei física, estamos apenas usando uma mesma palavra para organizar a experiência, ou estamos identificando algo real que se repete, permanece ou se manifesta em diferentes casos particulares?

Na Idade Média, esse problema foi sistematizado por meio da oposição entre realismo, nominalismo e conceitualismo. O realismo, em suas diferentes versões, sustenta que os universais possuem alguma realidade independente dos atos particulares de nomeação. O nominalismo, ao contrário, nega a existência real dos universais e os interpreta como nomes ou signos linguísticos utilizados para agrupar indivíduos semelhantes. O conceitualismo assume uma posição intermediária, qual seja, a de que os universais não existem como entidades independentes, mas tampouco são meros sons ou palavras, uma vez que existem como conceitos formados pela mente a partir da experiência dos particulares.

Para os fins desta dissertação, não é necessário reconstruir em detalhe a história da querela dos universais. O ponto decisivo é outro: desde a metafísica clássica, o realismo envolve uma tomada de posição sobre a relação entre realidade, pensamento e estrutura. A questão não é apenas saber se existe um mundo independente de nós, mas também que tipo de estrutura esse mundo possui e de que modo nossas teorias podem captá-la. Essa distinção será fundamental para compreender o realismo científico moderno. O realista científico não se compromete simplesmente com a existência de objetos observáveis, mas com a tese de que as teorias científicas bem-sucedidas podem descrever, ao menos aproximadamente, aspectos da estrutura objetiva do mundo, inclusive quando esses aspectos não são diretamente acessíveis à observação. No caso da física moderna, essa questão se

torna particularmente aguda, pois a realidade descrita pelas teorias não se apresenta como uma coleção de substâncias imediatamente perceptíveis, mas como uma rede de relações, propriedades formais, simetrias e invariantes.

É nesse ponto que a discussão histórica sobre Platão, Aristóteles e os universais se conecta ao argumento central desta dissertação. A relatividade restrita desloca a objetividade física das aparências observacionais imediatas para aquilo que permanece invariante entre diferentes referenciais. A mecânica quântica, por sua vez, coloca em crise a ideia de que sistemas físicos possuam propriedades completas e independentes das condições de medição. Em ambos os casos, a pergunta realista reaparece em nova forma, a saber, o que, afinal, deve ser considerado fisicamente real?

A tese defendida neste capítulo é que Einstein reformula o realismo físico ao vincular a objetividade não a substâncias absolutas nem a propriedades sensíveis imediatas, mas a estruturas invariantes. Desse modo, a discussão clássica sobre o estatuto da realidade prepara o terreno para compreender o realismo de invariantes como uma forma especificamente moderna de realismo, isto é, não um retorno ao realismo metafísico tradicional, mas uma concepção segundo a qual a realidade física deve ser buscada naquilo que permanece estruturalmente estável através das diferentes descrições possíveis. A passagem do realismo metafísico clássico ao realismo científico moderno envolve uma mudança importante de ênfase. Não se trata mais, em primeiro lugar, de perguntar se universais existem como entidades separadas, imanentes às coisas ou apenas como conceitos mentais, mas de investigar se as teorias científicas são capazes de descrever aspectos objetivos da realidade, inclusive quando esses aspectos não são diretamente observáveis.

2.2 Realismo científico

De acordo com Garrett (2016), o realismo em relação a um objeto de estudo (Fs) é geralmente interpretado como a visão de que Fs existem independentemente de nós. Podemos afirmar que Fs possuem uma existência independente de nós se, e somente se, as seguintes três condições forem atendidas:

1. Se não existíssemos, Fs ainda assim existiriam.
2. Se deixássemos de existir, Fs ainda assim existiriam.
3. A natureza dos Fs não é determinada meramente pelo que quer que consideremos que ela seja.

As concepções antirrealistas da ciência reúnem um conjunto de posições filosóficas que, em oposição ao realismo científico, negam ou relativizam a ideia de que as teorias científicas descrevem (ou se aproximam de descrever) a realidade tal como ela é em si. Em uma visão geral, podemos caracterizar as principais concepções antirrealistas assim:

- a) Instrumentalismo

Afirma que as proposições teóricas da ciência são, na verdade, ferramentas para cálculos ou previsões, ou ainda, regras de inferência que ajudam a conectar e estruturar proposições sobre coisas e processos observáveis.

b) Redutivismo

As proposições teóricas da ciência são tidas como proposições autênticas, mas, de fato, remetem de modo indireto apenas ao que é passível de observação; elas operam como abreviações de proposições mais extensas sobre entidades e processos observáveis. Assim, as proposições teóricas não devem ser tomadas ao pé da letra, mas sim “reduzidas” a proposições observacionais por meio de convenções linguísticas específicas (regras de correspondência), de modo a explicitar seu real conteúdo empírico e significado. Essa forma de antirrealismo foi sustentada por Carnap e por alguns positivistas lógicos.

c) Empirismo construtivo

Formulada por Bas van Fraassen (1980), essa posição pretende oferecer uma alternativa antirrealista tanto ao instrumentalismo quanto ao redutivismo. Segundo van Fraassen, as proposições teóricas da ciência são efetivamente genuínas e devem ser tomadas em sentido literal, isto é, não devem ser “reduzidas”. Contudo, estabelecer o seu valor de verdade não constitui a meta da ciência. O objetivo científico é fornecer teorias empiricamente adequadas; e aceitar uma teoria significa acreditar apenas que ela é empiricamente adequada.

De acordo com Chibeni (p. 06, 1993):

“Notemos, ademais, que virtualmente todos os realistas científicos de hoje também são empiristas no sentido clássico. Isso os coloca na embaraçosa situação de terem de justificar a extensão dos limites do conhecimento para além da evidência empírica direta. Precisam, pois, recorrer a princípios não-empíricos (frequentemente referidos como princípios superempíricos), como a simplicidade, o poder explicativo, a unidade, etc. É precisamente nisso que reside o alvo primordial da maioria das críticas anti-realistas contemporâneas: alega-se que o apelo a tais princípios significa um rompimento com os ideais empiristas, introduzindo inaceitáveis elementos subjetivos no conhecimento. Reexpressando esse ponto crucial em outras palavras, os realistas científicos contemporâneos e seus rivais empiristas compartilham a crença de que o conhecimento provém da experiência, ou seja, do que se apreende pelos sentidos. A divergência surge, porém, quando tomam para objeto de análise epistemológica as teorias científicas que baseiam suas previsões e teorias científicas que baseiam suas previsões e explicações dos fenômenos em supostos mecanismos inacessíveis à observação direta. Note-se que a maioria das teorias científicas mais importantes são desse tipo; são denominadas teorias construtivas, em oposição às teorias fenomenológicas, que se limitam a descrever e correlacionar fenômenos. Os

anti-realistas mantêm que as proposições referentes ao que é inobservável estão fora do alcance do conhecimento humano, enquanto que os realistas pretendem que podemos de algum modo conhecê-las, determinando se são objetivamente verdadeiras ou falsas.”

2.3 Equivalência empírica entre a Teoria da Relatividade Restrita e a Teoria de Poincaré

2.3.1 As transformações de Lorentz

O objetivo deste capítulo não é apenas reconstruir a gênese histórica da relatividade restrita, mas identificar o tipo de realismo que emerge da teoria de Einstein. A comparação com Lorentz e Poincaré será utilizada como contraste uma vez que duas formulações podem ser próximas do ponto de vista empírico ou formal e, ainda assim, divergir quanto ao que consideram fisicamente real. A tese defendida é que Einstein não abandona a objetividade ao rejeitar o éter e a simultaneidade absoluta, mas a desloca para estruturas invariantes, isto é, para aquilo que permanece estável através das transformações entre referenciais admissíveis.

A mecânica clássica pressupõe que as coordenadas espaciais e temporais de dois referenciais inerciais S e S' , em movimento uniforme relativo com velocidade v ao longo do eixo x , relacionam-se pelas transformações de Galileu:

$$x' = x - vt, \quad (2.1)$$

$$y' = y, \quad (2.2)$$

$$z' = z, \quad (2.3)$$

$$t' = t. \quad (2.4)$$

Essas transformações preservam a forma das leis da mecânica newtoniana, mas não preservam a forma das equações de Maxwell. Em particular, se a velocidade da luz é c em um referencial, as transformações galileanas implicam que ela deveria assumir valores diferentes em referenciais inerciais distintos. O conflito entre a mecânica clássica e a eletrodinâmica de Maxwell-Lorentz pode, portanto, ser formulado do seguinte modo: ou se mantém a cinemática galileana e se introduz um referencial privilegiado, associado ao éter, ou se modifica a própria transformação entre referenciais inerciais.

As transformações de Lorentz surgem precisamente como resposta a esse problema. Consideremos dois referenciais inerciais S e S' , com S' movendo-se com velocidade constante v em relação a S , na direção positiva do eixo x . Supõe-se que as origens dos dois referenciais coincidam em $t = t' = 0$. Por homogeneidade do espaço e do tempo, a transformação entre

as coordenadas deve ser linear. Assim, para o eixo do movimento, podemos escrever:

$$x' = \gamma(x - vt),$$

em que γ é um fator que depende apenas da velocidade relativa v . Pela simetria entre os referenciais inerciais, a transformação inversa deve ter a mesma forma, com v substituído por $-v$:

$$x = \gamma(x' + vt').$$

Para determinar γ , impõe-se a invariância da velocidade da luz. Um raio luminoso emitido a partir da origem comum dos dois referenciais satisfaz:

$$x = ct \quad \text{em } S,$$

e, como a velocidade da luz deve ter o mesmo valor em S' ,

$$x' = ct' \quad \text{em } S'.$$

Substituindo essas relações nas duas equações anteriores, obtém-se:

$$ct' = \gamma(ct - vt) = \gamma t(c - v),$$

e

$$ct = \gamma(ct' + vt') = \gamma t'(c + v).$$

Multiplicando as duas expressões, temos:

$$c^2 tt' = \gamma^2 tt'(c - v)(c + v).$$

Como $(c - v)(c + v) = c^2 - v^2$, segue que:

$$c^2 = \gamma^2(c^2 - v^2).$$

Logo,

$$\gamma^2 = \frac{c^2}{c^2 - v^2} = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

e, portanto,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Resta obter a transformação temporal. A partir de

$$x = \gamma(x' + vt'),$$

temos:

$$\frac{x}{\gamma} = x' + vt'.$$

Substituindo $x' = \gamma(x - vt)$, segue:

$$\frac{x}{\gamma} = \gamma(x - vt) + vt'.$$

Logo,

$$vt' = \frac{x}{\gamma} - \gamma x + \gamma vt.$$

Dividindo por v , obtém-se:

$$t' = \gamma t + \frac{x}{v} \left(\frac{1}{\gamma} - \gamma \right).$$

Como

$$\gamma^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

temos:

$$1 - \gamma^2 = -\gamma^2 \frac{v^2}{c^2}.$$

Assim,

$$\frac{1}{\gamma} - \gamma = \frac{1 - \gamma^2}{\gamma} = -\gamma \frac{v^2}{c^2}.$$

Substituindo esse resultado na expressão para t' , obtemos:

$$t' = \gamma t - \gamma \frac{vx}{c^2}.$$

Portanto,

$$t' = \gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right).$$

As transformações completas são, assim:

$$x' = \gamma(x - vt),$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = \gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right),$$

com

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Essas equações substituem as transformações de Galileu como a relação correta entre coordenadas de referenciais inerciais quando se exige simultaneamente o princípio da relatividade e a invariância da velocidade da luz. Sua importância filosófica, para os fins desta dissertação, não está apenas em seu conteúdo matemático, mas no deslocamento conceitual que elas impõem, qual seja, espaço e tempo deixam de ser estruturas absolutas e independentes, passando a compor uma estrutura espaço-temporal na qual certas grandezas

permanecem invariantes entre referenciais. É precisamente esse papel dos invariantes que permitirá compreender a relatividade restrita como uma reformulação, e não como uma negação, da objetividade física. A necessidade dessas transformações deve ser compreendida no contexto mais amplo da crise do éter. Se a luz era concebida como uma onda, parecia natural, segundo a física clássica, admitir um meio de propagação. Contudo, a combinação entre as equações de Maxwell, o princípio da relatividade e os resultados negativos dos experimentos de detecção do movimento da Terra em relação ao éter tornou cada vez mais problemática a hipótese de um referencial privilegiado.

2.3.2 O éter e a experiência de Michelson-Morley

Antes do desenvolvimento da teoria da relatividade, a ideia do éter era uma parte central da física clássica, especialmente no contexto da propagação da luz e das ondas eletromagnéticas (Pais, 1995). O éter, ou “éter luminífero” era postulado como um meio universal e imponderável que preenchia todo o espaço, permitindo a propagação das ondas de luz e das ondas eletromagnéticas (Michelson, 1881). Essa ideia surgiu porque, na física clássica, acreditava-se que todas as ondas necessitavam de um meio para se propagarem, como o som precisava do ar. Da mesma forma, pensava-se que a luz, sendo uma onda, necessitava de um meio para viajar pelo vácuo do espaço. O éter era concebido como essa substância.

Entretanto, um problema fundamental se colocava: a eletrodinâmica e a óptica de corpos em movimento. Tratava-se de um campo de pesquisa amplo e em plena expansão, aberto pelo fracasso da teoria de Maxwell-Hertz em dar conta das propriedades ópticas de corpos em movimento e amplamente desenvolvido pela teoria de Lorentz e pelas críticas que ela recebeu de diversos rivais. Há muitas evidências de que tanto Poincaré quanto Einstein estavam a par desses debates em torno da teoria de Lorentz ¹.

Em agosto de 1881, foi apresentado um artigo, (Michelson, 1881), de autoria de Albert A. Michelson, que realizara experimentos para medir a velocidade da luz. O método empregado por ele consistiu em comparar os intervalos de tempo que a luz levava para percorrer a mesma distância, seja paralelamente, seja transversalmente à direção do movimento da

¹ Evidências históricas desse contexto podem ser encontradas em diversas fontes. No caso de Poincaré, ver seus trabalhos sobre a dinâmica do elétron e o princípio da relatividade, nos quais ele discute explicitamente a teoria de Lorentz e suas implicações (cf. POINCARÉ, H. *Sur la dynamique de l'électron*, 1905–1906). Para Einstein, ver seu artigo de 1905, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, no qual problemas da eletrodinâmica de corpos em movimento são explicitamente formulados como ponto de partida. Discussões históricas detalhadas podem ser encontradas em MILLER, A. I. *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905–1911)* (1981), e JANSSEN, M.; STACHEL, J. (eds.), *The Genesis of General Relativity* (2007), que documentam o amplo debate em torno da teoria de Lorentz e mostram que tanto Einstein quanto Poincaré estavam inseridos nesse contexto teórico em desenvolvimento. Ver também DARRIGOL, O. *Electrodynamics from Ampère to Einstein* (2000) para uma reconstrução histórica detalhada das dificuldades da teoria de Maxwell-Lorentz em sistemas em movimento

Terra em relação ao éter. Segundo o dispositivo utilizado, a presença de um éter estacionário causaria uma diferença de tempo de aproximadamente $1/25$ do comprimento de onda da luz amarela ao viajar na direção paralela, um efeito que poderia ser observado por meio da interferência entre os feixes paralelos e transversais. A conclusão de Michelson foi no sentido de que não existe nenhuma evidência da existência de um éter. Nas suas palavras (Michelson, 1881, p. 09):

“Demonstra-se, assim, a incorreção do resultado da hipótese de um éter estacionário, seguindo-se a necessária conclusão de que a hipótese é errônea.”

De acordo com Pais (1995), o artigo não foi bem recebido, mas alguns eminentes cientistas prestaram atenção aos detalhes, tais como Kelvin, Rayleigh e Lorentz. Este último descobriu um erro no tratamento teórico dado pelo autor à experiência e fez questionamentos sobre a interpretação dos resultados. Tais reservas e questionamentos levaram Michelson a repetir o experimento, em colaboração com Edward Morley. Evitando ao máximo as influências perturbadoras, construíram um novo interferômetro. O artigo, ao encontrar um efeito nulo, apareceu em 1887 (Michelson; Morley, 1887).

2.3.3 Poincaré

Em 1898, Poincaré (2012) publica um artigo intitulado “La mesure du temps”, no qual afirma que não possuímos uma intuição direta sobre a igualdade entre dois intervalos de tempo. Ele também observa que a simultaneidade entre dois acontecimentos, ou a ordem em que eles se sucedem, assim como a equivalência entre dois intervalos de tempo, precisa ser estabelecida de tal forma que a formulação das leis naturais permaneça o mais simples possível. A inovação de Poincaré consistiu em questionar o significado objetivo da simultaneidade.

Em 1904, ele retomou o tema do éter de maneira programática durante um discurso no Congresso Internacional de Artes e Ciências, em que expressou sua insatisfação com a noção de uma velocidade absoluta (Poincaré, 1905, p.306):

“Se conseguíssemos medir alguma coisa, teríamos sempre a liberdade de dizer que não era a velocidade absoluta, e, se não fosse a velocidade em relação ao éter, poderia ser sempre a velocidade em relação a um novo fluido desconhecido com que encheríamos o espaço.”

Dessa forma, Poincaré avança além de Lorentz ao abordar o tempo local como um conceito físico. Ele propõe a situação de dois observadores em movimento uniforme relativo que tentam sincronizar seus relógios por meio de sinais de luz. Relógios ajustados deste modo não apresentarão o tempo verdadeiro, mas mostrarão aquilo a que podemos chamar tempo local. Conforme o artigo (Poincaré, 1898, p.06):

“En d’autres termes, il n’y a pas une manière de mesurer le temps qui soit plus vraie qu’une autre; celle qui est généralement adoptée est seulement plus commode.”²

Segundo Pais (1995), Poincaré salientou que todos os fenômenos vistos por um observador estão atrasados em relação ao outro, mas estão todos atrasados de igual modo. Como exigido pelo princípio da relatividade, o observador não pode saber se está em repouso ou em movimento absoluto. Ainda conforme o autor, ele parecia estar se aproximando dos mesmos postulados de Einstein na relatividade restrita, porém acrescentou que este raciocínio não seria suficiente e eram necessárias hipóteses complementares. Deveria-se supor que os corpos em movimento sofrem uma contração uniforme na direção do respectivo movimento. Embora Poincaré tenha chegado a uma outra concepção relevante, qual seja, a de que se poderia formular uma nova mecânica na qual a velocidade da luz funcionaria como um limite intransponível, sua referência à necessidade de hipóteses suplementares indica que ele ainda não havia atingido a formulação da teoria da relatividade. Assim, antes de 1905, alguns pontos já estavam estabelecidos: as transformações de Lorentz tinham sido desenvolvidas, a noção de simultaneidade já havia sido posta em causa e a ideia da velocidade da luz como velocidade máxima já havia sido aventada. Faltava, contudo, a construção de uma teoria da relatividade plenamente consolidada.

2.3.4 A teoria de Poincaré

A teoria de Poincaré ocupa uma posição ambígua na história da relatividade restrita. Por um lado, ela antecipa elementos técnicos fundamentais da nova física, quais sejam, a interpretação física do tempo local, o uso das transformações de Lorentz, a formulação do grupo de Lorentz e a tentativa de estender o princípio da relatividade à eletrodinâmica e à gravitação. Por outro lado, esses elementos não são integrados em uma reconstrução conceitual do espaço e do tempo equivalente à de Einstein. A diferença central não está apenas nos resultados matemáticos, mas no estatuto físico atribuído a esses resultados.

Já em 1900, ao discutir a teoria de Lorentz, Poincaré conferiu novo significado ao tempo local. Enquanto Lorentz tratava t' sobretudo como artifício formal útil para simplificar as equações, Poincaré o relacionou a um procedimento de sincronização de relógios por sinais luminosos. Nesse sentido, o tempo local deixava de ser apenas uma variável auxiliar e passava a poder ser compreendido como o tempo indicado por relógios ajustados por observadores em movimento. Esse passo é importante porque aproxima Poincaré da análise da simultaneidade que será central em Einstein.

² Não há uma maneira de medir o tempo que seja mais verdadeira do que outra; aquela que geralmente se adota é apenas mais cômoda (tradução nossa).

Já em 1900, ao explicar e elaborar a teoria de Lorentz, Poincaré dera um novo significado especialmente ao conceito de “tempo local” de Lorentz, que Poincaré afirmava ser o tempo medido por relógios em movimento (Poincaré, 1900, p.34):

“I suppose that observers placed at different points set their watches by means of optical signals; that they try to correct these signals by the transmission time [of light between them], but that, ignoring their [common] translatory motion and thus believing that the signals travel at the same speed in both directions, they satisfy themselves with crossing the observations, by sending one signal from A to B, then another from B to A. The local time t' is the time indicated by watches set in this manner. If c is the speed of light, and v the translation [velocity] of the Earth, which I suppose to be parallel to the positive x axes, one has $t' - vx/c^2$.”

A literatura historiográfica costuma enfatizar que, embora a expressão utilizada por Poincaré seja formalmente próxima à de Lorentz, sua interpretação possui alcance diferente, isto é, o tempo local deixa de funcionar apenas como variável auxiliar e passa a ser associado ao tempo efetivamente indicado por relógios sincronizados por sinais luminosos. Essa diferença é relevante, mas não deve ser exagerada. Poincaré não converte essa análise em fundamento de uma nova cinemática geral do espaço e do tempo.

Contudo, a interpretação de Poincaré ainda difere da ruptura einsteiniana. O tempo local é fisicamente reinterpretado, mas não se torna o fundamento de uma nova cinemática universal. Poincaré permanece ligado ao problema da compatibilidade entre a eletrodinâmica de Lorentz e o princípio da relatividade. A questão central, para ele, é mostrar como as teorias físicas existentes podem ser ajustadas para impedir a detecção do movimento absoluto. Em Einstein, ao contrário, a redefinição da simultaneidade elimina a necessidade de um referencial privilegiado e reorganiza diretamente os conceitos de espaço e tempo.

Nos artigos de 1905 e 1906, Poincaré desenvolveu de modo notável as consequências matemáticas do princípio da relatividade. Ele reconheceu a estrutura de grupo das transformações de Lorentz, examinou a covariância das equações eletrodinâmicas e procurou estender essa nova estrutura à gravitação. Esses resultados mostram que Poincaré não estava apenas próximo da relatividade em sentido superficial. Ele possuía instrumentos matemáticos essenciais à formulação da nova física. A diferença, porém, está na interpretação desses instrumentos. Em Poincaré, as transformações de Lorentz funcionavam, sobretudo, como condição formal de compatibilidade das leis físicas com o princípio da relatividade. Em Einstein, elas expressam uma mudança no significado físico do espaço e do tempo. Por isso, ainda que haja forte proximidade formal entre os dois programas, a relatividade especial de Einstein possui uma dimensão conceitual distinta, a saber, ela não apenas preserva a invariância das leis, mas redefine quais estruturas devem ser consideradas fisicamente reais.

Essa diferença aparece também no estatuto do éter. Poincaré não atribui ao éter o mesmo papel mecânico que Lorentz, nem o mantém como referencial detectável. Ainda assim, sua teoria não exige sua eliminação completa. O éter pode permanecer como estrutura subjacente sem função empírica direta. Einstein, ao contrário, retira da teoria qualquer estrutura privilegiada que não desempenhe papel físico na formulação das leis. Assim, a distinção entre os dois não é apenas metodológica, mas envolve uma diferença ontológica sobre o que deve ou não figurar na teoria física.

A literatura diverge quanto ao alcance da contribuição de Poincaré. Autores como Pais, Miller, Cerf e de Broglie tendem a enfatizar que Poincaré reuniu muitos dos elementos técnicos da relatividade, mas não deu o passo conceitual decisivo de Einstein. Outros, como Logunov, atribuem a Poincaré uma formulação mais completa e profunda da teoria, sustentando que a diferença em relação a Einstein foi posteriormente exagerada. Essa divergência é importante porque mostra que a questão não pode ser resolvida apenas pela comparação de fórmulas. Para os fins desta dissertação, o ponto decisivo é filosófico. Poincaré mostra que a equivalência formal ou empírica entre teorias não implica identidade de interpretação ontológica. Mesmo quando duas formulações produzem resultados muito próximos, elas podem divergir quanto ao que consideram fisicamente real. A teoria de Poincaré preserva uma orientação convencionalista e eletrodinâmica. A de Einstein transforma a invariância em critério de objetividade física. Assim, Poincaré deve ser compreendido como um precursor técnico decisivo, mas também como contraste filosófico. Sua teoria evidencia que a relatividade poderia ter sido interpretada como uma restrição formal sobre teorias existentes. Einstein, porém, transformou essa restrição em uma nova ontologia espaço-temporal.

2.4 A teoria da relatividade restrita

Einstein inicia seu artigo, afirmando (Einstein, 1905):

“The introduction of a “luminiferous ether” will prove to be superfluous inasmuch as the view here to be developed will not require an “absolutely stationary space” provided with special properties, nor assign a velocity vector to a point of the empty space in which electromagnetic processes take place.”³.

Desse modo, a teoria da relatividade restrita retirou do éter sua principal propriedade mecânica, o repouso absoluto, tornando-o, assim, redundante. Deixa-se de lado o sistema

³ A introdução de um “éter luminífero” mostrar-se-á supérflua, na medida em que a concepção aqui a ser desenvolvida não exigirá um “espaço absolutamente estacionário” dotado de propriedades especiais, nem atribuirá um vetor velocidade a um ponto do espaço vazio no qual ocorrem processos eletromagnéticos (tradução nossa)

preferencial de coordenadas em repouso absoluto e adota-se um conjunto infinito de sistemas de coordenadas preferenciais, chamados referenciais inerciais. Em um referencial inercial, um objeto não sujeito a forças externas se moverá em linha reta com velocidade constante, ou permanecerá em repouso. Em outras palavras, os referenciais inerciais são aqueles onde não há aceleração; todos os observadores em referenciais inerciais estariam em movimento uniforme uns em relação aos outros. Por definição, quaisquer dois referenciais desse tipo movem-se um em relação ao outro de maneira uniforme. A restrição desta versão da relatividade está na ênfase na uniformidade do movimento relativo.

Em 1905, a confiança de Einstein na “validade das equações de Maxwell-Lorentz” não era absoluta. No entanto, era forte o suficiente para que ele identificasse o conflito entre a invariância da velocidade da luz no vácuo e o princípio da relatividade da mecânica clássica. Esse princípio, amplamente conhecido e intuitivo, estabelece que as leis da mecânica devem ser idênticas em quaisquer dois sistemas de coordenadas, (x, y, z, t) e (x', y', z', t') , correlacionados por:

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

O conflito aparece quando tentamos transformar a invariância de Galileu em um princípio universal. Um éter em repouso absoluto não se ajusta bem a essa ideia. Por isso, alguns físicos passaram a acreditar que as leis da eletrodinâmica precisavam ser revisadas. Einstein, no entanto, escolheu outra rota (Einstein, 1905):

“Os fenômenos eletrodinâmicos e mecânicos não têm características relacionadas ao conceito de repouso absoluto.”

No artigo indicou duas razões para o problema, quais sejam, a ausência de evidência experimental de uma corrente de éter e a presença de assimetrias que não aparentam ser inerentes aos fenômenos.

2.4.1 Os dois postulados

A teoria da relatividade restrita fundamenta-se completamente em dois postulados:

1. As leis da física assumem a mesma forma em todos os referenciais inerciais;
2. Em qualquer referencial inercial, a velocidade da luz permanece constante, independentemente de ser emitida por um objeto em repouso ou em movimento uniforme.

A questão essencial dos tópicos sobre cinemática no artigo era que há tantos tempos quantos sejam os referenciais inerciais. Nesse ponto, fazemos referência à parte cinemática do próprio artigo de Einstein (1905).

2.4.2 A definição de simultaneidade

A definição einsteiniana de simultaneidade é decisiva porque mostra como uma questão aparentemente operacional transforma-se em uma reconstrução do próprio conceito físico de tempo. Na mecânica clássica, supunha-se que dois eventos espacialmente separados poderiam ser considerados simultâneos em virtude de um tempo absoluto comum. Einstein questiona essa suposição, uma vez que para comparar temporalmente eventos ocorridos em pontos distintos, é necessário estabelecer um procedimento físico de sincronização entre relógios.

Considere-se, então, dois pontos A e B , cada um equipado com um relógio em repouso no mesmo referencial inercial. Um sinal luminoso é emitido de A no instante t_A , segundo o relógio localizado em A ; é refletido em B no instante t_B , segundo o relógio localizado em B ; e retorna a A no instante t'_A , novamente segundo o relógio de A . Einstein define os relógios de A e B como sincronizados quando se satisfaz a condição:

$$t_B - t_A = t'_A - t_B.$$

Equivalente a:

$$t_B = \frac{t_A + t'_A}{2}.$$

Essa definição pressupõe que o tempo de propagação da luz de A para B é igual ao tempo de propagação de B para A , no interior do mesmo referencial inercial. A partir daí, torna-se possível definir um tempo comum para eventos espacialmente separados dentro desse referencial.

A consequência filosófica é decisiva, já que a simultaneidade deixa de ser uma relação absoluta entre eventos e passa a depender do referencial inercial e do procedimento físico de sincronização. Desse modo, Einstein não elimina a objetividade do tempo físico, mas a reconstrói. O tempo objetivo não é mais um parâmetro universal independente de todos os referenciais, mas uma grandeza definida no interior de uma estrutura espaço-temporal regulada pela constância da velocidade da luz.

2.4.3 Dívida com Mach e Hume

A discussão a seguir toma Norton (2010) como uma das referências para a influência de Hume e Mach sobre Einstein, mas reorganiza o problema em função da tese desta dissertação, a saber, a passagem da crítica conceitual à reconstrução realista da objetividade relativística.

A formulação da relatividade restrita não resultou apenas de dificuldades internas da eletrodinâmica, mas também de uma atitude filosófica específica diante dos conceitos fundamentais da física. Einstein reconheceu a importância de Hume e Mach na formação dessa atitude crítica. A influência de ambos não deve ser entendida como se eles tivessem antecipado tecnicamente a teoria da relatividade, nem como se tivessem fornecido diretamente a análise einsteiniana da simultaneidade. O ponto decisivo foi no sentido de que eles ajudaram Einstein a desconfiar de conceitos aparentemente evidentes, mas cuja legitimidade física dependia de uma análise mais cuidadosa de sua conexão com a experiência.

Mach desempenhou papel importante ao criticar noções absolutas herdadas da mecânica newtoniana, especialmente a ideia de espaço absoluto. Sua exigência era que os conceitos científicos fossem examinados quanto à sua origem empírica e quanto à função que desempenham na explicação dos fenômenos. Conceitos que não pudessem ser vinculados a procedimentos físicos ou a relações observáveis deveriam ser corrigidos, reformulados ou eliminados. Nesse sentido, Mach ofereceu a Einstein uma licença filosófica para questionar categorias tradicionais da física, como repouso absoluto, movimento absoluto e, indiretamente, simultaneidade absoluta. Essa influência, porém, tinha limites. Einstein não adotou o empirismo de Mach em sua forma mais rígida. Ao contrário, criticou a tendência machiana de reduzir a ciência a uma ordenação econômica de dados sensoriais. Para Einstein, as teorias físicas não são meras generalizações da experiência, mas construções conceituais livres, guiadas por critérios como simplicidade, coerência, poder explicativo e adequação empírica. A experiência controla a teoria, mas não a produz mecanicamente. Assim, embora Mach tenha ajudado Einstein a desconfiar de conceitos metafísicos desnecessários, não forneceu por si só o elemento construtivo necessário à nova teoria.

É nesse ponto que a influência de Hume se torna relevante. Hume mostrou que certos conceitos fundamentais, como causalidade, necessidade e conexão, não podem ser deduzidos logicamente da experiência. Eles resultam de hábitos, expectativas ou formas de organização do pensamento. Essa crítica abriu espaço para a percepção de que alguns conceitos físicos não são simplesmente dados pela natureza, mas introduzidos pela mente como instrumentos de ordenação da experiência. Diferentemente de Mach, Hume não conduz necessariamente à simples eliminação dos conceitos não diretamente observáveis, porém permite compreendê-los como construções cuja legitimidade deve ser avaliada pelo papel que desempenham no sistema teórico. Essa diferença ajuda a entender por que Einstein pôde abandonar a simultaneidade absoluta sem cair em um empirismo estrito. A simultaneidade de eventos distantes parecia, na física clássica, uma noção evidente. No entanto, quando submetida à análise operacional, percebe-se que ela exige um procedimento de sincronização entre relógios espacialmente separados. Sem uma regra física para essa sincronização, não há um tempo comum imediatamente dado entre pontos distantes. A simultaneidade deixa, então, de ser um dado absoluto da realidade e passa a depender de uma definição física associada

à propagação da luz. A inovação de Einstein consistiu em transformar essa dificuldade conceitual em ponto de partida teórico. Em vez de simplesmente rejeitar a simultaneidade distante como conceito ilegítimo, ele propôs uma nova definição, compatível com o princípio da relatividade e com a constância da velocidade da luz. Assim, a análise filosófica dos conceitos não levou a uma destruição da física, mas à construção de uma nova cinemática. A simultaneidade absoluta foi substituída por uma simultaneidade relativa ao referencial, definida por procedimentos físicos de sincronização.

Desse modo, a dívida de Einstein com Mach e Hume deve ser compreendida em dois níveis. De Mach, Einstein herdou a suspeita contra conceitos absolutos não legitimados pela experiência. De Hume, encontrou estímulo para reconhecer que certos conceitos fundamentais envolvem uma dimensão construtiva e não são deduções lógicas da experiência. Mas Einstein ultrapassou ambos, pois contra Mach, preservou a liberdade criadora da teoria e contra um ceticismo humeano mais geral manteve a confiança de que construções conceituais bem escolhidas podem descrever a estrutura objetiva do mundo físico.

A relatividade restrita, portanto, não deve ser interpretada como simples aplicação de um programa empirista. Ela resulta de uma síntese entre crítica conceitual, construção teórica e compromisso realista. A eliminação da simultaneidade absoluta não significou o abandono da objetividade, mas sua reformulação. O que é objetivo não é o tempo absoluto newtoniano, mas a estrutura relacional expressa pelas transformações de Lorentz e pelos invariantes espaço-temporais. Nesse sentido, a influência de Mach e Hume foi decisiva não porque forneceu a teoria, mas porque ajudou Einstein a reconhecer que certos conceitos fundamentais da física podiam, e deviam, ser reconstruídos.

2.5 Semelhanças e diferenças entre as teorias de Einstein e Poincaré

A discussão sobre as semelhanças e diferenças entre Einstein e Poincaré é decisiva para o argumento desta dissertação porque permite separar equivalência formal, equivalência empírica e equivalência ontológica. O ponto não é decidir apenas quem chegou primeiro a determinadas fórmulas, mas compreender se duas teorias estruturalmente próximas atribuem o mesmo estatuto físico aos elementos que utilizam. A comparação mostrará que Poincaré antecipa elementos técnicos fundamentais da relatividade, mas Einstein lhes confere um significado ontológico distinto ao eliminar estruturas privilegiadas empiricamente ociosas e transformar a invariância em critério de objetividade física.

Conforme Abraham Pais (1982), um ponto que liga o trabalho de Einstein ao de Poincaré é aquele concernente ao princípio da relatividade. Porém, importa notar que os dois não trabalhavam exatamente com o mesmo princípio. Segundo Poincaré, as leis dos fenômenos físicos devem ser as mesmas para um observador imóvel e para um observador que

experimenta movimento uniforme ao longo de uma linha reta. Conforme Einstein, as leis pelas quais os estados dos sistemas físicos sofrem mudança não são afetadas, quer essas mudanças de estado sejam referenciadas por um ou outro dos dois sistemas de coordenadas em movimento de translação uniforme. A diferença central entre essas formulações é que Poincaré considera indispensável recorrer a um observador, ao passo que Einstein dispensa essa referência. Isso faz com que o princípio de Einstein imponha restrições mais rigorosas, uma vez que para Einstein, não pode existir qualquer distinção entre as formas das leis da natureza em diferentes referenciais inerciais, enquanto Poincaré pode admitir que tais leis apareçam de um modo quando formuladas em um referencial privilegiado e de forma mais complexa em todos os demais referenciais, contanto que, em conjunto, operem de tal maneira que essa diferença entre referenciais não produza consequências observáveis.

Ainda conforme Pais, a visão de Poincaré pode ser encontrada no status que atribuiu ao princípio da relatividade, que considerava ser um resultado empírico, uma generalização indutiva a partir dos resultados nulos de experimentos de arrasto de éter, como o “experimento Fizeau”, o “experimento Trouton-Noble” e o “experimento Michelson-Morley”. Assim, por exemplo, o princípio estaria, até aquele momento, de acordo com a experiência, mas poderia ser posteriormente confirmado ou refutado por testes mais precisos. A indução a partir destes resultados experimentais justifica a afirmação de que todos os sistemas de referência inerciais aparecem idênticos aos observadores, mas não necessariamente a afirmação mais forte de que todos esses sistemas de referência são de fato idênticos. Estamos, portanto, justificados em fazer uma distinção entre “as leis para um observador”, que são o objeto do princípio da relatividade de Poincaré, e “as leis da natureza universais”, que são o objeto daquele de Einstein. Assim, entendendo dessa forma, Poincaré tinha uma compreensão diferente do princípio da covariância de Lorentz, uma vez que ele impõe o requisito da covariância de Lorentz a todas as equações fundamentais da natureza, mas as equações em questão ainda são compreendidas em relação ao referencial de repouso do éter e nunca são referidas a qualquer outro referencial. Para Einstein, por outro lado, a motivação por trás da covariância de Lorentz é que as equações não devem ser afetadas pelas transformações de coordenadas porque o princípio da relatividade exige que elas realmente assumam a mesma forma em todos os referenciais, porque não existe um referencial especial em relação ao qual a formulação das leis tem prioridade conceitual.

Desse modo, embora a exigência de covariância de Lorentz em Poincaré seja, do ponto de vista matemático, equivalente à de Einstein, ela se apoia em motivações bastante distintas e, por isso, enquanto princípio heurístico, orienta a investigação de outra maneira. No que diz respeito às transformações de Lorentz, Poincaré parece não lhes ter atribuído o mesmo significado físico; ainda assim, seu emprego era suficientemente próximo daquele característico da relatividade especial. Suas contribuições foram sobretudo matemáticas, quais sejam, a introdução do grupo de Lorentz e de seus invariantes, a formulação da noção de quadri-*vetor* e

a identificação de grandezas que se transformam como quadrivetores, além da interpretação das transformações de Lorentz como rotações em um espaço quadridimensional.

Janssen (1995) mostra que, embora a teoria de Lorentz-Poincaré antes de 1905 não seja equivalente, empiricamente, à relatividade especial, ela pode sê-lo com alterações mínimas. Outros fizeram comparações entre estes dois programas, sendo que Goldberg (Goldberg, 1970) e Holton (Holton, 1973) buscaram diferenciar as abordagens e mostrar por que o trabalho de Einstein era superior ao de Lorentz e Poincaré. Por outro lado, Zahar (Zahar, 1973), Schaffner (Schaffner, 1974) e Prokhovnik (Prokhovnik, 1974) analisaram a relação entre esses programas a partir do problema da equivalência empírica, da comparação epistemológica e dos critérios históricos de escolha entre teorias rivais.

De acordo com Walter Scott (2009), a abordagem de Einstein à relatividade contrasta de maneira marcante, nesse aspecto, com a de Poincaré, que omitiu qualquer referência explícita à sincronização de relógios em seu artigo de 1905 sobre relatividade (embora tenha retomado e aprofundado o tema alguns anos mais tarde). Não obstante, os resultados matemáticos obtidos por Einstein coincidem exatamente com aqueles alcançados por Poincaré. Em particular, ambos derivaram a lei de composição relativística de velocidades a partir das transformações de coordenadas que relacionam dois referenciais inerciais (denominadas “transformações de Lorentz” por Poincaré). O mesmo se aplica às consequências empíricas apresentadas em ambos os trabalhos, que são idênticas, com uma única exceção. Esta diz respeito ao status dos fenômenos gravitacionais. Este assunto foi negligenciado por Einstein, embora tenha sido identificado por Poincaré em seu discurso de setembro de 1904 no Congresso Científico da Feira Mundial em Saint Louis como um potencial anúncio para o princípio da relatividade. Como professor de Astronomia Matemática e Mecânica Celeste, Poincaré dificilmente poderia fingir que a gravitação não existia e, em vez disso, formulou um par de leis relativísticas da gravitação, as primeiras de seu tipo. As próprias leis eram observacionalmente iguais às de Newton, mas dificilmente convincentes em termos físicos; elas retêm interesse, no entanto, em virtude de sua forma e da maneira como Poincaré as derivou. Poincaré introduziu um espaço quadridimensional, no qual três dimensões (espaciais) são reais e a quarta dimensão (temporal) é imaginária, de modo que as rotações coordenadas sobre a origem correspondem às transformações de Lorentz. Três anos depois, o matemático Hermann Minkowski (1864-1909) estendeu a abordagem geométrica de Poincaré em sua teoria do espaço-tempo e usou isso para expressar duas leis relativísticas da gravitação.

Shaul Katzir (2005) afirma que Poincaré introduziu a transformação de Lorentz como uma relação entre um sistema de referência estacionário e outro em movimento uniforme. Contudo, ao longo de seu artigo, ele a aplicou efetivamente à transformação entre dois sistemas em movimento. Ademais, em seu tratamento matemático, Poincaré não introduziu qualquer distinção essencial entre esses dois sistemas. Dado que as transformações de Lorentz constituem um grupo, elas são aplicáveis, em princípio, a quaisquer sistemas de referência

em movimento retilíneo e uniforme entre si. Poincaré não rejeitou o conceito de éter, mas deixou de conferir a ele o status de referencial privilegiado na aplicação da transformação de Lorentz entre distintos sistemas. Na física atual, o espaço ou o espaço-tempo assume, em certa medida, a função que o éter ocupava na perspectiva de Poincaré, entretanto, para este, o espaço, tomado isoladamente, não possuía significado próprio. Em sua filosofia, o espaço era definido de modo operacional, a partir da disposição e das relações entre os corpos materiais, sem propriedades intrínsecas. Por isso, não poderia servir de suporte para forças ou ondas. Na ausência do éter, a ação à distância tornar-se-ia inevitável, mesmo que esse éter não fosse caracterizado por propriedades mecânicas no sentido clássico. Concluiu que, como a nova formulação relativística de Poincaré dependia da validade das equações de Maxwell, ela não possuía o mesmo grau de generalidade que a teoria da relatividade especial de Einstein, a qual parte apenas do princípio da relatividade e da constância da velocidade da luz. Em vez de elaborar uma teoria autônoma, Poincaré limitou-se a empregar o princípio da relatividade para indicar de que modo as teorias então vigentes da eletrodinâmica e da gravitação precisariam ser ajustadas para se tornarem compatíveis com esse princípio.

Outro importante artigo, escrito por Roger Cerf (2006), aponta que a primeira generalização do princípio da relatividade newtoniana deveu-se a Poincaré: as leis dos fenômenos físicos devem ser as mesmas, seja para um observador fixo ou para um observador levado em um movimento uniforme de translação. No entanto, o princípio generalizado permaneceu uma conjectura para Poincaré. Essa natureza conjectural é enfatizada porque é muito provável que seja a razão pela qual Poincaré não encontrou as consequências finais do princípio da relatividade. Muitas vezes foi dito que a desvantagem de Poincaré era sua epistemologia convencionalista que concedia às leis da geometria e da física, no máximo, a natureza de uma convenção útil, sem um significado de realidade mais profunda. Para Poincaré, representações matemáticas diferentes do universo poderiam constituir convenções equivalentes.

Louis de Broglie escreveu que (2008, p. 30):

“Poincaré did not take the decisive step. He left to Einstein the glory of having perceived all the consequences of the principle of relativity and, in particular, of having clarified through a deeply searching critique of the measures of length and duration, the physical nature of the connection established between space and time by the principle of relativity.”⁴.

Cerf conclui que a relatividade especial foi uma mudança radical porque o éter tornou-se supérfluo. Não havia mais espaço para essa ideia peculiar presente nos trabalhos de Lorentz

⁴ Poincaré não deu o passo decisivo. Deixou a Einstein a glória de ter percebido todas as consequências do princípio da relatividade e, em particular, de ter esclarecido, por meio de uma crítica profundamente penetrante das medidas de comprimento e duração, a natureza física da conexão estabelecida entre espaço e tempo pelo princípio da relatividade (tradução nossa)

e Poincaré de que os objetos devem sofrer contração por um efeito dinâmico resultante de seu movimento em relação ao éter. Na relatividade especial, os efeitos de contração relativística decorrem apenas de argumentos cinemáticos. Nesse sentido, apesar de Poincaré ter discernido fragmentos significativos da teoria especial, seria um exagero considerar seus resultados passíveis de inferir a relatividade especial. Para isso, seria necessário fazer o que Einstein fez, a saber, reconhecer a natureza física da conexão e estabelecer a conexão como uma lei geral para os fenômenos naturais.

Arthur Miller (1973) aduz que para um cientista com os talentos de Poincaré, a consciência da teoria de Lorentz deveria ter sido o ímpeto para a descoberta de uma teoria da relatividade. Poincaré parecia ter todos os conceitos necessários para uma teoria da relatividade, isto é, uma discussão dos vários experimentos nulos com precisão de primeira e segunda ordem em v/c ⁵; uma discussão do papel da velocidade da luz nas medições de comprimento; as equações de transformação relativísticas corretas para o campo eletromagnético e a densidade de carga; um princípio de ação relativisticamente invariante; a equação relativística correta para a adição de velocidades; o conceito do grupo Lorentz; uma noção rudimentar do formalismo de quadrivetores e do espaço quadridimensional; uma cinemática relativística correta (na aproximação quase estacionária); e uma teoria gravitacional covariante de Lorentz na qual a gravidade é propagada através do éter com a velocidade da luz. Sua teoria da relatividade deveria ser indutiva com as leis do eletromagnetismo como base para toda a física. No entanto, a adesão estrita a esse tipo de programa de pesquisa o impediu de entender a aplicabilidade universal do princípio da relatividade e, portanto, a importância da constância da velocidade da luz em todos os referenciais inerciais.

A exposição de Von Laue dos resultados de Poincaré serviu não apenas para apresentá-los à luz das técnicas da relatividade einsteiniana (conforme desenvolvidas por Planck e Minkovski), mas, além disso, apontou as armadilhas que Lorentz poderia ter evitado se tivesse construído uma teoria do elétron com as ferramentas que estavam disponíveis quatro anos depois. As propriedades de transformação não podem ser deduzidas da teoria de Lorentz sem as tensões de Poincaré. Caso tivesse investigado a maneira pela qual a densidade do momento do campo se transforma, ele teria descoberto que ela não é um vetor. No entanto, ele não percebeu que em uma teoria da relatividade universal o papel básico é desempenhado pela energia e momento em vez da força. Em uma imagem de mundo eletromagnética, por outro lado, a força é o fator básico porque é uma função dos campos que são determinados pela carga (que se supõe ser dada) através das equações de Maxwell-Lorentz. Dessa forma, o elétron massivo é construído ou gerado a partir de seus próprios campos. A adesão de Poincaré à imagem de mundo eletromagnética na qual o princípio da relatividade era uma

⁵ Efeitos de primeira ordem em v/c são proporcionais a v/c ; efeitos de segunda ordem são proporcionais a $(v/c)^2$, onde v é a velocidade do sistema considerado e c é a velocidade da luz. Como v/c é pequeno em velocidades terrestres, os efeitos de segunda ordem são muito menores

lei aberta à verificação experimental permaneceu forte até o fim de sua vida.

Assim, o firme apego de Poincaré a uma teoria indutiva da relatividade estava consoante com o princípio fundamental de sua filosofia da ciência, ou, em suas palavras (Poincaré, 2012):

“Experiment is the sole source of truth and it is not merely a principle which it is a question of saving, it is the indubitable results of the experiments of Michelson.”⁶.

Uma opinião discordante é trazida por Logunov (2004) que afirma que Poincaré descobriu e formulara tudo o que compõe a essência da teoria especial da relatividade. Einstein se baseara em ideias de Poincaré sobre a definição da simultaneidade de eventos ocorrendo em diferentes pontos espaciais por meio do sinal de luz. Justamente por isso, ele introduziu um postulado adicional, que era a constância da velocidade da luz. Nesse sentido, segundo o aludido autor, a abordagem de Poincaré era mais geral e profunda. O desejo marcante de alguns autores de provar que Poincaré não deu o passo decisivo para criar a teoria da relatividade seria baseado tanto na incompreensão da essência da teoria da relatividade quanto no conhecimento superficial das obras deste.

Ainda segundo Logunov (2005), o princípio fundamental poderia ser enunciado assim: o princípio da relatividade implica que todas as equações físicas mantêm a mesma forma em qualquer sistema de referência inercial. No entanto, ao utilizar a noção de sistema de referência inercial, essa formulação já incorpora a lei da inércia de Galileu. Essa é a principal diferença em relação às formulações de Poincaré e Einstein. Poincaré, ao enunciar esse princípio, sabia que uma de suas implicações era a impossibilidade do movimento absoluto, pois todos os sistemas de referência inercial eram equivalentes. Portanto, o princípio da relatividade de Poincaré não exige a negação completa do conceito de éter, mas apenas o desvincula de qualquer sistema de referência específico. Em outras palavras, ele elimina o éter no sentido que Lorentz o concebia. Poincaré não rejeita o conceito de éter por completo, pois considera difícil imaginar o espaço completamente vazio. Dessa forma, quando ele usa o termo éter em seus textos, ele se refere a um conceito diferente daquele proposto por Lorentz. Esse éter de Poincaré deve, no entanto, respeitar o princípio da relatividade. Einstein também teria retomado a ideia de éter em 1920. Hoje em dia, esse papel é atribuído ao vácuo físico. No entanto, muitos físicos não teriam compreendido completamente esse ponto, e alguns, equivocadamente, atribuíram a Poincaré a ideia de que o princípio da relatividade significa a impossibilidade de detectar o movimento uniforme em relação ao éter. Contudo, conforme o autor, a palavra éter não aparece na formulação original do princípio da relatividade. Assim, o princípio da constância da velocidade da luz, sugerido por Einstein como o segundo

⁶ A experiência é a única fonte da verdade, e não se trata meramente de salvar um princípio; trata-se dos resultados indubitáveis dos experimentos de Michelson (tradução nossa)

postulado independente, é realmente uma consequência especial dos requisitos do princípio da relatividade por Poincaré.

Janssen (1995) parece trazer uma perspectiva clara sobre a diferença entre as teorias. A princípio, explica que antes da teoria da relatividade buscava-se fornecer explicações dinâmicas para uma classe de fenômenos, a saber, todas as manifestações da invariância de Lorentz, que a relatividade especial revelou serem puramente cinemáticas. Esclarece que um fenômeno ser cinemático não é nada além de uma instância específica de alguma característica genérica do mundo, ou seja, não há mais nada a aprender daquele fenômeno em particular, nem sobre o sistema específico em que ele ocorre, nem sobre a característica genérica que ele instancia. Um apelo por mais explicações seria, portanto, completamente equivocado.

Continua dizendo que a primeira parte do artigo de Einstein refere-se ao comportamento universal de hastes e relógios em movimento. Einstein privilegiou os sistemas físicos que serviam como hastes e relógios, mas não há razão para uma restrição a tais sistemas na definição de cinemática. Janssen define a cinemática (espaço-tempo) como o comportamento espaço-temporal universal de todos os sistemas físicos. Varas e relógios medem tempos e distâncias porque exibem o comportamento espaço-temporal padrão de todos os sistemas físicos. A relatividade especial impõe uma restrição cinemática a todas as leis dinâmicas. Essa restrição cinemática é um exemplo do que Marc Lange chamaria de meta-lei. Uma meta-lei não pode ser derivada de meras leis ordinárias, o que não quer dizer que não possamos procurar uma explicação mais profunda da meta-lei. No início do século XIX já se observava uma mudança da visão eletromagnética da natureza de Abraham na qual tudo é feito de campos eletromagnéticos e as equações de Maxwell seriam a teoria de tudo para a mecânica relativística do *continuum* de Laue. Seguindo a liderança de Abraham, Lorentz propôs um modelo de elétron puramente eletromagnético. Poincaré resolveu alguns problemas de estabilidade do modelo no que ficou conhecido como pressão de Poincaré, comprometendo, entretanto, a pureza eletromagnética do modelo. Embora a relatividade especial seja omissa quanto à natureza e estrutura do elétron, fornece a mesma fórmula para a massa transversal de um elétron em movimento como o modelo de Lorentz.

Janssen continua explicando que, em grande medida, essa foi uma mudança da dinâmica para a cinemática. Tal distinção cinemático-dinâmica tende a se enredar com a famosa distinção de Einstein entre teorias de princípios e teorias construtivas. Conceitualmente, para se estabelecer uma teoria de princípio para uma certa classe de fenômenos, elevam-se algumas regularidades observadas sobre estes fenômenos ao nível de postulados. A única coisa que uma teoria de princípios diz sobre a realidade subjacente é que todos os fenômenos originados estão de acordo com os postulados. Para estabelecer uma teoria construtiva da mesma classe de fenômenos, propõe-se um modelo específico para a realidade por trás deles.

A relatividade especial, no entanto, não é uma teoria de princípio neste sentido muito

estrito e Einstein nunca pretendeu que fosse. Por um lado, ele claramente queria rejeitar qualquer teoria construtiva que postulasse um éter. De acordo com a relatividade especial, a dependência da massa com a velocidade não tem nada a ver com as especificidades da dinâmica do eletromagnetismo, pressão do éter ou o que quer que seja, mas é uma propriedade genérica de sistemas fechados em um mundo de acordo com os postulados da teoria. Foi por uma razão que Einstein chamou a primeira metade do seu artigo de 1905 de “a parte cinemática”. A dependência da velocidade da massa é, portanto, cinemática no sentido amplo de ser independente dos detalhes da dinâmica.

Conforme Einstein afirmou, em tradução livre (Einstein, 1917):⁷

“A teoria da relatividade leva à mesma lei do movimento, sem exigir nenhuma hipótese especial quanto à estrutura e ao comportamento do elétron. Chegamos a uma conclusão semelhante... com o experimento de Fizeau, cujo resultado é previsto pela teoria da relatividade sem a necessidade de recorrer a hipóteses quanto à natureza física do líquido.”

Tanto Pauli quanto Lorentz escreveram em 1921 e 1922 que a velocidade dependente da massa é cinemática. Nesse sentido, (Pauli, 2013, 149):

“It constituted a definite progress that Lorentz’s law of the variability of mass could be derived from the theory of relativity without making any specific assumptions on the electron shape or charge distribution. Also nothing need be assumed about the nature of the mass.”⁸.

Em suma, Einstein teria deixado claro que recorreu a uma teoria de princípios no caminho até a relatividade especial apenas porque não encontrou uma teoria construtiva capaz de substituir a teoria geral de Lorentz sobre matéria e campos. A teoria de princípios que acabou formulando impôs, sem dúvida, restrições úteis a uma eventual teoria construtiva, mas, em última instância, era essa teoria construtiva que ele buscava. No artigo do *Times* (Einstein, 1954) de 1919, ao introduzir a distinção entre teorias de princípio e construtivas, ele manifestou clara preferência por estas últimas, afirmando que, quando dizemos ter compreendido um conjunto de processos naturais, normalmente queremos dizer que encontramos uma teoria construtiva que os abrange. Já numa carta do início de

⁷ Die Relativitätstheorie liefert dasselbe Bewegungsgesetz, ohne daß sie irgendeiner speziellen Hypothese über den Bau und das Verhalten des Elektrons bedürfte. Analog liegen die Dinge, wie wir in § 13 gesehen haben, bei dem Versuch von Fizeau, dessen Ergebnis die Relativitätstheorie lieferte, ohne daß Hypothesen über die physikalische Natur der Flüssigkeit gemacht werden mußten.

⁸ Constituiu um progresso definido o fato de que a lei de Lorentz da variabilidade da massa pôde ser derivada da teoria da relatividade sem que se fizessem quaisquer suposições específicas sobre a forma do elétron ou sobre a distribuição de sua carga. Também não era necessário pressupor nada sobre a natureza da massa (tradução nossa)

1908, ele expressara essa mesma preferência no caso da relatividade especial: a teoria da relatividade é, no fim das contas, tão pouco satisfatória quanto a termodinâmica antes de Boltzmann interpretar a entropia em termos de probabilidade.

Assim, ao estabelecer que o comportamento espaço-temporal deve obedecer às regras codificadas no espaço-tempo de Minkowski e que este requisito é automaticamente atendido se o sistema é governado pelas leis invariantes de Lorentz, a relatividade especial impôs uma restrição cinemática a todas as leis dinâmicas. As características relevantes do sistema em movimento não exigem uma explicação dinâmica na relatividade especial. Elas são puramente cinemáticas no sentido de que o sistema em movimento está apenas exibindo um comportamento espaço-temporal padrão. O espaço-tempo de Minkowski codifica o comportamento espaço-temporal padrão de todos os sistemas físicos em um mundo de acordo com as leis da relatividade especial.

Einstein identificou a nova característica da relatividade especial em 1905 como a compreensão de que as transformações de Lorentz transcendem sua conexão com as equações de Maxwell e têm a ver com a natureza do espaço e do tempo em geral. Ele identificou seu papel heurístico como um resultado ainda mais novo, qual seja, a invariância de Lorentz é uma condição geral para qualquer teoria.

E, sendo assim, qual a justificação para a escolha de uma teoria em detrimento da outra?

Como já abordado acima, Janssen ofereceu um argumento bastante influente sobre a questão da escolha, isto é, na maneira diferente em que as teorias envolvidas traçam a linha entre dinâmica e cinemática. Nesse sentido, para os defensores da visão de mundo eletromagnética, a invariância de Lorentz era uma característica natural das leis físicas. No caso da relatividade especial, a invariância de Lorentz das leis da física não é dinamicamente fundamentada. Os efeitos físicos mencionados são uma manifestação da nova e revolucionária cinemática que a teoria postula. Essa característica da teoria se tornou clara e explícita no trabalho seminal de Minkowski, no qual as características métricas do espaço-tempo de Minkowski, que regem o comportamento espaço-temporal normal de objetos físicos, determinam que as leis que governam os sistemas físicos são invariantes de Lorentz. Ou seja, na relatividade especial a invariância de Lorentz das leis físicas tem uma fundação cinemática, crono-geométrica. Entretanto, a abordagem de Poincaré ajustada poderia da mesma forma fornecer uma explicação unificada.

Uma maneira alternativa de defender a escolha é dada por considerações de simplicidade física e ontológica. A violação de tais princípios na teoria de Poincaré reflete que o éter e o quadro de referência privilegiado correspondente que a teoria postula são empiricamente supérfluos e implicam assimetrias que não correspondem aos fenômenos, como Einstein diria. O éter e o quadro de referência privilegiado são empiricamente supérfluos no sentido de que não são relevantes na derivação de consequências empíricas. A violação de princípios

de simetria na teoria de Poincaré implica que o éter passa a assumir um estatuto físico problemático. Uma vez que ele introduz uma estrutura privilegiada que não se manifesta nas leis observáveis, sua realidade torna-se suspeita. Nesse contexto, o fato de a relatividade especial não postular entidades ou estruturas desse tipo contribui para que ela seja considerada uma teoria mais simples, tanto do ponto de vista físico quanto ontológico. No entanto, a simples não postulação de um referencial de repouso do éter não constitui, por si só, um argumento decisivo contra sua existência. Poderia haver, em princípio, fundamentos físicos para tal entidade. Além disso, a rejeição automática de entidades não observáveis como princípio normativo é filosoficamente controversa. Mesmo quando uma entidade é diretamente inobservável, ela pode produzir efeitos observáveis que funcionam como indícios indiretos de sua existência.

O problema central com o éter emerge de forma mais aguda após a demonstração, por Poincaré, de que as transformações de Lorentz possuem caráter simétrico. Nesse cenário, o éter deixa de ser apenas inobservável e passa a ser empiricamente supérfluo, isto é, torna-se logicamente irrelevante para a derivação das consequências empíricas da teoria. Sua eliminação, portanto, não compromete o poder explicativo da teoria, o que enfraquece significativamente qualquer justificativa para sua manutenção. Uma vez que passa a ser empiricamente supérfluo, o éter ganha um tom nitidamente metafísico, uma vez que estruturas ou entidades que nada acrescentam à derivação de consequências observáveis tornam-se fortemente suspeitas de não corresponderem a nada físico. Na teoria de Einstein, ao contrário, esse tipo de compromisso não aparece. Assim, a dificuldade do éter pode também ser expressa em termos de simplicidade física, já que a ontologia da relatividade especial é mais enxuta do que a da teoria de Poincaré. Do mesmo modo que a violação de princípios de simetria, a superfluidade do éter constitui um defeito da teoria de Poincaré, e não apenas por motivos estéticos ou pragmáticos. A maior simplicidade ontológica da relatividade especial, por sua vez, relaciona-se a fundamentos ontológicos mais robustos.

Embora a simplicidade matemática não funcione como um critério para fazer uma escolha, é muito razoável pensar que a simplicidade física associada à formulação da relatividade especial em termos do espaço-tempo de Minkowski não tenha escapado aos olhos dos cientistas da época.

2.6 O Einstein da relatividade

O abandono do tempo absoluto e, conseqüentemente, da simultaneidade absoluta é um dos traços centrais da relatividade restrita. À primeira vista, essa mudança poderia sugerir uma leitura antirrealista da teoria. Se comprimentos, durações e relações de simultaneidade variam conforme o referencial adotado, então pareceria que a relatividade descreve apenas o modo como os fenômenos aparecem a observadores situados, e não uma realidade

física independente. Essa suspeita é reforçada pelo papel desempenhado pelos procedimentos de medição na formulação de 1905 (Einstein, 1905), especialmente pela definição de simultaneidade mediante sinais luminosos.

Essa leitura, contudo, precisa ser tratada com cautela. O fato de Einstein abandonar certas grandezas absolutas não significa que ele abandone a objetividade física. Ao contrário, a relatividade restrita desloca o critério de objetividade, uma vez que deixam de ser fundamentais aquelas grandezas que dependem de uma escolha de referencial, enquanto ganham centralidade as estruturas que permanecem invariantes nas transformações entre referenciais admissíveis. Nesse sentido, o problema não é a eliminação da realidade, mas a substituição de uma ontologia baseada em absolutos newtonianos por uma ontologia relacional e invariante.

A dificuldade aparece, por exemplo, na discussão sobre a realidade da contração de Lorentz. Quando questionado sobre a diferença entre sua interpretação e a de Lorentz, Einstein respondeu que a contração não existe para um observador que se move com a régua, mas existe para um observador relativamente em repouso que pode, em princípio, demonstrá-la.

Einstein afirmou que (Pais, 1995, p.165):

“O autor injustificadamente afirma que há uma diferença entre a abordagem de Lorentz e a minha quanto aos fatos físicos. É confusa a questão de a contração de Lorentz existir ou não. Não existe realmente, na medida em que não existe para um observador que se move (com a régua); existe realmente no sentido em que pode, em princípio, ser demonstrada por um observador em repouso.

Essa resposta mostra que Einstein não reduz o fenômeno a uma ilusão subjetiva. A contração é real enquanto efeito físico situado em uma relação entre referenciais, embora não seja uma propriedade absoluta do corpo considerado independentemente de qualquer quadro de comparação. Essa distinção ajuda a evitar um falso dilema. De um lado, não é necessário manter a ontologia clássica de propriedades absolutas para preservar o realismo. De outro, não se deve concluir que toda propriedade dependente de referencial seja meramente ilusória. Medidas de comprimento e duração obtidas em referenciais específicos são reais enquanto resultados físicos situados. O que elas não possuem é o estatuto de grandezas invariantes. A relatividade introduz, portanto, uma diferenciação entre realidade perspectival e realidade estrutural.

Essa posição também permite compreender a relação entre a relatividade e certas tendências empiristas ou antirrealistas. No caso da relatividade, o problema do éter não era simplesmente ser inobservável, mas tornar-se empiricamente supérfluo e teoricamente desnecessário. Por isso, a comparação entre Einstein e Poincaré não deve ser formulada apenas como oposição entre realismo e antirrealismo. Poincaré manteve, em alguma medida,

a possibilidade de uma estrutura subjacente ou de um referencial privilegiado, ainda que sem consequências observáveis diretas. Einstein, por sua vez, recusou tal compromisso ao eliminar da teoria aquilo que não desempenhava função física efetiva. Essa eliminação, porém, não deve ser confundida com uma recusa da realidade. Trata-se, antes, de uma exigência seletiva, a saber, a ontologia da teoria deve ser restringida ao que participa da estrutura objetiva dos fenômenos.

A análise de Katsumori ajuda a esclarecer esse ponto ao mostrar que, em certos momentos, Einstein se aproximou de uma noção de validade transpessoal. A realidade física, nessa perspectiva, não se confunde com a experiência privada de um sujeito, mas emerge de estruturas que permitem a correspondência entre experiências de diferentes observadores.

Conforme apontado por Katsumori (Makoto, 2016):

“Parece, no entanto, que o próprio Einstein, em certa fase de sua carreira, aproximou-se de uma noção de intersubjetividade — tanto no que diz respeito à teoria da relatividade quanto em um contexto epistemológico mais geral. Isso é atestado pelas passagens iniciais de suas palestras de 1921 em Princeton (publicadas em 1922 como *Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie*). Einstein começa apontando que qualquer experiência pertence, a princípio, ao indivíduo e, portanto, é subjetiva. Um passo em direção à cognição científica é dado, no entanto, quando, com o auxílio da linguagem, diferentes pessoas comparam suas experiências. O que é crucial aqui é que “às experiências sensoriais [de pessoas diferentes] que correspondem umas às outras e são, portanto, em certo sentido, transpessoais (*überpersönlich*), se atribui em pensamento uma realidade”. É assim que se forma o conceito de corpo físico e outros conceitos referentes a experiências que permitem correspondência mútua entre indivíduos.”

Essa dimensão intersubjetiva, entretanto, não esgota o realismo de Einstein. A validade transpessoal é condição do conhecimento científico, mas o objetivo da teoria física continua sendo representar uma estrutura que não dependa do ponto de vista particular de um observador. É nesse contexto que se torna relevante a chamada visão da invariância da realidade. Segundo essa interpretação, associada à reflexão filosófica sobre as simetrias da relatividade, apenas aquilo que permanece estável sob transformações admissíveis pode aspirar ao estatuto de realidade objetiva. A ideia não é que os dados perspectivais sejam falsos, mas que sua objetividade é derivada, uma vez que são manifestações referenciais de uma estrutura mais profunda. A realidade física, em sentido mais forte, deve ser procurada naquilo que não se altera quando mudamos legitimamente a descrição.

Essa tese pode ser formulada por meio da relação entre simetria e objetividade. Uma simetria indica que certas transformações podem ser realizadas sem alterar o conteúdo físico relevante. Ao mudar o referencial, alteram-se valores coordenados, medidas particulares e

descrições perspectivais. No entanto, certas relações permanecem. Essas relações invariantes são candidatas privilegiadas à objetividade porque não dependem de uma escolha arbitrária de coordenadas ou de um ponto de vista particular. Nesse sentido, as simetrias não são apenas ferramentas matemáticas, mas funcionam como critério para distinguir o que pertence à representação adotada e o que pertence à estrutura física descrita.

Esse ponto é particularmente importante para a relatividade. Leituras de relógio e medidas de comprimento em referenciais particulares não devem ser consideradas irreais. Elas são resultados físicos efetivos, obtidos por instrumentos reais, em circunstâncias determinadas. Mas essas quantidades dependem do referencial. O intervalo espaço-temporal entre eventos, ao contrário, não depende da escolha de coordenadas e por isso desempenha papel ontológico mais fundamental. A realidade relativística não está no valor isolado atribuído por um observador, mas na estrutura de transformações que permite relacionar de modo objetivo os diferentes valores possíveis. Em *The Meaning of Relativity* (Einstein, 2003), Einstein descreve o intervalo espaço-temporal como uma grandeza “diretamente mensurável” por réguas e relógios ideais, e afirma que ele é um “invariante unicamente determinado” para dois eventos vizinhos no contínuo quadridimensional.

Na mesma obra, ao apresentar a formulação tetradimensional de Minkowski, Einstein afirma que a teoria dos invariantes do contínuo quadridimensional dos fenômenos físicos torna-se análoga à teoria dos invariantes do espaço euclidiano. Em seguida, ao definir quadrivetores e tensores, ele fala explicitamente em suas relações de realidade e propriedades de realidade.

O próprio Einstein expressa essa orientação quando insiste na necessidade de compreender o significado físico de coordenadas espaciais e temporais. A interpretação física das coordenadas pressupõe corpos de referência, réguas e relógios, mas esses elementos não são absolutos, mas sim idealizações introduzidas para articular a descrição dos eventos. A relatividade, portanto, não se limita a registrar procedimentos de medição mas reconstrói a estrutura na qual tais procedimentos podem ser comparados e conectados.

Aquilo que, a princípio, poderia parecer um antirrealismo, pode ser elucidado através de uma análise sobre o que o próprio Einstein pensava sobre a questão. Einstein (2019, p.58) diz:

“Era preciso compreender o significado exato, na física, das coordenadas espaciais e do tempo de fixação de um acontecimento. A interpretação física das coordenadas espaciais pressupunha um corpo rígido como referência, o qual deveria estar em estado de movimento mais ou menos definido (sistema de inércia). Em um dado sistema de inércia, as coordenadas denotam os resultados de certas medidas feitas com uma barra graduada rígida (estacionária). Devemos ter em mente o fato de que o pressuposto da existência, em tese, das barras rígidas é sugerido pela experiência aproximada, mas, em princípio, arbitrária.”

Essa reconstrução tem consequências ontológicas. Distâncias espaciais e intervalos temporais, considerados separadamente, podem variar conforme o referencial. O intervalo espaço-temporal, porém, combina essas dimensões em uma estrutura que permanece independente das circunstâncias particulares do observador. Assim, a relatividade não elimina fatos físicos objetivos, porém redefine quais fatos têm estatuto objetivo fundamental. A objetividade desloca-se de grandezas absolutas isoladas para relações invariantes entre eventos.

Arthur Fine (1986) interpreta o realismo de Einstein como algo internalizado à própria estrutura da teoria. Segundo ele, o realismo einsteiniano não deve ser entendido apenas como uma tese epistemológica abstrata sobre a correspondência entre ciência e mundo, mas como um conjunto de exigências sobre a forma de uma teoria fundamental satisfatória, pois ela deve falar de objetos independentes da observação, representá-los em um quadro espaço-temporal e exibir leis de caráter determinista. Essa leitura reforça a ideia de que Einstein não abandona o realismo, mas o vincula a critérios internos de construção teórica.

Weinert (2007) também contribui para essa interpretação ao destacar que Einstein não compreendia as teorias como simples generalizações empíricas. As teorias científicas envolvem construções conceituais livres, mas essas construções são submetidas a restrições impostas pela experiência e pela estrutura do mundo. Para que as leis da física possam expressar regularidades objetivas da natureza, elas precisam satisfazer certas condições formais e empíricas. Entre essas condições estão o princípio da relatividade, os princípios de simetria e a exigência de covariância.

O princípio da relatividade impõe que nenhum referencial inercial seja considerado privilegiado na formulação das leis fundamentais. A motivação de Einstein pode ser vista já no artigo de 1905, quando ele observa que a eletrodinâmica de Maxwell, tal como então compreendida, produzia assimetrias que não pareciam inerentes aos fenômenos. O exemplo clássico é o da indução eletromagnética: dependendo de se atribuir o movimento ao ímã ou ao condutor, a teoria clássica fornecia narrativas causais diferentes para o mesmo efeito observável. Einstein elimina essa assimetria ao exigir que as leis tenham a mesma forma em todos os referenciais inerciais. Essa exigência não é apenas estética. Ela expressa a recusa de uma estrutura privilegiada que não se manifesta nos fenômenos. Se dois referenciais são fisicamente equivalentes, a teoria não deve atribuir a um deles prioridade ontológica. Nesse sentido, a simetria funciona como restrição à forma admissível das leis e, ao mesmo tempo, como critério de objetividade, já que uma lei fundamental não deve depender de uma escolha arbitrária de referencial.

A covariância aprofunda essa exigência. Em sentido formal, dizer que uma lei é covariante significa que sua forma é preservada sob certo grupo de transformações. Na relatividade restrita, a transformação relevante é a de Lorentz; na relatividade geral, a exigência se amplia para transformações gerais de coordenadas. Uma mudança do sistema de coordenadas K

para K' , desde que realizada por transformações admissíveis, não deve alterar o conteúdo físico da lei. A covariância é, assim, uma forma de invariância estrutural. Contudo, deve-se evitar uma interpretação meramente formal da covariância. Como observa Angel (2014), afirmar simplesmente que as leis da natureza são covariantes de Lorentz pode transformar o princípio da relatividade em uma tese metateórica sobre a forma das equações, esvaziando seu conteúdo físico. A covariância só possui relevância física quando articulada ao princípio da relatividade e à experiência. Não é a matemática, isoladamente, que produz a física, mas sim o princípio físico que exige uma formulação matemática adequada.

Essa distinção é importante porque a covariância, por si só, não basta para garantir conteúdo empírico. Uma teoria pode ser reformulada de modo formalmente covariante sem que isso altere seu conteúdo físico. Por essa razão, a covariância deve ser entendida como condição necessária, mas não suficiente, para a formulação de leis fundamentais. Ela precisa ser combinada com outros critérios, como simplicidade, adequação empírica e capacidade explicativa. Desse modo, a relatividade não é uma consequência mágica de uma forma matemática, mas uma teoria física cuja estrutura formal expressa uma restrição objetiva sobre o mundo.

A discussão com Reichenbach e Carnap permite reforçar esse ponto. Reichenbach interpretou certos aspectos da relatividade, especialmente a sincronização de relógios e a definição de simultaneidade distante, como dependentes de convenções coordenativas (Reichenbach, 1958). Carnap, por sua vez, radicalizou a análise lógica da linguagem científica, tratando teorias como estruturas formais cuja organização depende de regras sintáticas e de escolhas de linguagem (Carnap, 1937). Em seus trabalhos posteriores, essa perspectiva aparece também na noção de escolha entre estruturas linguísticas ou frameworks conceituais (Carnap, 1950). Essas leituras ajudam a esclarecer o papel das convenções na formulação das teorias, mas correm o risco de reduzir diferenças físicas substantivas a diferenças de linguagem ou de coordenação conceitual. O problema dessa redução é que ela pode obscurecer o conteúdo ontológico da relatividade. A teoria de Einstein não apenas escolhe uma linguagem mais conveniente para descrever os mesmos fatos newtonianos. Ela altera a estrutura física atribuída ao mundo, pois modifica a noção de simultaneidade, transforma a relação entre espaço e tempo, redefine a causalidade relativística e substitui o espaço e o tempo absolutos por uma estrutura espaço-temporal dotada de métrica própria. Assim, uma leitura puramente metateórica ou linguística perde de vista a dimensão física da teoria.

Esse ponto pode ser relacionado a discussão de Meadows (2023) sobre equivalência teórica. Mesmo quando duas teorias são formalmente traduzíveis ou metateoricamente equivalentes, isso não garante que preservem o mesmo conteúdo epistêmico ou ontológico. No caso da relatividade, uma possível tradução formal entre estruturas teóricas não elimina a diferença quanto ao modo como cada teoria representa o mundo físico. A equivalência formal não basta para concluir que duas teorias dizem a mesma coisa sobre a realidade.

Por isso, a comparação entre Einstein e Poincaré não pode ser resolvida apenas por equivalência empírica ou por tradutibilidade matemática. Poincaré conservava, ainda que de modo metodologicamente sofisticado, elementos que a teoria de Einstein torna dispensáveis. Einstein não apenas reorganiza equações, mas modifica o critério de realidade física. O que conta como real não é o que pertence a um referencial privilegiado, mas o que permanece invariável através da pluralidade de referenciais admissíveis.

Essa posição se aproxima de uma forma de realismo crítico. Einstein não defende que as teorias sejam espelhos diretos da realidade. Ele reconhece o papel livre e construtivo dos conceitos científicos. Mas também não aceita que muitas representações incompatíveis do mundo sejam igualmente satisfatórias. A estrutura do mundo, combinada com restrições empíricas e teóricas, limita fortemente as teorias admissíveis. A ciência, nesse sentido, é uma síntese entre construção racional e resistência objetiva da realidade. O realismo de Einstein, portanto, não deve ser identificado com um realismo ingênuo de objetos e propriedades absolutas. Ele envolve objetos, campos e estruturas espaço-temporais, mas esses elementos só adquirem estatuto físico adequado quando inseridos em uma rede de relações governada por leis invariantes. Os *relata* da teoria podem incluir referenciais, corpos, campos e eventos e as relações são expressas por leis, simetrias e transformações. O núcleo realista está na estrutura que permanece estável e que permite articular diferentes descrições em uma teoria coerente.

Uma objeção poderia aduzir que a relatividade restrita seria uma teoria de princípios. A distinção einsteiniana entre teorias de princípios e teorias construtivas permite qualificar melhor o estatuto realista da relatividade restrita. A TRR é, segundo o próprio Einstein, uma teoria de princípios, pois ela não parte de um modelo mecânico subjacente, como o éter de Lorentz, mas de restrições gerais, a saber, o princípio da relatividade e a constância da velocidade da luz, das quais se deduzem as transformações admissíveis entre referenciais. Isso não a torna, entretanto, antirrealista. Seu realismo não é construtivo ou mecanicista, mas estrutural, uma vez que a teoria identifica as relações e invariantes que qualquer descrição física deve preservar.

Esse ponto ajuda a compreender a tensão posterior com o EPR. Na relatividade, Einstein aceita que a objetividade possa ser reformulada por meio de princípios gerais e estruturas invariantes, sem recorrer a um mecanismo oculto como o éter. No debate quântico, contudo, ele exige que a teoria forneça mais do que uma estrutura preditiva correta: ela deveria representar estados reais completos dos sistemas individuais. A crítica à mecânica quântica pode ser lida, portanto, como a exigência de que uma teoria de princípios ou estatística seja completada por uma descrição construtiva da realidade física.

Desse modo, a proposta de Einstein contra Poincaré não constitui um antirrealismo. Ela elimina compromissos ontológicos que se tornaram fisicamente ociosos, como o éter enquanto referencial privilegiado, mas preserva a exigência de que a teoria descreva uma

realidade independente da perspectiva particular do observador. A diferença é que essa realidade não é mais concebida como conjunto de propriedades absolutas, mas como estrutura espaço-temporal invariante. A conclusão a ser extraída é que a relatividade restrita reformula, e não abandona, o realismo. O real não é aquilo que aparece do mesmo modo em todas as descrições particulares, mas é aquilo que se conserva através das transformações que relacionam descrições admissíveis. Por isso, o abandono da simultaneidade absoluta não deve ser lido como derrota da objetividade, mas como sua reconstrução em nível mais profundo. A relatividade de Einstein é, nesse sentido, uma teoria realista dos invariantes.

A análise desenvolvida neste capítulo permite identificar o primeiro sentido do realismo einsteiniano que será decisivo para a dissertação. Na relatividade, Einstein não abandona a realidade objetiva ao rejeitar absolutos clássicos como o repouso, o tempo e a simultaneidade absolutos. Ao contrário, ele desloca a objetividade para a estrutura formal e física da teoria, isto é, para relações, princípios e invariantes que permanecem válidos através da pluralidade de referenciais. Esse é o primeiro Einstein examinado aqui: um Einstein capaz de reformular a objetividade sem exigir que todos os elementos da física clássica sejam preservados. Essa conclusão prepara o problema que reaparecerá no debate quântico. Se Einstein pôde abandonar absolutos clássicos na relatividade sem abandonar o realismo, por que, no EPR, ele parece exigir uma noção tão forte de separabilidade e completude dos estados locais? É essa tensão entre o Einstein da objetividade estrutural e o Einstein da separabilidade que orientará os capítulos seguintes.

É importante esclarecer que a presente dissertação não pretende atribuir a Einstein uma doutrina explícita segundo a qual apenas os invariantes seriam reais. Tal formulação seria excessivamente forte. O ponto defendido é mais modesto: a relatividade einsteiniana desloca o critério de objetividade física dos absolutos clássicos tais como tempo absoluto, repouso absoluto e simultaneidade absoluta, para estruturas que permanecem estáveis sob transformações admissíveis e que possuem significado físico no interior da teoria. Nesse sentido, a noção de invariância não é tomada aqui como prova imediata de ontologia, mas como indício filosófico de uma reformulação do realismo, a saber, a realidade objetiva deixa de ser concebida como conjunto de propriedades absolutas e passa a ser compreendida por meio de relações, simetrias e estruturas invariantes. A análise da relatividade mostrou que Einstein não abandona a objetividade ao rejeitar estruturas absolutas, mas a reformula em termos de invariância. O passo seguinte é examinar por que essa leitura não deve ser confundida com epistemologismo, operacionalismo ou convencionalismo.

3 As teorias científicas como explicações do mundo

Este capítulo dialoga com a reconstrução de Angel (2014) acerca das leituras filosóficas da relatividade, mas reorganiza esses debates em função da questão central desta dissertação, isto é, a relatividade deve ser compreendida como uma teoria epistemológica, convencionalista ou como uma reformulação realista da objetividade física em termos de invariantes?

As interpretações filosóficas da relatividade oscilaram entre dois polos. De um lado, leituras empiristas enfatizaram a crítica aos conceitos não observáveis e a centralidade dos procedimentos de medição. De outro, leituras racionalistas ou transcendentalistas destacaram o papel de estruturas conceituais *a priori* na constituição da experiência física. O objetivo deste capítulo não é reconstruir exaustivamente essas tradições, mas mostrar por que nenhuma delas captura inteiramente a posição de Einstein. Examinam-se, assim, interpretações filosóficas da relatividade que poderiam aproximá-la de posições epistemológicas, empiristas, operacionalistas ou convencionalistas. A função dessas leituras no argumento geral é negativa e contrastiva, pois mostra que a relatividade de Einstein não deve ser compreendida como simples abandono da realidade objetiva, nem como mera análise de procedimentos de medição ou convenções linguísticas. Ao contrastar Einstein com Eddington, Lucas, Bridgman, os positivistas lógicos e o convencionalismo, busca-se delimitar a tese central: a relatividade reformula a objetividade física em termos estruturais, sem reduzi-la à experiência subjetiva, à verificação ou à convenção.

3.1 A relatividade e o “*a priori*” na filosofia de Arthur Eddington

A interpretação filosófica da relatividade feita por Arthur Eddington ¹ constitui uma das tentativas mais influentes de compreender a nova física em chave epistemológica. Para Eddington, a relatividade não deveria ser vista apenas como uma teoria empírica sobre o espaço, o tempo e a gravitação, mas como uma transformação na maneira como a mente científica seleciona, organiza e torna inteligível a experiência física. Nesse sentido, sua leitura aproxima-se de uma forma de idealismo epistemológico, uma vez que o mundo físico

¹ A reconstrução aqui apresentada toma como ponto de partida a discussão de Angel (Angel, 2014) sobre a recepção filosófica da relatividade em Eddington, mas reorganiza o problema em função da tese central desta dissertação, qual seja, a distinção entre uma leitura epistemológica da relatividade e uma leitura realista fundada na noção de invariância.

conhecido pela ciência não é simplesmente a realidade em si, mas a realidade tal como estruturada por nossos procedimentos conceituais e observacionais.

Essa posição não equivale a um idealismo subjetivo simples. Eddington não precisa negar que exista uma realidade independente da mente. Sua tese é mais sutil, qual seja, aquilo que a física chama de “mundo físico” é o resultado de uma seleção. A ciência não apreende a totalidade do real, mas apenas aqueles aspectos que podem ser integrados a seus métodos de mensuração, formalização e correlação. Por isso, as leis fundamentais da física não seriam meras generalizações empíricas, mas expressões das condições sob as quais algo pode ser fisicamente conhecido. É nesse contexto que surge a ideia de que certas leis da nova física teriam um caráter *a priori*. Para Eddington, algumas proposições fundamentais da relatividade não seriam refutáveis do mesmo modo que uma generalização empírica ordinária, pois estariam ligadas às próprias condições de construção do objeto físico. Elas não descreveriam simplesmente propriedades últimas da realidade, mas a estrutura do campo de conhecimento selecionado pela física. A lei física, nesse quadro, não é apenas um enunciado sobre o mundo, mas também uma regra de organização do domínio acessível à investigação científica.

O exemplo mais importante é a simultaneidade distante. Na leitura eddingtoniana, a rejeição da simultaneidade absoluta não decorre apenas de uma descoberta empírica sobre o mundo, mas da constatação de que não possuímos um procedimento físico independente para estabelecer, de modo absoluto, a simultaneidade entre eventos separados no espaço. A relatividade, portanto, não eliminaria simplesmente uma propriedade real previamente existente, mas também mostraria que a pretensão de falar sobre simultaneidade absoluta ultrapassa os limites do que pode ser fisicamente determinado. Essa interpretação tem uma vantagem ao revelar que os conceitos físicos não são neutros. Tempo, simultaneidade, distância e movimento não são dados brutos da experiência. Eles dependem de regras de coordenação entre teoria, instrumentos e observação. Nesse ponto, Eddington capta algo importante da revolução relativística uma vez que a física moderna não apenas acrescenta novas leis, mas reformula os próprios conceitos por meio dos quais o mundo é descrito.

No entanto, a leitura de Eddington torna-se problemática quando transforma essa dependência conceitual em uma tese excessivamente epistemológica. Do fato de que a simultaneidade distante exige uma definição operacional não se segue que a relatividade seja apenas uma teoria sobre os limites do conhecimento humano. A relatividade restrita não afirma simplesmente que a simultaneidade absoluta é inobservável, mas propõe uma nova estrutura espaço-temporal na qual a simultaneidade é dependente do referencial e na qual certas grandezas tais como o intervalo espaço-temporal assumem o papel de invariantes objetivos. Essa distinção é decisiva. Uma interpretação puramente epistemológica tende a reduzir a relatividade a uma teoria sobre o que podemos ou não medir. Mas, para a leitura realista defendida nesta dissertação, a relatividade possui conteúdo ontológico já que

modifica a estrutura objetiva atribuída ao espaço-tempo. A eliminação da simultaneidade absoluta não é apenas uma limitação de nossa perspectiva observacional, pois é parte de uma nova compreensão da ordem física dos eventos. O que desaparece não é a realidade, mas uma concepção clássica de realidade fundada em absolutos newtonianos.

A crítica a Eddington pode ser formulada, portanto, no sentido de que ele identifica corretamente o papel constitutivo de certas regras conceituais na física, mas enfraquece demasiadamente o estatuto realista da teoria. Se as leis relativísticas forem tomadas apenas como expressões da forma como selecionamos e organizamos fenômenos, perde-se o ponto central da relatividade einsteiniana, isto é, a teoria não apenas reorganiza a experiência, mas pretende descrever a estrutura do mundo físico de modo independente de referenciais particulares. Essa diferença torna-se clara quando se compara a leitura de Eddington com a noção einsteiniana de invariância. Para Einstein, o abandono de grandezas absolutas não conduz ao subjetivismo. Pelo contrário, conduz à busca daquilo que permanece invariante sob transformações admissíveis. O real não é o que aparece de modo idêntico a cada observador em nível fenomenológico imediato, mas o que conserva sua estrutura através de diferentes descrições coordenadas. Assim, a objetividade não é abandonada, e sim, deslocada para o nível das relações invariantes.

A posição de Eddington pode ser compreendida como uma interpretação neokantiana ou quase transcendental da relatividade já que a física descreveria o mundo tal como constituído por nossas formas científicas de acesso. Essa leitura é filosoficamente relevante porque mostra que a teoria física não é simples cópia do real. Todavia, ela não basta para explicar o realismo estrutural que emerge da relatividade. A teoria de Einstein não se limita a indicar os limites do observável, mas propõe uma nova ontologia físico-matemática, na qual espaço e tempo são unificados em uma estrutura relacional. Desse modo, a leitura eddingtoniana deve ser tratada como uma etapa importante na recepção filosófica da relatividade, mas não como a melhor expressão da posição de Einstein. Ela ajuda a compreender por que a relatividade foi interpretada por alguns autores como uma teoria de caráter epistemológico ou mesmo idealista. Mas a tese central desta dissertação exige ir além. O conteúdo real da teoria não está nos valores dependentes de referencial, mas nos invariantes.

A importância de Eddington para o presente trabalho reside, portanto, em sua capacidade de tornar explícita uma alternativa interpretativa ao realismo. Ele representa a tentativa de ler a relatividade como confirmação de que a física fala primariamente do mundo enquanto conhecido, não do mundo enquanto independente. Ao contrastar essa leitura com a de Einstein, torna-se mais clara a tese que orienta esta dissertação, uma vez que o realismo einsteiniano não é ingênuo nem preso aos absolutos clássicos, mas um realismo de estruturas invariantes.

3.2 O transcendentalismo de J. R. Lucas

A interpretação de J. R. Lucas ², oferece uma segunda tentativa de compreender a relatividade especial em chave apriorística. Diferentemente de Eddington, cujo idealismo epistemológico enfatiza a seleção dos fenômenos pelo aparato cognitivo do físico, Lucas procura reconstruir a relatividade por meio de um argumento transcendental. O ponto de partida não é a experiência sensível isolada, nem uma dedução puramente lógica das leis físicas, mas a pergunta pelas condições que tornam possível uma ciência objetiva compartilhada entre diferentes observadores.

Nesse sentido, Lucas retoma uma inspiração kantiana. O método transcendental não pergunta simplesmente como adquirimos determinado conhecimento a partir da experiência, mas quais pressupostos devem estar em vigor para que tal conhecimento seja possível. Aplicado à relatividade, esse procedimento desloca a discussão para o seguinte ponto: em vez de perguntar apenas se as transformações de Lorentz são confirmadas empiricamente, Lucas pergunta que tipo de estrutura deve ligar diferentes observadores para que suas descrições possam ser traduzidas de maneira racional e mutuamente consistente. A ideia central é que a física exige comunicação intersubjetiva. Observadores diferentes, localizados em regiões distintas e em movimento relativo, precisam ser capazes de atribuir coordenadas a eventos e comparar suas descrições. Se cada observador organizasse o espaço e o tempo de modo inteiramente incomunicável, não haveria ciência comum. Portanto, a existência de uma física objetiva pressupõe regras de transformação que permitam converter uma descrição em outra sem perda do conteúdo físico essencial.

Lucas interpreta as transformações de Lorentz justamente como esse tipo de regra. Elas não seriam apenas fórmulas matemáticas úteis para relacionar medidas feitas em referenciais distintos, e sim condições de possibilidade da tradução entre perspectivas físicas. Cada observador possui sua própria maneira de atribuir posições e tempos aos eventos. Contudo, para que ambos possam falar do mesmo mundo, deve haver uma estrutura comum que conecte essas atribuições. A transformação de Lorentz cumpriria essa função ao estabelecer como as coordenadas de um observador se relacionam às coordenadas de outro. O argumento de Lucas é atraente porque mostra que a relatividade não é apenas uma coleção de resultados empíricos sobre relógios e réguas em movimento. Ela envolve uma reflexão sobre as condições da objetividade física. A teoria só é possível porque há uma relação sistemática entre diferentes perspectivas. A objetividade, nesse quadro, não consiste em retornar a um ponto de vista absoluto, mas em garantir a possibilidade de tradução racional entre pontos de vista igualmente legítimos.

² A exposição de Angel (2014) serve aqui como referência secundária para a interpretação transcendental de Lucas. A presente subseção, contudo, não acompanha sua sequência argumentativa, mas reformula o problema a partir da tensão entre intersubjetividade, tradução entre referenciais e ontologia dos invariantes.

No entanto, essa leitura enfrenta uma dificuldade semelhante àquela encontrada em Eddington. Ao enfatizar demais o caráter transcendental das transformações de Lorentz, Lucas corre o risco de reduzir o conteúdo físico da relatividade a uma condição formal de comunicação entre observadores. Se as transformações forem entendidas apenas como regras de tradução entre linguagens, pode-se perder de vista que elas também expressam uma estrutura física do espaço-tempo. A relatividade não apenas coordena descrições, também afirma algo sobre a geometria objetiva do mundo. Essa distinção é decisiva para a presente dissertação. A interpretação transcendental de Lucas ajuda a compreender por que a relatividade rompe com o absolutismo newtoniano sem cair no subjetivismo. Não há mais um tempo absoluto comum a todos os observadores, mas há regras invariantes que conectam as diferentes descrições. Contudo, essas regras não são meramente convenções linguísticas. Elas têm conteúdo físico, pois codificam a estrutura espaço-temporal dentro da qual os eventos naturais se relacionam. A leitura de Lucas aproxima-se, portanto, de uma concepção relacional da objetividade. O real não é aquilo que pertence a um observador isolado, mas aquilo que pode ser preservado através de transformações entre descrições admissíveis. Nesse ponto, sua interpretação converge parcialmente com o realismo de invariantes defendido nesta dissertação. A diferença é que, enquanto Lucas tende a enfatizar as condições intersubjetivas da descrição científica, a leitura realista aqui proposta insiste que os invariantes não são apenas condições de comunicação, mas traços objetivos da estrutura física do mundo.

Assim, Lucas deve ser tratado como um interlocutor importante, mas não como a última palavra sobre a ontologia da relatividade. Seu transcendentalismo mostra que a objetividade científica depende de regras estruturais que conectam perspectivas distintas. Entretanto, se essas regras forem tomadas apenas como condições de linguagem, a relatividade perde parte de seu alcance ontológico. Para Einstein, a eliminação do referencial absoluto não significa que a física fale apenas de traduções entre observadores, mas significa que a realidade objetiva deve ser procurada na estrutura que permanece invariante sob essas traduções. A crítica principal, portanto, não é que Lucas esteja simplesmente errado. Ao contrário, sua análise esclarece um aspecto fundamental da relatividade, a saber, a objetividade moderna não exige um ponto de vista privilegiado. O problema é que essa objetividade não pode ser reduzida à intersubjetividade. A possibilidade de comunicação entre observadores é importante, mas ela se apoia em uma estrutura física que torna essa comunicação possível. As transformações de Lorentz não são apenas regras de tradução. São expressões matemáticas de uma nova geometria do espaço-tempo.

Dessa forma, a leitura transcendental de Lucas desempenha na dissertação uma função dupla. Primeiro, ela mostra como a relatividade pôde ser interpretada como uma teoria das condições de possibilidade da experiência física objetiva. Segundo, ela permite esclarecer, por contraste, a posição realista que será defendida aqui, na qual os invariantes relativísticos

não são meras exigências formais da comunicação científica, mas elementos centrais de uma ontologia estrutural do espaço-tempo.

3.3 O empirismo radical de Percy Bridgman

A recepção filosófica da relatividade especial favoreceu diversas leituras empiristas. Isso ocorreu porque a teoria de Einstein parecia confirmar a necessidade de submeter conceitos físicos tradicionais a uma análise de seu significado experimental. Noções como tempo, simultaneidade, comprimento e movimento deixavam de ser tratadas como evidências intuitivas e passavam a depender de procedimentos físicos de medição e coordenação. Essa transformação fez com que muitos autores vissem na relatividade uma confirmação do empirismo.

Percy W. Bridgman ³ desenvolveu uma das versões mais radicais dessa leitura. Seu operacionalismo sustenta que o significado de um conceito científico deve ser identificado com as operações por meio das quais esse conceito é aplicado ou medido. Assim, um conceito físico não teria significado independente dos procedimentos experimentais que permitem determiná-lo. A lição da relatividade, para Bridgman, seria justamente que os conceitos tradicionais da física só se tornam legítimos quando especificamos as operações que lhes conferem conteúdo.

Essa interpretação encontra apoio aparente na análise einsteiniana da simultaneidade. Einstein mostra que não basta falar de simultaneidade entre eventos distantes como se houvesse um tempo absoluto imediatamente dado. É preciso indicar um procedimento de sincronização de relógios. A definição por sinais luminosos parece, à primeira vista, confirmar a tese operacionalista, já que o significado físico de “simultâneo” dependeria da operação usada para estabelecer a comparação temporal entre eventos separados no espaço. Contudo, essa leitura deve ser tratada com cautela. Einstein recorre a procedimentos de medição não para reduzir a teoria física a operações, mas para eliminar pressupostos conceituais não justificados e reconstruir a estrutura da teoria em bases mais coerentes. A operação de sincronização não é o fim da análise, sendo, entretanto, o ponto de partida para uma nova cinemática, já que o resultado da relatividade especial não é apenas uma regra de medição, mas uma nova compreensão da estrutura espaço-temporal.

Essa distinção é decisiva. No operacionalismo estrito, o significado de cada conceito seria esgotado por sua operação correspondente. Na relatividade de Einstein, ao contrário, as operações de medição estão inseridas em um sistema teórico mais amplo. Relógios, réguas e sinais luminosos não funcionam isoladamente, uma vez que adquirem sentido dentro de uma teoria que envolve postulados, transformações, simetrias e invariantes. Portanto, a análise

³ Tal narrativa (2014) usa Angel como referência secundária para a interpretação transcendental de Lucas

operacional da simultaneidade não autoriza a conclusão de que toda a teoria seja apenas uma coleção de procedimentos experimentais. O problema do operacionalismo aparece com ainda mais clareza quando se consideram conceitos teóricos como campo, energia, tensor ou espaço-tempo. Em teorias físicas avançadas, muitos conceitos não correspondem diretamente a uma única operação simples de medição. Eles são definidos por seu papel dentro de uma rede teórica, por suas relações com outros conceitos e pelas consequências empíricas que a teoria como um todo permite derivar. Exigir uma operação independente para cada termo teórico seria impor à física uma restrição excessivamente estreita.

Essa dificuldade foi notada pelo próprio Einstein ao criticar Bridgman (Einstein, 1949b). Para que um sistema lógico seja considerado teoria física, não é necessário que cada uma de suas afirmações possa ser interpretada e testada operacionalmente de maneira isolada. O que se exige é que a teoria, como sistema, implique consequências empiricamente testáveis. Essa observação mostra a distância entre Einstein e o operacionalismo estrito. A experiência continua sendo indispensável, mas ela não fornece diretamente o significado de todos os conceitos da teoria. A crítica a Bridgman, portanto, não implica negar o papel da medição na física. O ponto é outro, isto é, medir não é o mesmo que significar. Uma operação pode indicar como aplicar um conceito, mas não esgota sua função teórica. O conceito de campo, por exemplo, pode estar ligado a procedimentos de detecção e mensuração, mas seu significado físico envolve também seu papel dinâmico, sua relação com energia e momento, sua transformação entre referenciais e sua inserção em leis covariantes.

Nesse sentido, Bridgman capta um aspecto real da revolução relativística, mas o absolutiza. Ele percebe que Einstein rompe com conceitos clássicos não examinados e exige que as noções fundamentais da física sejam reconectadas à experiência. Mas transforma essa exigência metodológica em uma tese semântica forte ao fazer a identificação do conceito com a operação. Essa passagem é problemática, porque empobrece a estrutura teórica da física e reduz sua dimensão ontológica. Para os fins desta dissertação, Bridgman desempenha uma função crítica importante. Ele representa a tentação de interpretar a relatividade como uma teoria antirrealista ou puramente operacional. Contudo, essa leitura não faz justiça ao realismo einsteiniano. A relatividade especial não abandona a realidade objetiva, mas substitui absolutos clássicos por estruturas invariantes. As medições de tempo e comprimento podem variar entre referenciais, mas o intervalo espaço-temporal e as leis covariantes expressam um conteúdo físico objetivo. Assim, a análise de Bridgman ajuda a esclarecer o que a posição de Einstein não é. Einstein não é um empirista radical para quem os conceitos físicos se reduzem a operações. Ele também não é um realista ingênuo que conserva noções clássicas sem exame crítico. Sua posição combina crítica operacional dos conceitos herdados com construção teórica livre e compromisso com uma estrutura objetiva do mundo físico. O operacionalismo destaca o momento crítico da relatividade. Já o realismo de invariantes destaca seu momento construtivo e ontológico.

3.4 O empirismo dos positivistas lógicos

O empirismo dos positivistas lógicos representa uma tentativa de interpretar a ciência a partir de critérios semânticos e metodológicos rigorosamente ligados à experiência. Diferentemente do operacionalismo de Bridgman, que procurava vincular o significado de conceitos individuais a operações específicas de medição, o positivismo lógico deslocou o problema para o nível das proposições ou enunciados científicos. A questão central já não era apenas saber qual operação define determinado termo, mas sob que condições uma afirmação teórica pode possuir significado cognitivo. Nesse quadro, uma proposição científica deveria estar conectada, direta ou indiretamente, a condições possíveis de verificação. O significado de um enunciado estaria relacionado ao seu método de confirmação ou teste empírico. Essa orientação parecia oferecer uma leitura atraente da relatividade, pois a teoria de Einstein submetia conceitos tradicionais, como tempo, simultaneidade e comprimento, a uma análise crítica de suas condições físicas de aplicação. A relatividade parecia mostrar que conceitos sem vínculo claro com procedimentos de determinação física deveriam ser abandonados ou reformulados.

No entanto, essa aproximação entre Einstein e o positivismo lógico deve ser feita com cautela. A teoria da relatividade não surgiu como simples aplicação de uma regra verificacionista de significado. Einstein não perguntou apenas quais proposições podiam ser verificadas, mas quais conceitos e princípios permitiam construir uma teoria coerente, simples e universal dos fenômenos eletrodinâmicos e mecânicos. A análise da simultaneidade, por exemplo, não tinha como objetivo reduzir as observações particulares, mas reconstruir a cinemática de modo compatível com o princípio da relatividade e com a constância da velocidade da luz.

O princípio da constância da velocidade da luz ilustra essa diferença. Embora possua consequências empíricas testáveis, ele não pode ser compreendido como mera generalização indutiva de experimentos anteriores. O experimento de Michelson-Morley, por exemplo, teve papel histórico importante, mas não forneceu por si só o conteúdo conceitual da relatividade. O resultado nulo podia ser acomodado por diferentes hipóteses, inclusive pela teoria de Lorentz. A originalidade de Einstein consistiu em transformar a constância da velocidade da luz em postulado estrutural de uma nova teoria do espaço e do tempo. O mesmo vale para o princípio da relatividade. Trata-se de uma afirmação extremamente geral, já que as leis fundamentais da física devem manter a mesma forma em todos os referenciais inerciais. Esse princípio não é uma observação isolada nem uma simples descrição de dados experimentais. Ele funciona como uma restrição formal e física sobre qualquer teoria admissível. Nesse sentido, a experiência não desaparece, mas tampouco determina mecanicamente a teoria. Ela limita, corrige e orienta a construção teórica, sem substituir a dimensão criativa dos princípios.

Essa distinção é decisiva para compreender a diferença entre Einstein e os positivistas

lógicos. O positivismo lógico tende a subordinar o significado teórico à possibilidade de verificação empírica. Einstein, ao contrário, admite que os conceitos fundamentais da física são construções livres do pensamento, desde que submetidas ao controle da experiência e à exigência de coerência sistemática. A teoria física não é deduzida dos dados, mas inventada sob restrições impostas pelos dados. Por isso, não se pode compreender a relatividade como resultado de um empirismo estrito. A própria amplitude dos postulados relativísticos mostra a insuficiência de uma leitura verificacionista. O princípio da relatividade não se limita aos fenômenos já observados mas se estende a todos os processos físicos fundamentais, conhecidos e desconhecidos, desde que formulados em referenciais inerciais. Essa universalidade ultrapassa qualquer base experimental imediata. O que a justifica não é uma enumeração de observações, mas a capacidade do princípio de organizar os fenômenos conhecidos e impor uma estrutura coerente às leis físicas.

Nesse ponto, a relatividade mostra o limite do empirismo lógico. Uma teoria física avançada não é apenas uma coleção de enunciados empíricos. Ela inclui postulados, idealizações, conceitos matemáticos e princípios de simetria que não possuem tradução observacional termo a termo. Seu conteúdo empírico aparece no sistema como um todo, não em cada proposição isolada. Exigir que cada enunciado possua significado por meio de um método direto de verificação empobrece a compreensão da prática científica real. Nesse ponto cabe trazer a discussão de Einstein sobre conceitos (Einstein, 1949b) (tradução nossa):

“Algumas observações adicionais de caráter geral sobre conceitos e [também] sobre a insinuação de que um conceito — por exemplo, o do real — seja algo metafísico (e, portanto, deva ser rejeitado). Uma distinção conceitual básica, pré-requisito necessário para o pensamento científico e pré-científico, é a distinção entre impressões sensoriais (e a recordação delas) por um lado e meras ideias por outro. Não existe uma definição conceitual dessa distinção (exceto por definições circulares, isto é, aquelas que fazem uso oculto do objeto a ser definido). Tampouco se pode afirmar que na base dessa distinção exista um tipo de evidência, como a que subjaz, por exemplo, à distinção entre vermelho e azul. Contudo, essa distinção é necessária para superar o solipsismo. Solução: utilizaremos essa distinção sem nos preocuparmos com a acusação de que, ao fazê-lo, seremos culpados do pecado original metafísico. Consideramos a distinção como uma categoria que utilizamos para melhor nos orientarmos no mundo das sensações imediatas. O sentido e a justificação dessa distinção residem simplesmente nessa conquista. Mas este é apenas o primeiro passo. Representamos as impressões sensoriais como condicionadas por um fator objetivo e por um fator subjetivo. Para essa distinção conceitual também não há justificação lógico-filosófica. Mas, se a rejeitarmos, não escaparemos ao solipsismo. Ela também é o pressuposto de todo tipo de pensamento físico. Aqui também, a única justificação reside em sua

utilidade. Estamos lidando aqui com categorias ou esquemas de pensamento, cuja seleção é, em princípio, inteiramente livre e cuja qualificação só pode ser julgada pelo grau em que seu uso contribui para tornar a totalidade do conteúdo da consciência inteligível. O fator objetivo mencionado acima é a totalidade dos conceitos e relações conceituais considerados independentes da experiência, ou seja, das percepções. Enquanto nos movemos dentro da esfera do pensamento, assim programaticamente fixada, estamos pensando fisicamente. Na medida em que o pensamento físico se justifica, no sentido já indicado, por sua capacidade de apreender experiências intelectualmente, consideramos que ele constitui conhecimento do real.”

Para os fins desta dissertação, o positivismo lógico é importante porque representa uma interpretação possível da revolução relativística: a leitura segundo a qual Einstein teria mostrado que conceitos metafísicos ou não verificáveis devem ser eliminados da ciência. Essa leitura capta algo verdadeiro, isto é, a relatividade realmente submete os conceitos clássicos a uma crítica rigorosa. Mas ela perde o aspecto construtivo e realista da teoria. Einstein não elimina a simultaneidade absoluta apenas por ser inverificável. Assim, a crítica ao positivismo lógico não consiste em negar a importância da experiência. Ao contrário, a experiência continua sendo condição de controle da teoria física. O ponto é que a experiência não fornece, por si só, os princípios fundamentais. Entre os dados experimentais e a formulação teórica há um trabalho conceitual, matemático e criativo. A relatividade é exemplar justamente porque mostra que a objetividade científica pode depender de construções teóricas que ultrapassam o dado imediato. A posição de Einstein, portanto, não coincide com o verificacionismo. A teoria física deve produzir consequências empiricamente testáveis, mas seu significado não se reduz a essas consequências. O realismo einsteiniano exige que a teoria represente uma estrutura objetiva do mundo, ainda que essa estrutura não seja diretamente observável. No caso da relatividade, essa estrutura é identificada não com grandezas absolutas herdadas da física clássica, mas com relações invariantes entre eventos.⁴

3.5 O convencionalismo

O convencionalismo parte da mesma discussão para a apresentação das leituras de Poincaré, Reichenbach e Grünbaum. A presente subseção, contudo, reorganiza o problema em função da tese central desta dissertação: a distinção entre convenções coordenativas e conteúdo ontológico da estrutura relativística constitui outra tentativa de interpretar o significado filosófico da relatividade. Seu ponto de partida é a ideia de que certas estruturas

⁴ O debate usa (Angel, 2014) como referência sobre a recepção filosófica da relatividade. A presente reconstrução, contudo, desloca o problema para a tensão entre verificacionismo, construção teórica e realismo de invariantes, sem seguir a sequência expositiva daquele autor

empregadas pela ciência não são simplesmente descobertas na experiência, mas escolhidas como formas de organizar os fenômenos. Conceitos como geometria, simultaneidade, sistema de coordenadas e métrica podem envolver decisões convencionais, isto é, escolhas conceituais que permitem articular a descrição científica do mundo. A questão filosófica central é determinar até que ponto essas escolhas afetam o conteúdo físico da teoria.

No contexto da relatividade, o convencionalismo tornou-se especialmente relevante porque a teoria de Einstein questionou a evidência intuitiva da simultaneidade absoluta. Se eventos distantes não podem ser comparados temporalmente sem uma regra de sincronização, então parece haver um elemento convencional na definição de simultaneidade. Essa conclusão aproximou a relatividade de discussões já presentes em Poincaré, para quem a escolha de certas estruturas geométricas ou temporais poderia ser guiada por critérios de simplicidade, conveniência e economia teórica. Poincaré havia defendido que a geometria aplicada à física não é simplesmente imposta pela experiência. Diante de diferentes sistemas geométricos possíveis, poderíamos preservar uma geometria e ajustar outras partes da física para acomodar os fenômenos. A escolha de uma geometria dependeria, então, de sua simplicidade e conveniência na organização da experiência. Essa tese abre espaço para uma leitura convencionalista da física já que alguns princípios não seriam fatos brutos sobre o mundo, mas decisões estruturantes adotadas para tornar possível uma descrição sistemática dos fenômenos.

Essa perspectiva ajuda a explicar a diferença entre Poincaré e Einstein. Poincaré reconheceu a importância do princípio da relatividade, da sincronização por sinais luminosos e das transformações de Lorentz. No entanto, sua orientação convencionalista permitia preservar uma distância entre a formulação matemática da teoria e uma ontologia física plenamente reformulada. Einstein, ao contrário, transformou a análise da simultaneidade em ponto de partida para uma nova concepção física do espaço e do tempo. A relatividade restrita não é apenas uma escolha conveniente de linguagem, mas modifica o que deve ser entendido como estrutura objetiva do mundo.

Reichenbach (2012) oferece uma versão mais refinada do convencionalismo. Para ele, certas convenções são necessárias para coordenar conceitos teóricos com a experiência. A sincronização de relógios, por exemplo, dependeria de uma regra de coordenação, pois não haveria acesso direto a uma velocidade unidirecional da luz sem pressupor algum procedimento prévio de sincronização. Nesse sentido, a simultaneidade distante envolveria um elemento convencional. Contudo, esse elemento não torna toda a teoria arbitrária. Uma vez fixadas as convenções coordenativas, a teoria continua sujeita ao controle empírico e a restrições físicas. A força dessa leitura está em mostrar que a física não opera com dados puros. A experiência precisa ser organizada por conceitos, regras de coordenação e estruturas matemáticas. No entanto, o limite do convencionalismo aparece quando se passa da existência de elementos convencionais para a tese mais forte de que teorias empiricamente

equivalentes seriam apenas modos diferentes de dizer a mesma coisa. A relatividade de Einstein não pode ser reduzida a uma nova convenção linguística para descrever os mesmos fatos clássicos.

A crítica de Einstein a Reichenbach (Einstein, 1949b) mostra que sua posição não pode ser reduzida nem ao positivismo lógico nem ao convencionalismo puro. Contra Reichenbach, Einstein recusa a tese de que o significado dos conceitos físicos possa ser estabelecido por verificação isolada. Conceitos como distância, geometria e corpo rígido só adquirem função determinada no interior de um sistema teórico mais amplo. Contra Poincaré, porém, Einstein também rejeita a ideia de que a escolha da geometria seja mera convenção arbitrária, uma vez que o critério decisivo não é a simplicidade da geometria considerada isoladamente, mas a simplicidade e coerência da física como um todo. Desse modo, a relatividade não abandona a objetividade física, mas reformula seus critérios. A objetividade não reside em elementos imediatamente dados pela experiência, mas em estruturas conceituais capazes de organizar a experiência de modo sistemático, simples e teoricamente fecundo. Esse ponto é importante porque a presença de convenções não elimina o conteúdo ontológico de uma teoria. Toda teoria física utiliza escolhas representacionais: coordenadas, sistemas de unidades, idealizações, definições operacionais e estruturas matemáticas. Mas nem todas essas escolhas têm o mesmo estatuto. Algumas são meramente expressivas, enquanto outras revelam compromissos físicos profundos. A escolha de coordenadas pode ser convencional, mas a existência de relações invariantes entre eventos não é uma simples convenção. É precisamente aí que a relatividade preserva seu conteúdo realista.

Grünbaum (Angel, 2014) radicaliza a discussão ao defender que certas estruturas, como a métrica do espaço ou a simultaneidade distante, não possuem determinação factual independente das convenções adotadas. Seu convencionalismo procura evitar uma base puramente epistemológica e desloca a questão para a própria natureza dos objetos envolvidos. Em certos casos, não haveria fato físico adicional que determinasse uma escolha única. A convenção não surgiria apenas por limitação de nosso conhecimento, mas porque a realidade, em determinados aspectos, não fixaria uma alternativa privilegiada. Essa posição é filosoficamente relevante, mas também problemática. Se for aplicada de maneira ampla demais, ela pode enfraquecer a diferença entre escolhas representacionais e compromissos físicos efetivos. A relatividade não exige que tratemos todas as formulações equivalentes como ontologicamente idênticas. Uma teoria pode ser matematicamente reescrita em diferentes linguagens sem que todas as interpretações físicas associadas a essas linguagens tenham o mesmo conteúdo ontológico. A diferença entre Einstein e Poincaré mostra justamente isso já que a proximidade formal não elimina a diferença conceitual sobre o estatuto do éter, do referencial privilegiado e da estrutura espaço-temporal.

A simultaneidade distante é o caso mais delicado. É correto dizer que a definição einsteiniana envolve uma regra de sincronização. Mas isso não significa que a teoria da

relatividade seja apenas uma convenção sobre relógios. A regra de sincronização faz parte de uma estrutura mais ampla que inclui os dois postulados da relatividade, as transformações de Lorentz, a invariância da velocidade da luz e a reformulação das relações entre espaço e tempo. A convenção local de coordenação não esgota o conteúdo físico da teoria. Dessa forma, o convencionalismo ajuda a esclarecer um aspecto importante da relatividade: os conceitos físicos não são simplesmente lidos da natureza. Eles são introduzidos, ajustados e coordenados dentro de sistemas teóricos. Contudo, a conclusão convencionalista não deve ser exagerada. Einstein aceita a liberdade conceitual da teoria, mas não a arbitrariedade. As construções teóricas precisam ser julgadas por sua capacidade de unificar fenômenos, eliminar assimetrias artificiais, preservar invariantes e representar uma estrutura objetiva independente de perspectivas particulares.

Assim, a diferença entre Einstein e o convencionalismo não está em negar que haja convenções na ciência. Einstein reconhece o papel de definições, idealizações e escolhas conceituais. A diferença está no fato de que essas escolhas não esgotam a teoria. Elas são instrumentos para acessar uma estrutura física que resiste à arbitrariedade da descrição.

3.6 Teorias físicas e simplicidade

A simplicidade ocupa papel importante na escolha entre teorias físicas, contudo, seu estatuto filosófico é ambíguo. Uma teoria mais simples pode ser preferível por postular menos entidades, por utilizar menos hipóteses auxiliares, por unificar fenômenos antes dispersos ou por expressar as leis de modo mais simétrico. No entanto, simplicidade não é, por si só, garantia de verdade. Uma teoria pode ser mais simples e, ainda assim, falsa, como, do mesmo modo, uma teoria mais complexa pode representar melhor a estrutura do mundo. No contexto desta dissertação, a questão da simplicidade surge de maneira específica na comparação entre a relatividade restrita de Einstein e a teoria de Lorentz-Poincaré. Ambas podiam acomodar resultados experimentais importantes e explicar a ausência de detecção do movimento absoluto. A diferença decisiva, portanto, não pode ser formulada apenas em termos de adequação empírica. O problema filosófico é saber se a maior simplicidade da teoria de Einstein possui valor meramente pragmático ou se revela uma diferença mais profunda quanto ao modo como a teoria representa a realidade física.

A resposta defendida aqui é que a simplicidade einsteiniana deve ser entendida em conexão com a invariância. Einstein não apenas elimina uma entidade supérflua, o éter, mas também remove assimetrias explicativas e substitui uma ontologia de estruturas privilegiadas por uma estrutura espaço-temporal relacional. A simplicidade relevante, nesse caso, não é simples economia verbal ou formal, mas expressa uma reorganização da objetividade física.

3.6.1 Simplicidade e subdeterminação: o problema da escolha teórica

A simplicidade torna-se filosoficamente relevante quando os dados empíricos não determinam de maneira única a escolha entre teorias. Se duas formulações são capazes de explicar os mesmos fenômenos observáveis, é necessário recorrer a critérios adicionais para avaliar sua força teórica. Entre esses critérios estão a unidade, a fecundidade explicativa, a ausência de hipóteses *ad hoc*, a coerência formal e a parcimônia ontológica.

Esse ponto aproxima a discussão da tradição associada a Duhem (2014) de que uma teoria física não é testada por hipóteses isoladas, mas por conjuntos articulados de pressupostos, definições, leis, condições auxiliares e regras de aplicação. Quando há conflito entre teoria e experiência, diferentes ajustes podem ser realizados em pontos distintos do sistema teórico. Por isso, a evidência empírica raramente decide sozinha entre teorias rivais. Einstein reconhecia essa dimensão construtiva da teoria física. Para ele, os conceitos fundamentais da física não são simplesmente extraídos da experiência, mas livremente construídos pela razão teórica. A experiência, contudo, permanece como controle indispensável dessas construções. A teoria física é, portanto, simultaneamente livre e constrangida, sendo livre porque seus princípios não são dedutíveis diretamente dos dados e constrangida porque deve ordenar os fenômenos de maneira simples, coerente e empiricamente adequada.

Einstein perguntaria: onde há algum papel para a inteligência criativa do físico teórico se não há espaço para escolha genuína na ciência, se a experiência de alguma forma dita a construção da teoria? As implicações semânticas de um holismo completo são especificadas assim, conforme Einstein (Einstein, 1954, p.226):

“A tarefa suprema do físico é a busca por aquelas leis mais gerais e elementares das quais a imagem do mundo deve ser obtida por pura dedução. Nenhum caminho lógico leva a essas leis elementares; em vez disso, é apenas a intuição que repousa em uma compreensão empática da experiência. Nesse estado de incerteza metodológica, pode-se pensar que arbitrariamente muitos, em si mesmos igualmente justificados sistemas de princípios teóricos eram possíveis, e essa opinião é, em princípio, certamente correta. Mas o desenvolvimento da física mostrou que de todas as construções teóricas concebíveis, uma única, em qualquer momento, provou ser incondicionalmente superior a todas as outras. Ninguém que realmente se aprofundou no assunto negará que, na prática, o mundo das percepções determina o sistema teórico de forma inequívoca, embora nenhum caminho lógico leve das percepções aos princípios básicos da teoria.”

Nesse quadro, a simplicidade não deve ser interpretada como uma regra mecânica de escolha. Ela não oferece um algoritmo capaz de decidir entre teorias. Seu papel é mais sutil, uma vez que ela funciona como critério de inteligibilidade quando uma teoria consegue organizar um campo de fenômenos com menor dependência de hipóteses auxiliares e maior

unidade estrutural. A simplicidade relevante para Einstein não é a mera redução do número de proposições, mas a capacidade de uma teoria revelar uma estrutura mais profunda e mais geral. Conforme (Einstein, 1949b, p.678):

“Contrariando a sugestão de Poincaré, cabe ressaltar que o que realmente importa não é apenas a maior simplicidade possível da geometria em si, mas sim a maior simplicidade possível de toda a física (incluindo a geometria). É isso que, em primeiro lugar, explica por que hoje devemos rejeitar, por considerá-la inadequada, a sugestão de aderir à geometria euclidiana.”

3.7 Einstein contra Poincaré: éter, assimetrias e parcimônia ontológica

A comparação entre Einstein e Poincaré mostra por que a simplicidade não pode ser reduzida a uma preferência estética. A teoria de Lorentz-Poincaré preservava o éter ou, ao menos, uma estrutura privilegiada subjacente. Esse elemento podia ser mantido sem produzir diferenças observáveis diretas. A relatividade restrita de Einstein, ao contrário, eliminava a necessidade de tal estrutura e formulava as leis físicas sem recorrer a um referencial absoluto. A eliminação do éter pode ser entendida como aplicação da parcimônia ontológica, isto é, não se deve multiplicar entidades além da necessidade. Contudo, esse diagnóstico é incompleto. O problema do éter não era apenas ser uma entidade adicional. O problema era que ele introduzia uma assimetria sem correspondência física observável. A teoria atribuiria privilégio a uma estrutura que não desempenhava papel efetivo na formulação das leis nem na produção de consequências empíricas distintas.

Nesse sentido, a superioridade da relatividade restrita não decorre apenas de ter uma ontologia mais enxuta. Ela decorre de uma reorganização da própria cinemática. Einstein substitui a pergunta por um movimento verdadeiro em relação ao éter pela exigência de que as leis da física tenham a mesma forma em todos os referenciais inerciais. Assim, a simplicidade da teoria não consiste apenas em retirar um elemento da ontologia, mas em eliminar uma distinção que deixou de ter função física. Esse ponto permite compreender por que a teoria de Einstein é mais simples em sentido físico e não apenas em sentido psicológico ou pragmático. Ela não apenas parece mais elegante, mas torna desnecessário um aparato conceitual que já não participa da estrutura objetiva dos fenômenos. A simplicidade, nesse caso, está ligada à remoção de uma assimetria artificial e à identificação de uma estrutura mais geral, qual seja, a invariância das leis sob transformações de Lorentz.

Por isso, a escolha por Einstein não deve ser apresentada como uma decisão baseada exclusivamente na Navalha de Ockham. Se fosse apenas uma questão de “menos entes”,

a diferença filosófica entre Einstein e Poincaré seria subestimada. O ponto central é que a relatividade restrita não apenas dispensa o éter, mas modifica o critério de realidade física.

3.8 Simplicidade, invariância e realismo estrutural

A simplicidade relevante para a relatividade restrita está ligada à noção de invariância. Uma teoria é mais simples, nesse contexto, quando expressa as leis físicas sem depender de estruturas privilegiadas, hipóteses compensatórias ou assimetrias que não aparecem nos fenômenos. A simplicidade torna-se, assim, um índice de objetividade, uma vez que quanto menos uma teoria depende de elementos arbitrários de representação, mais claramente ela aponta para a estrutura física que permanece através das diferentes descrições. Isso não significa que toda teoria simples seja verdadeira. Também não significa que a natureza deva ser simples em sentido metafísico absoluto. A simplicidade não é uma prova de realidade. Ela é uma virtude teórica que ganha força quando se articula a outros critérios, tais como adequação empírica, fecundidade explicativa, simetria, covariância e capacidade de unificação.

Essa concepção permite evitar duas leituras extremas. De um lado, não se deve dizer que Einstein escolheu a relatividade apenas por gosto estético ou por preferência subjetiva por fórmulas simples. De outro, não se deve afirmar que a experiência determinou logicamente a teoria. Entre os dados experimentais e a formulação da relatividade há uma construção conceitual guiada por princípios de simplicidade, simetria e invariância. Desse modo, a simplicidade possui função propriamente filosófica na presente dissertação. Ela ajuda a explicar por que a relatividade restrita pode ser vista como uma teoria realista, apesar de abandonar elementos tradicionais da ontologia clássica. Einstein rejeita o éter e o tempo absoluto não porque abandone a realidade objetiva, mas porque busca uma descrição mais simples e mais profunda daquilo que permanece físico através das transformações entre referenciais.

A convicção de Einstein de que o físico teórico deve confiar na simplicidade é que seu trabalho estava se movendo firmemente para domínios cada vez mais distantes do contato direto com a observação e o experimento. Em 1950, declarou (tradução nossa) (Einstein, 1950, p.13):

“Qual garantia há para confiar assim na simplicidade? Na melhor das hipóteses, pode-se fazer um tipo de meta-indução. Que a totalidade de toda experiência sensorial pode ser compreendida com base em um sistema conceitual construído em premissas de grande simplicidade será ridicularizado pelos céticos como um credo milagroso, mas, Einstein acrescenta, é um credo milagroso que foi confirmado em uma extensão surpreendente pelo desenvolvimento da ciência. O

sucesso das teorias físicas anteriores justifica a nossa confiança de que a natureza é a realização do mais simples que é matematicamente concebível.”

Mas, apesar de toda a fé de Einstein na simplicidade, ele não conseguiu dar uma caracterização precisa e formal de como avaliamos a simplicidade de uma teoria. Einstein continua impressionado com o fato de que presumivelmente os líderes da comunidade científica relevante tendem a concordar em seus julgamentos de simplicidade. Em 1946, ele escreveu sobre a perspectiva da simplicidade afirmando (Schilpp, 1979, p. 21-23):

“Este ponto de vista, cuja formulação exata encontra grandes dificuldades, desempenhou um papel importante na seleção e avaliação de teorias desde tempos imemoriais. O problema aqui não é simplesmente um de um tipo de enumeração das premissas logicamente independentes (se algo assim fosse possível sem ambiguidade), mas um de um tipo de ponderação recíproca de qualidades incommensuráveis.... Não tentarei desculpar a falta de precisão [dessas] afirmações... com base no espaço insuficiente à minha disposição; devo confessar aqui que não posso neste momento, e talvez nem um pouco, substituir essas dicas por definições mais precisas. Acredito, no entanto, que uma formulação mais precisa seria possível. Em todo caso, verifica-se que, entre os oráculos, geralmente há concordância no julgamento da “perfeição interna” das teorias e ainda mais no que diz respeito ao grau de confirmação externa.”

A crítica às leituras epistemológicas, operacionalistas e convencionalistas permite concluir que a relatividade não deve ser entendida como uma simples economia de linguagem, nem como uma reorganização meramente formal de dados empíricos. Ao abandonar o espaço e o tempo absolutos, Einstein não abandona a pretensão de descrever uma realidade objetiva; ao contrário, desloca o critério de objetividade para estruturas invariantes ou covariantes, preservadas através das diferentes descrições admissíveis. Essa conclusão, contudo, não encerra o problema da realidade objetiva. Ela apenas o desloca para um novo terreno. A mecânica quântica colocará em questão não apenas a existência de grandezas absolutas, mas a própria possibilidade de atribuir propriedades definidas a sistemas físicos independentemente das condições experimentais de sua determinação. Se, na relatividade, a objetividade pôde ser reconstruída por meio de invariantes espaço-temporais, na mecânica quântica o problema se torna mais profundo: trata-se de saber se o formalismo descreve uma realidade física independente da observação ou apenas fornece regras para prever resultados de medição.

O próximo capítulo examina precisamente essa mudança de cenário. A passagem da relatividade à mecânica quântica não representa apenas a passagem de uma teoria física a outra, mas a passagem de uma crise dos absolutos clássicos para uma crise da própria

separabilidade e da atribuição de propriedades aos sistemas individuais. É nesse contexto que o debate entre Einstein e Bohr se tornará decisivo para a questão central desta dissertação.

4 A Mecânica Quântica

O capítulo anterior mostrou como a relatividade pode ser interpretada como uma reformulação realista da objetividade física. A mecânica quântica introduz um desafio diferente. O problema já não é apenas abandonar grandezas absolutas dependentes de uma estrutura clássica de espaço e tempo, mas decidir se propriedades físicas podem ser atribuídas aos sistemas independentemente das condições experimentais de sua determinação. É nesse ponto que começa a se formar o segundo polo da tensão examinada nesta dissertação: o Einstein que, diante da mecânica quântica, exige que uma teoria completa represente estados reais de sistemas individuais e separáveis.

O objetivo deste capítulo não é oferecer uma história completa da mecânica quântica, mas reconstruir os elementos que tornaram problemática a concepção einsteiniana de realidade objetiva. A exposição histórica será orientada por uma questão filosófica específica: em que medida a teoria quântica, especialmente nas interpretações associadas a Bohr e Heisenberg, desloca a objetividade física do estado independente do sistema para o fenômeno experimentalmente definido? Essa reconstrução prepara a análise do EPR e de Bell, nos quais a tensão entre realismo, localidade e separabilidade se torna explícita.

4.1 Histórico

Em *Quantum* (Kumar, 2008), Manjit Kumar nos traz os antecedentes da revolução quântica, conforme o resumo a seguir.

Todos os corpos aquecidos emitem radiação eletromagnética cuja distribuição espectral depende da temperatura. À medida que a temperatura aumenta, o pico da emissão desloca-se para comprimentos de onda menores, o que explica a mudança de cor observada em objetos aquecidos, por exemplo, um metal que passa do vermelho escuro ao branco intenso. A investigação experimental da luz revelou gradualmente que o espectro visível constitui apenas uma pequena parte da radiação eletromagnética. Em 1666, Isaac Newton demonstrou que a luz branca pode ser decomposta em diferentes cores por um prisma. No início do século XIX, William Herschel identificou a radiação infravermelha e Johann Wilhelm Ritter descobriu a radiação ultravioleta, ampliando o conceito de espectro. Em 1859, Gustav Kirchhoff introduziu o conceito ideal de corpo negro, um sistema que absorve perfeitamente toda radiação incidente e cuja emissão depende apenas da temperatura. O problema central passou a ser encontrar uma lei matemática que descrevesse a distribuição espectral da energia emitida.

Após décadas de dificuldades experimentais, Max Planck propôs em 1900 uma fórmula

que reproduzia perfeitamente os dados observados. Para derivá-la, introduziu a hipótese de que a energia trocada entre matéria e radiação ocorre em unidades discretas: sua fórmula ajustava-se quase perfeitamente aos dados experimentais. Em dezembro de 1900, Planck apresentou a derivação teórica dessa lei. Para consegui-lo, recorreu a um modelo estatístico inspirado em Boltzmann, a saber, imaginou as paredes do corpo negro como um conjunto de osciladores harmônicos que emitem e absorvem radiação. Para reproduzir a distribuição observada, Planck foi forçado a assumir que a energia só podia ser trocada em pacotes discretos (quanta) de tamanho $E = h\nu$ (onde ν é a frequência e h uma constante minúscula). Os osciladores só podiam ter energias múltiplas inteiras de $h\nu$ ($0, h\nu, 2h\nu, \dots$).

Essa quantização da energia foi inicialmente vista por Planck como um mero artifício matemático “desesperado” para ajustar a fórmula aos dados, sem significado físico profundo. Seus colegas também não deram grande importância à ideia do *quantum*, já que o foco estava na precisão da nova lei de radiação.

A derivação de Planck não deve ser compreendida, de modo simples, como a formulação inaugural de uma ontologia quântica, nem como a adoção consciente de um instrumentalismo no sentido filosófico posterior. Em 1900, Planck introduziu procedimentos estatísticos e elementos discretos de energia no contexto do problema da radiação do corpo negro, mas isso não significa que tenha defendido imediatamente uma interpretação ontológica forte da descontinuidade energética. Tampouco é adequado descrevê-lo simplesmente como instrumentalista, como se sua hipótese fosse apenas um artifício formal sem qualquer relevância física.

Como observa Taschetto (Taschetto, 2025), a leitura segundo a qual Planck teria inaugurado diretamente a teoria quântica por meio de um postulado de descontinuidade energética precisa ser revista. O episódio deve ser situado no contexto da teoria cinético-probabilística do calor e das estratégias disponíveis para lidar com o problema da radiação do corpo negro. A importância de Planck está menos em ter proposto, já em 1900, uma ontologia quântica plenamente formulada, e mais em ter introduzido uma solução formal e estatística que, posteriormente, permitiria uma reinterpretação mais profunda da relação entre energia, radiação e descontinuidade.

Nesse sentido, a diferença em relação a Einstein torna-se decisiva. Em 1905, Einstein deu um passo interpretativo mais forte ao tratar a própria radiação como composta por unidades discretas de energia. Enquanto em Planck a quantização aparece ligada ao tratamento estatístico dos osciladores e ao problema da distribuição espectral, em Einstein a hipótese dos quanta de luz assume um significado físico mais direto. É por isso que o contraste relevante para esta dissertação não deve ser apresentado como “Planck instrumentalista versus Einstein realista”, mas como uma diferença entre o uso inicial, ainda ambíguo, de elementos discretos na derivação de Planck e a interpretação mais explicitamente física da hipótese

quântica em Einstein ¹.

Em 1905, Einstein propôs que a própria radiação eletromagnética é composta por unidades discretas de energia, os quanta de luz, posteriormente chamados de fótons. Ele aplicou essa ideia ao efeito fotoelétrico, mostrando que diversos resultados experimentais inexplicáveis pela teoria ondulatória clássica se tornam imediatamente compreensíveis se a luz for composta por partículas com energia: a radiação em si é quantizada, formada por pacotes indivisíveis de energia $E = h\nu$, onde ν é a frequência e h a constante de Planck. Einstein chegou a essa conclusão ao analisar a entropia da radiação do corpo negro. Ele mostrou que a dependência da entropia com o volume da radiação era idêntica à de um gás ideal de partículas, uma vez que o comportamento estatístico só fazia sentido se a radiação fosse composta por unidades discretas, como átomos ou moléculas. Assim, ele quantificou diretamente a luz, independentemente da derivação original de Planck.

Aqui emerge claramente a atitude realista que caracterizaria a posição de Einstein no debate posterior com Bohr. Para Einstein, o sucesso explicativo da hipótese dos quanta de luz não era meramente instrumental, mas ele indicava que a radiação possui uma estrutura física objetiva composta por entidades discretas. Essa posição reflete um compromisso com a ideia de que teorias físicas devem descrever uma realidade independente da observação. Enquanto essas discussões ocorriam sobre a natureza da radiação, outro problema fundamental surgia na teoria do átomo.

Em 1911, Ernest Rutherford propôs um modelo nuclear do átomo, no qual quase toda a massa estaria concentrada em um pequeno núcleo positivo, cercado por elétrons em movimento. O modelo, porém, enfrentava uma dificuldade imediata, qual seja, segundo a eletrodinâmica clássica, elétrons acelerados deveriam irradiar energia continuamente, perder estabilidade orbital e colapsar rapidamente no núcleo. Em 1913, Bohr procurou resolver esse problema introduzindo uma hipótese incompatível com a física clássica ao mostrar que os elétrons não poderiam ocupar quaisquer órbitas, mas apenas certas órbitas permitidas, ou estados estacionários, nas quais não irradiariam energia. A radiação seria emitida ou absorvida somente nas transições entre esses estados, em quantidades discretas determinadas pela diferença de energia entre eles. Embora Bohr não aceitasse integralmente a hipótese einsteiniana dos quanta de luz, ele reconheceu que a estabilidade atômica e os espectros discretos exigiam algum tipo de restrição quântica. Assim, ao incorporar o *quantum* de Planck ao modelo nuclear de Rutherford, Bohr inaugurou uma descrição do átomo na qual

¹ A interpretação do papel de Planck em 1900 é controversa. A narrativa ortodoxa frequentemente apresenta Planck como fundador imediato da teoria quântica, em razão da introdução de elementos discretos de energia na derivação da lei da radiação do corpo negro. Contudo, essa leitura foi criticada por Taschetto, que argumenta que Planck não postulou simplesmente a descontinuidade da energia para derivar sua lei e que o episódio deve ser compreendido no contexto da teoria cinético-probabilística do calor. Ver TASCHETTO, Diana. *Rewriting the Quantum "Revolution"*. *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 109, p. 72–88, 2025 (Taschetto, 2025)

a continuidade clássica era substituída, no domínio microscópico, por condições discretas de estabilidade e transição.

Assim, Bohr quantizou as órbitas eletrônicas abandonando a ideia de que um elétron poderia orbitar o núcleo a qualquer distância arbitrária e restringindo-o a um conjunto discreto de órbitas selecionadas.

Bohr leu um artigo de Nicholson, seu antigo colega de Cambridge argumentando que o momento angular de um anel de elétrons só poderia mudar por múltiplos de

$$n \cdot h / 2\pi \quad (4.1)$$

onde n é um inteiro. Para Bohr, era a pista que faltava para sustentar seus estados estacionários.

Quando um elétron salta entre dois níveis de energia, o átomo emite ou absorve um quantum de radiação cuja energia corresponde à diferença entre esses níveis. Havia, como Bohr descobriu, uma característica muito estranha associada ao salto quântico de um elétron. É impossível dizer onde um elétron realmente está durante um salto. A transição entre órbitas, níveis de energia, tem que ocorrer instantaneamente. Caso contrário, à medida que o elétron viajava de uma órbita para outra, ele irradiaria energia continuamente. No átomo de Bohr, um elétron não conseguia ocupar o espaço entre as órbitas.

O modelo de Bohr introduziu um elemento conceitualmente estranho: o salto quântico. Durante a transição entre dois níveis de energia, o elétron não percorre uma trajetória contínua no espaço clássico. Em vez disso, ele parece desaparecer de uma órbita e reaparecer instantaneamente em outra. Esse tipo de comportamento representava um desafio direto à ideia clássica de que os processos físicos possuem descrições espaço-temporais contínuas. Aqui, cabe esclarecer que Einstein considerava esse abandono de uma descrição espaço-temporal contínua profundamente problemático, pois, em sua concepção, a causalidade física exige uma evolução local e contínua que conecte estados sucessivos. O salto quântico, ao introduzir transições descontínuas sem mecanismo intermediário, parecia comprometer esse ideal de explicação causal. Bohr, por outro lado, começou gradualmente a defender que tais dificuldades indicavam os limites das categorias clássicas de descrição. Em vez de buscar uma imagem intuitiva da realidade microscópica, a tarefa da teoria seria apenas estabelecer relações consistentes entre resultados experimentais. Essa divergência metodológica preparou o terreno para o famoso debate Einstein–Bohr que se intensificaria a partir do final da década de 1920.

4.1.1 O formalismo mínimo da mecânica quântica

Antes de examinar a interpretação filosófica da mecânica quântica, é necessário apresentar, ainda que de modo introdutório, alguns elementos de seu formalismo. Sem essa etapa, noções como superposição, função de onda, observável, medição, incerteza, emaranhamento

e colapso correm o risco de aparecer apenas como problemas interpretativos, sem que esteja claro o que, no próprio aparato matemático da teoria, torna esses problemas filosoficamente relevantes.

A exposição a seguir não pretende oferecer uma apresentação técnica completa da mecânica quântica. Seu objetivo é mais delimitado, isto é, introduzir os elementos formais mínimos necessários para compreender o debate entre Einstein e Bohr e, posteriormente, o problema da separabilidade no EPR. Em particular, interessam aqui cinco aspectos: a representação do estado quântico, o princípio de superposição, a regra probabilística de Born, o papel dos observáveis e a dificuldade conceitual introduzida pela medição.

Na formulação padrão, o estado de um sistema quântico é representado por um vetor de estado em um espaço de Hilbert ou, em certos casos, por uma função de onda. Para uma partícula em uma dimensão, a função de onda pode ser escrita como $\psi(x)$, associando a cada posição possível uma amplitude complexa. Diferentemente de uma onda clássica na água ou no ar, essa função não representa diretamente uma oscilação material no espaço físico comum. Seu significado físico é dado pela regra de Born: o módulo quadrado da função de onda, $|\psi(x)|^2$, fornece a densidade de probabilidade de encontrar a partícula em determinada posição, caso uma medição de posição seja realizada.

Esse ponto é decisivo para a interpretação da teoria. A função de onda não atribui, de modo simples, uma posição definida à partícula antes da medição. Ela codifica uma distribuição de amplitudes a partir da qual se obtêm probabilidades para diferentes resultados possíveis. Assim, desde o nível formal, a mecânica quântica introduz uma diferença em relação à imagem clássica de um sistema físico dotado, em cada instante, de propriedades bem definidas e independentes do procedimento de observação.

Outro elemento central é o princípio de superposição. Se ψ_1 e ψ_2 são estados possíveis de um sistema, então uma combinação linear da forma

$$\psi = a\psi_1 + b\psi_2$$

também representa um estado possível, desde que satisfaça as condições matemáticas apropriadas. Isso significa que o sistema pode ser descrito por uma composição de alternativas que, classicamente, pareceriam mutuamente excludentes. Antes da medição, a teoria não exige que o sistema esteja simplesmente em uma das alternativas clássicas. Essa característica será essencial para compreender tanto a complementaridade de Bohr quanto a insatisfação de Einstein com a completude da descrição quântica.

Os observáveis físicos, por sua vez, são representados por operadores. Grandezas como posição, momento e energia não aparecem como propriedades previamente atribuídas ao sistema do mesmo modo que na física clássica, mas como operadores associados a possíveis resultados de medição. Quando o estado do sistema é um autoestado de determinado operador, a medição correspondente produz um resultado definido. Em outros casos, a teoria fornece apenas probabilidades para diferentes resultados possíveis. A incompatibilidade

entre certos observáveis, como posição e momento, é expressa formalmente pela não comutatividade de seus operadores. Essa estrutura matemática está na base do princípio de incerteza de Heisenberg.

A evolução temporal do estado quântico, quando não há medição, é descrita pela equação de Schrödinger. Trata-se de uma evolução determinística e linear da função de onda. O problema interpretativo surge porque a medição parece introduzir outro tipo de processo: em vez de uma evolução contínua e linear, obtém-se um resultado definido entre várias possibilidades. Na formulação ortodoxa, fala-se então em redução ou colapso da função de onda. Essa diferença entre evolução unitária e obtenção de resultados definidos constitui uma das raízes do problema da medição.

Esses elementos formais são suficientes para compreender por que a mecânica quântica gera dificuldades filosóficas profundas. A teoria é extremamente bem-sucedida em prever resultados experimentais, mas não é imediatamente claro que tipo de realidade física a função de onda descreve. Ela representa um estado real do sistema, uma ferramenta de cálculo de probabilidades, uma descrição de nosso conhecimento ou uma estrutura objetiva não clássica? Essa questão atravessará o debate entre Einstein e Bohr. Para Einstein, uma teoria completa deveria descrever estados reais independentes da observação. Para Bohr, a objetividade quântica deve ser compreendida a partir das condições experimentais que tornam possível a aplicação não ambígua dos conceitos físicos.

A apresentação do formalismo, portanto, não é um desvio técnico, mas uma etapa necessária da análise filosófica. É a partir da estrutura formal da teoria (função de onda, superposição, probabilidades, observáveis incompatíveis e medição) que se compreende por que a mecânica quântica desafia a noção clássica de realidade objetiva e por que o argumento EPR se tornará decisivo para Einstein.

4.1.2 Einstein e Bohr

No verão de 1916, Albert Einstein apresentou uma nova análise dos processos de emissão e absorção de luz por átomos, conseguindo uma derivação simples da lei de radiação de Max Planck a partir do modelo atômico de Niels Bohr. Considerando um átomo com dois níveis de energia, Einstein identificou três processos fundamentais de transição eletrônica que seriam emissão espontânea, quando um elétron em estado excitado decai emitindo um quantum de luz; absorção, quando um elétron absorve um quantum e passa para um nível mais alto; e emissão estimulada, quando a presença de um quantum incidente induz um elétron excitado a decair emitindo outro quantum. Ele mostrou ainda que os quanta de luz possuem momento, além de energia. Contudo, sua análise revelou que o instante exato da emissão espontânea e a direção da radiação emitida não podem ser determinados causalmente, mas apenas probabilidades de transição podem ser calculadas. Assim, o comportamento atômico passa a envolver um elemento irredutivelmente probabilístico,

análogo ao decaimento radioativo. Embora tenha introduzido esse formalismo probabilístico, Einstein o considerava provisório, esperando que uma teoria mais completa restaurasse uma descrição causal mais profunda dos processos físicos.

Einstein estava inquieto com essa descoberta do acaso e da probabilidade em ação no coração do átomo quântico. A causalidade parecia estar em risco, embora ele não duvidasse mais da realidade dos quanta ao afirmar (Born *et al.*, 2005, p. 82):

“A absorção e a emissão quânticas de luz podem ser entendidas no sentido do requisito de causalidade completa, ou permaneceria um resíduo estatístico? Devo admitir que aí me falta a coragem das minhas convicções. Mas eu ficaria muito infeliz em renunciar à causalidade completa.”

Um elétron em um átomo excitado cairá para um nível de energia mais baixo, resultando no estado fundamental mais estável do átomo, mas o momento exato da transição é deixado ao acaso. Em 1924, Einstein ainda lutava para aceitar o que havia descoberto (Born *et al.*, 2005, p. 83):

“Acho a ideia bastante intolerável de que um elétron exposto à radiação escolha por livre e espontânea vontade não apenas o momento de saltar, mas também a direção. Nesse caso, eu preferiria ser um sapateiro, ou mesmo um funcionário de uma casa de jogos, do que um físico.”

Enquanto Einstein via nesses resultados um sinal de que a teoria quântica ainda era incompleta, para Niels Bohr tais aspectos não indicavam uma falha provisória da teoria, mas antes uma característica fundamental da descrição quântica dos fenômenos atômicos.

No cerne da abordagem de Bohr estava o princípio da correspondência, formulado inicialmente em 1913 e desenvolvido ao longo da década seguinte. Segundo esse princípio, as previsões da teoria quântica devem aproximar-se das previsões da física clássica no limite em que os números quânticos se tornam muito grandes. Em outras palavras, à medida que aumentamos o número de estados quânticos envolvidos, aproximando-nos das condições macroscópicas, o comportamento descrito pela mecânica quântica converge para o comportamento previsto pela mecânica clássica. O princípio da correspondência funcionava, assim, como uma regra heurística fundamental, uma vez que guiava a construção da teoria quântica ao exigir que qualquer nova descrição dos processos atômicos fosse compatível com os resultados já estabelecidos da física clássica no domínio macroscópico. Dessa forma, Bohr utilizava o princípio como uma ponte conceitual entre o mundo quântico e o clássico, permitindo explorar novas estruturas teóricas sem perder a continuidade com a física conhecida. Chamá-lo de “princípio da correspondência” permitiu-lhe eliminar ideias na escala atômica que, quando extrapoladas, não correspondiam a resultados sabidamente corretos na

física clássica. Desde 1913, o princípio da correspondência ajudou Bohr a transpor a barreira entre o quântico e o clássico.

Na sua palestra (Solvay *et al.*, 1911),² Bohr reconheceu o valor heurístico da hipótese dos quanta de luz, mas afirmou que ela parecia incompatível com fenômenos de interferência e, portanto, era incapaz de explicar plenamente a natureza da radiação. Essa posição refletia o ceticismo dominante entre os físicos quanto à realidade dos quanta de luz propostos por Einstein. A situação mudou em 1923, quando Compton descobriu que raios X, ao colidirem com elétrons quase livres na matéria, são desviados de sua trajetória e emergem com um comprimento de onda maior ³. O chamado efeito Compton. O fenômeno só podia ser explicado supondo que a radiação se comporta como partículas discretas que transferem energia $h\nu$ e o momento correspondente

$$h/\lambda$$

Essa descoberta forneceu forte evidência empírica para a existência dos quanta de luz, reforçando a posição de Einstein. Diante disso, Einstein destacou uma tensão profunda na física da época na qual a teoria ondulatória da luz explicava interferência e difração, enquanto a hipótese quântica era indispensável para fenômenos como o efeito fotoelétrico e o efeito Compton. Assim, a luz parecia possuir um duplo caráter (ondulatório e corpuscular), uma situação conceitualmente desconfortável que os físicos passaram a aceitar como característica fundamental da radiação.

Einstein resumiu eloquentemente a situação para os leitores do *Berliner Tageblatt*: (Pais, 1982)[p. 382]:

“Portanto, agora existem duas teorias da luz, ambas indispensáveis e, como se deve admitir hoje, apesar de vinte anos de tremendo esforço por parte dos físicos teóricos, sem qualquer conexão lógica.”

Esse resultado introduzia uma ruptura potencial com um dos pilares da física clássica, isto é, o ideal de causalidade completa. Por esse ideal entende-se a tese de que todo evento físico é plenamente determinado por condições físicas anteriores, segundo leis que operam localmente no espaço-tempo, sem lacunas explicativas ou elementos irreduzivelmente probabilísticos.⁴ É nesse ponto que começa a emergir a tensão filosófica que caracterizaria o

² Ver a transcrição em: *La théorie du rayonnement et les quanta*, in: Solvay, *Rapports et discussions du premier Conseil de Physique*, Bruxelles, Gauthier-Villars, 1912.

³ “Ser espalhado por elétron” significa que a radiação (por exemplo, raios X ou luz) interage com elétrons na matéria e muda de direção após essa interação; no efeito Compton, o processo é interpretado como uma colisão entre duas partículas: durante essa colisão o fóton atinge o elétron, parte da energia e do momento do fóton é transferida ao elétron; o elétron recua; o fóton continua seu movimento em outra direção

⁴ A noção de causalidade completa desempenha um papel central nas críticas de Einstein à mecânica quântica, estando implícita em sua correspondência com Born e explicitada no argumento EPR (Einstein,

posterior debate entre Einstein e Bohr sobre a natureza da realidade física. Para Einstein, a presença de probabilidades na teoria indicava incompletude descritiva: o formalismo quântico deveria ser entendido como uma teoria estatística que descreve apenas parcialmente os processos físicos subjacentes. Em outras palavras, as probabilidades refletiriam ignorância sobre variáveis físicas mais fundamentais ainda desconhecidas. Essa interpretação preservava o ideal realista e causal da física clássica, segundo o qual os processos físicos possuem propriedades bem definidas independentemente de observação.⁵

Bohr, por sua vez, interpretava o formalismo quântico de maneira radicalmente diferente. Em vez de considerar o caráter probabilístico como um sinal de incompletude, ele o entendia como expressão de uma nova estrutura conceitual exigida pelos fenômenos atômicos. Segundo Bohr, a descrição dos processos quânticos envolve uma limitação fundamental à aplicação simultânea de certos conceitos clássicos, como posição e momento, limitação que ele mais tarde formularia no princípio da complementaridade. Nesse quadro, as probabilidades não refletem simplesmente ignorância acerca de variáveis ocultas, mas fazem parte integrante da própria forma pela qual a natureza pode ser descrita no domínio quântico. A descrição física continua sendo objetiva, mas essa objetividade exige que os resultados experimentais sejam formulados em termos de arranjos experimentais clássicos, dentro dos quais os fenômenos quânticos se manifestam de maneira estatística.⁶

Para Einstein, o objetivo fundamental de uma teoria física é descrever uma realidade independente da observação, cujos elementos possuem propriedades bem definidas e cuja evolução é governada por leis causais.⁷ Nesse sentido, uma teoria que apenas fornece probabilidades para resultados de medição não poderia ser considerada uma descrição completa da realidade física. Bohr, por outro lado, reformulou o próprio conceito de objetividade científica. Em sua interpretação, a tarefa da teoria não é revelar propriedades intrínsecas de sistemas microscópicos independentemente das condições experimentais, mas fornecer uma

Podolsky e Rosen, 1935), onde a completude de uma teoria física é associada à possibilidade de uma descrição causal exaustiva dos processos físicos

⁵ A. Einstein, "Zur Quantentheorie der Strahlung", *Physikalische Zeitschrift* 18 (1917): 121–128 (Einstein, 1916); A. Einstein, carta a Max Born, 4 de dezembro de 1926, em M. Born (ed.), *The Born–Einstein Letters*, Londres: Macmillan, 1971 (Einstein, 2005). A formulação mais sistemática da tese de incompletude da mecânica quântica aparece posteriormente em A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?", *Physical Review* 47 (1935): 777–780 (Einstein; Podolsky; Rosen, 1935)

⁶ Bohr desenvolve essa interpretação em diversos textos fundamentais do período. Ver N. Bohr, "The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory", *Nature* 121 (1928): 580–590 (Bohr *et al.*, 1928); e N. Bohr, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?", *Physical Review* 48 (1935): 696–702, escrito em resposta direta ao argumento EPR (Bohr, 1935)

⁷ Essa concepção é explicitada de forma paradigmática no artigo de Einstein, Podolsky e Rosen (1935) (Einstein; Podolsky; Rosen, 1935), onde a noção de realidade física independente da observação é articulada por meio do critério de elementos de realidade, e também nos escritos posteriores de Einstein, como suas *Autobiographical Notes* (1949) (Einstein, 1949a), nas quais defende que a tarefa da física é fornecer uma descrição objetiva do mundo externo. Ver também sua correspondência com Born, onde expressa repetidamente sua insatisfação com a renúncia à causalidade na mecânica quântica

descrição consistente das regularidades observáveis que emergem em diferentes arranjos experimentais. Assim, enquanto Einstein procurava preservar uma concepção realista forte da realidade física subjacente aos fenômenos, Bohr defendia que a mecânica quântica exigia uma revisão mais profunda das condições sob as quais se pode falar de realidade física no domínio atômico. Essa divergência conceitual estabeleceu o pano de fundo filosófico para as controvérsias posteriores entre ambos, que culminariam no famoso argumento de Einstein, Podolsky e Rosen em 1935 (Einstein; Podolsky; Rosen, 1935) e na resposta de Bohr no mesmo ano.⁸

Em uma formulação (Einstein, 1949b):

“Toda a suposta dificuldade decorre do fato de se postular algo não observável como sendo “real”. (Essa é a resposta do teórico quântico). O que me incomoda nesse tipo de argumentação é a atitude positivista básica, que, do meu ponto de vista, é insustentável e que me parece chegar à mesma conclusão que o princípio de Berkeley, esse est percipi . O “ser” é sempre algo que construímos mentalmente, isto é, algo que postulamos livremente (no sentido lógico). A justificação de tais construções não reside em sua derivação daquilo que nos é dado pelos sentidos. Tal tipo de derivação (no sentido de dedutibilidade lógica) não existe em lugar nenhum, nem mesmo no domínio do pensamento pré-científico. A justificação das construções, que representam a “realidade” para nós, reside unicamente em sua qualidade de tornar inteligível aquilo que nos é sensorialmente dado (o caráter vago desta expressão me é imposto aqui pela minha busca por brevidade).”

E continua:

“Após o que foi dito, o “real” na física deve ser entendido como um tipo de programa ao qual, contudo, não somos obrigados a nos apegar a priori . É improvável que alguém se incline a tentar abandonar esse programa no âmbito do “macroscópico” (localização da marca na tira de papel “real”). Mas o “macroscópico” e o “microscópico” estão tão inter-relacionados que parece impraticável abandonar esse programa apenas no “microscópico”. Tampouco consigo vislumbrar qualquer ocasião, dentro dos fatos observáveis do campo quântico, para fazê-lo, a menos que, de fato, nos apeguemos a priori à tese de que a descrição da natureza pelo esquema estatístico da mecânica quântica é definitiva.”

⁸ Para análises históricas e filosóficas do debate Einstein–Bohr, ver A. Fine, *The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory*, Chicago: University of Chicago Press, 1986 (Fine, 1996); D. Howard, “Einstein on Locality and Separability”, *Studies in History and Philosophy of Science* 16 (1985): 171–201 (Howard, 1985); D. Beller, *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution*, Chicago: University of Chicago Press, 1999 (Beller, 1999)

4.1.3 Desenvolvimentos

De Broglie estendeu a dualidade onda-partícula a toda a matéria, propondo que partículas como elétrons possuem ondas associadas. Em sua hipótese, a cada partícula de momento p corresponde a uma onda de comprimento $\lambda = h/p$, de modo que o comportamento corpuscular e ondulatório não são descrições incompatíveis, mas aspectos complementares de um mesmo fenômeno físico.⁹ Essa hipótese permitiu reinterpretar as órbitas estacionárias do modelo de Bohr como ondas estacionárias associadas ao elétron, que só podem existir quando um número inteiro de comprimentos de onda se ajusta ao perímetro da órbita. Assim, a estabilidade do átomo ganhou uma justificativa física, realizando a fusão entre onda e partícula antecipada por Einstein.

Wolfgang Pauli identificou limitações no modelo atômico de Bohr e formulou, em 1925, o princípio da exclusão, segundo o qual dois elétrons não podem ocupar o mesmo estado quântico em um sistema atômico.¹⁰ Esse princípio forneceu uma explicação para a estrutura das camadas eletrônicas, as propriedades químicas dos elementos, a organização da tabela periódica e a estabilidade característica dos gases nobres. Posteriormente, com o desenvolvimento da mecânica quântica relativística, compreendeu-se que o princípio de exclusão está intimamente ligado ao spin do elétron e, de forma mais geral, à estatística de Fermi–Dirac que rege partículas indistinguíveis de spin semi-inteiro.

Heisenberg abandonou qualquer descrição inobservável, tais como órbitas eletrônicas e construiu uma teoria baseada apenas em grandezas observáveis, como frequências e intensidades espectrais. Essa abordagem levou à mecânica matricial na qual quantidades físicas são representadas por matrizes não comutativas. A introdução dessas novas entidades matemáticas marcou uma mudança decisiva em relação às teorias quânticas anteriores. Enquanto os modelos da chamada “velha teoria quântica”, como o de Bohr e suas extensões, forneciam principalmente regras para calcular frequências espectrais observadas, a mecânica matricial oferecia, pela primeira vez, um esquema dinâmico capaz de descrever a evolução temporal de sistemas microscópicos. Assim, a teoria deixava de ser apenas um conjunto de condições de quantização aplicadas a modelos clássicos e passava a constituir uma estrutura formal autônoma para representar o comportamento do domínio microscópico.

Nessa representação formal, relações fundamentais entre grandezas tais como posição e momento assumem a forma de relações de comutação, que estabelecem a base matemática

⁹ Ver L. de Broglie, “Recherches sur la théorie des quanta”, tese de doutorado, Universidade de Paris, 1924 (Broglie, 1924); para uma análise histórica, ver A. Pais, *Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, 1982, cap. 23 (Pais, 1982)

¹⁰ Um estado quântico pode ser entendido, de forma geral, como a especificação completa das propriedades físicas de um sistema tal como representadas pelo formalismo da mecânica quântica — por exemplo, por meio de um vetor de estado (função de onda) em um espaço de Hilbert. No caso do átomo, isso envolve números quânticos que caracterizam energia, momento angular e outras propriedades dinâmicas. Para uma introdução acessível, ver *Introduction to Quantum Mechanics*, de David J. Griffiths (2018) (Griffiths; Schroeter, 2018), ou *Principles of Quantum Mechanics*, de R. Shankar (1994) (Shankar, 2012)

da nova mecânica. A teoria revelou-se rapidamente capaz de reproduzir com grande precisão os espectros atômicos, sendo aplicada com sucesso ao átomo de hidrogênio e a diversos outros fenômenos espectrais. O desenvolvimento da mecânica quântica não representa apenas a substituição de um formalismo por outro, mas também uma crise no conceito de representação científica. A questão central torna-se então saber se o formalismo quântico deve ser entendido como uma descrição da estrutura da realidade microscópica ou apenas como um instrumento para organizar previsões experimentais.

Inspirado por De Broglie, Schrödinger formulou a mecânica ondulatória, baseada em uma equação de onda que reproduzia corretamente os níveis de energia atômicos sem hipóteses *ad hoc*, tais como a postulação de órbitas estacionárias privilegiadas e as condições de quantização impostas artificialmente às órbitas eletrônicas. As órbitas foram substituídas por orbitais tridimensionais contínuos. Embora matematicamente equivalente à mecânica matricial, Schrödinger interpretou a função de onda como algo fisicamente real, buscando restaurar a continuidade, a causalidade e o determinismo, interpretação que enfrentou sérias dificuldades conceituais e físicas. Em primeiro lugar, muitos fenômenos quânticos, como transições entre níveis de energia ou processos de emissão e absorção de radiação, envolvem mudanças discretas que não se ajustam facilmente à ideia de uma distribuição contínua de carga. Em segundo lugar, a função de onda não está definida no espaço tridimensional ordinário para sistemas com várias partículas, mas em um espaço de configuração de dimensão muito maior, o que dificulta interpretá-la como um campo físico real no espaço-tempo.

Born rejeitou a interpretação realista da função de onda e propôs sua leitura probabilística na qual o quadrado da função de onda fornece a probabilidade de encontrar uma partícula em determinado estado. Assim, a mecânica quântica abandona o determinismo clássico e descreve apenas probabilidades de resultados. Essa interpretação, posteriormente integrada à visão de Born, consolidou a indeterminação como traço fundamental da realidade quântica.

Em dezembro de 1926, Einstein expressou sua crescente inquietação com a rejeição da causalidade e do determinismo em uma carta a Born (Einstein, 1987):

“A mecânica quântica é certamente imponente. Mas uma voz interior me diz que ainda não é a realidade. A teoria diz muito, mas não nos aproxima realmente do segredo do velho. De qualquer forma, estou convencido de que Ele não joga dados.”

4.1.4 O princípio da incerteza e a complementaridade

O princípio da incerteza e a complementaridade ocupam lugar central na formação da interpretação ortodoxa da mecânica quântica. Ambos surgem da crise dos conceitos clássicos diante dos fenômenos atômicos, mas não expressam exatamente a mesma tese

filosófica. Em Heisenberg, a incerteza aparece inicialmente ligada à análise das condições de medição e à limitação da aplicação simultânea de certos conceitos clássicos, como posição e momento. Em Bohr, por sua vez, essa limitação é reinterpretada dentro de uma moldura conceitual mais ampla: a complementaridade entre descrições mutuamente excludentes, mas igualmente necessárias.

A importância filosófica dessa distinção está no fato de que ela permite compreender a passagem de uma leitura operacional da mecânica quântica para uma interpretação mais abrangente da objetividade física. Heisenberg enfatiza o papel do procedimento experimental já que não faz sentido atribuir simultaneamente valores perfeitamente definidos a grandezas cuja determinação exige arranjos de medição incompatíveis. Bohr, contudo, entende que essa limitação não se reduz a uma perturbação mecânica causada pelo aparelho, mas revela uma restrição mais profunda no uso dos conceitos clássicos no domínio quântico.

A relação de incerteza pode ser escrita, em sua forma mais conhecida, como

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}.$$

Essa expressão indica que não é possível preparar ou medir um sistema quântico de tal modo que a posição x e o momento p tenham simultaneamente precisão arbitrária. Quanto mais estreitamente se define a posição, maior se torna a dispersão possível do momento e quanto mais definido o momento, menos localizado espacialmente estará o sistema. Essa relação não deve ser lida apenas como uma deficiência tecnológica dos instrumentos de medida. Ela expressa uma restrição estrutural da própria descrição quântica.

A análise ondulatória ajuda a esclarecer esse ponto. Um estado fortemente localizado pode ser representado como uma superposição de componentes ondulatórios com diferentes comprimentos de onda. Como o momento está relacionado ao comprimento de onda pela expressão de de Broglie,

$$p = \frac{h}{\lambda},$$

Uma maior variedade de comprimentos de onda corresponde a uma maior indeterminação no momento. Inversamente, um estado com comprimento de onda bem definido possui momento mais preciso, mas encontra-se espacialmente mais espalhado. Assim, a incerteza não decorre apenas de interferência externa do aparelho, mas da própria estrutura formal pela qual estados quânticos são representados.

Esse ponto permite distinguir a posição de Heisenberg daquela de Bridgman. O operacionalismo de Bridgman identifica o significado de um conceito científico com as operações mediante as quais esse conceito é aplicado ou medido. Sob essa perspectiva, a crise quântica poderia ser compreendida como exigência de redefinir conceitos como posição, trajetória e momento por meio de procedimentos experimentais específicos. Heisenberg aproxima-

se dessa sensibilidade ao insistir que conceitos físicos só possuem aplicação determinada quando vinculados a arranjos possíveis de medição. No entanto, a posição de Heisenberg não se reduz inteiramente ao operacionalismo de Bridgman. O princípio da incerteza não afirma apenas que o significado de posição e momento depende das operações de medição. Ele mostra que certos pares de grandezas não podem ser integrados simultaneamente em uma única descrição clássica completa. O problema não é apenas semântico, isto é, relativo ao significado dos termos, mas também físico e formal, pois decorre da estrutura matemática da teoria quântica.

Bohr radicaliza essa dificuldade ao formular a noção de complementaridade. Para ele, a mecânica quântica não exige simplesmente a substituição dos conceitos clássicos por novos conceitos operacionais. Ao contrário, os conceitos clássicos continuam indispensáveis para descrever os arranjos experimentais e comunicar os resultados obtidos. O que muda é o modo de aplicação desses conceitos, pois eles não podem mais ser empregados como se descrevessem propriedades completas e independentes de objetos microscópicos considerados isoladamente. A complementaridade afirma que certos modos de descrição são mutuamente excludentes no plano experimental, mas conjuntamente necessários para a compreensão do fenômeno quântico. A descrição ondulatória e a descrição corpuscular não podem ser fundidas em uma única imagem clássica sem contradição. No entanto, cada uma delas é exigida em contextos experimentais distintos. A luz e os elétrons podem manifestar aspectos ondulatórios em certos arranjos e aspectos corpusculares em outros, mas nenhum experimento permite reunir simultaneamente esses aspectos em uma representação clássica única.

A complementaridade, portanto, não deve ser entendida como uma simples afirmação de que os objetos quânticos são ora ondas, ora partículas. A tese de Bohr é mais sutil: “onda” e “partícula” são conceitos clássicos que só adquirem sentido físico em relação a condições experimentais específicas. O fenômeno quântico não é o objeto microscópico considerado separadamente, mas a totalidade formada pelo sistema, pelo arranjo experimental e pelo registro obtido. Nesse quadro, a objetividade não desaparece, mas é deslocada: não reside em propriedades preexistentes atribuíveis ao objeto isolado, e sim na descrição pública e controlável dos fenômenos sob condições bem definidas. Esse deslocamento aproxima Bohr de uma concepção não clássica de objetividade. Enquanto a física clássica pressupunha que o objeto possuía propriedades determinadas independentemente do procedimento de observação, Bohr sustenta que, no domínio quântico, a atribuição de propriedades depende do tipo de interação experimental estabelecida. A posição de um elétron, por exemplo, só pode ser atribuída em um contexto experimental que permita determinar a posição, sendo que o momento, por sua vez, exige outro tipo de arranjo. Não se trata simplesmente de ignorância sobre valores simultaneamente existentes, mas de limitação objetiva do uso conjunto desses conceitos.

Aqui surge a diferença decisiva em relação a Einstein. Para Einstein, uma teoria física completa deveria representar uma realidade independente das condições particulares de observação. Mesmo que a medição desempenhe papel prático indispensável, ela não deveria determinar o que existe. A teoria deveria fornecer uma descrição dos elementos reais do sistema, ainda que tais elementos não fossem diretamente observáveis. A complementaridade, ao contrário, parecia tornar a descrição física inseparável das condições experimentais sob os quais os fenômenos aparecem. Essa divergência mostra que a discussão sobre incerteza e complementaridade não é apenas técnica. Ela diz respeito ao estatuto da realidade física. Se Bohr está correto, a exigência einsteiniana de uma descrição completa e independente do objeto quântico repousa sobre uma extrapolação indevida dos conceitos da física clássica. Se Einstein está correto, a complementaridade transforma uma limitação do formalismo quântico em tese filosófica excessivamente forte sobre a impossibilidade de uma descrição objetiva subjacente.

De acordo com Einstein (tradução nossa) (Einstein, 1949b, p. 674):

“A partir dessas breves observações, perceber-se-á que, para mim, parece um erro permitir que a descrição teórica dependa diretamente de atos de afirmações empíricas, como me parece ser a intenção [por exemplo] do princípio da complementaridade de Bohr, cuja formulação precisa, aliás, não consegui alcançar apesar do grande esforço que lhe dediquei. Do meu ponto de vista, tais afirmações ou medições só podem ocorrer como instâncias especiais, isto é, partes da descrição física, às quais não posso atribuir qualquer posição excepcional acima das demais.”

A crítica principal é que a complementaridade não é propriamente um princípio físico, como uma lei matemática claramente formulada. Também não é um modelo físico, porque não oferece uma estrutura dinâmica ou ontológica nova para explicar os fenômenos quânticos.

Nesse ponto, trazemos a crítica de Beller (Beller, 1999) ao fato de que a complementaridade foi frequentemente apresentada como se fosse consequência inevitável do formalismo quântico. No entanto, há uma diferença entre mostrar que a complementaridade é compatível com a mecânica quântica e demonstrar que é a única interpretação possível. A primeira tese é plausível; a segunda exige argumentos filosóficos adicionais. Essa distinção é central para a presente dissertação. A complementaridade oferece uma resposta poderosa à crise dos conceitos clássicos, pois permite explicar por que descrições como onda e partícula, posição e momento, continuidade e descontinuidade aparecem como necessárias e, ao mesmo tempo, mutuamente limitadas. Mas sua força interpretativa não equivale a uma refutação definitiva do realismo.

A comparação com Bridgman ajuda a esclarecer esse ponto. O operacionalismo poderia sugerir que os conceitos físicos devem ser reduzidos às operações de medição correspondentes. Bohr, porém, não reduz os conceitos clássicos a operações isoladas. Ele insiste que a linguagem clássica é condição de comunicação objetiva dos resultados experimentais. A diferença é que esses conceitos deixam de funcionar como descrição direta de propriedades microscópicas independentes. Assim, Bohr não é simplesmente um operacionalista, já que sua posição é uma tentativa de preservar a objetividade pública da física sem restaurar a ontologia clássica dos objetos quânticos.

Heisenberg, por sua vez, tende a enfatizar mais fortemente a restrição operacional e formal, isto é, aquilo que não pode ser definido por um procedimento possível de medição não deve ser atribuído ao sistema como propriedade física determinada. Bohr desloca o foco para a totalidade do fenômeno experimental. Max Born acrescenta a interpretação probabilística da função de onda. A interpretação de Copenhague resulta, portanto, da convergência instável dessas posições, e não de um sistema filosófico único e perfeitamente homogêneo. A consequência filosófica é que a incerteza e a complementaridade contribuíram para o apelo antirrealista da mecânica quântica, mas não o impuseram de modo lógico. Elas mostraram que a descrição clássica de objetos com propriedades definidas independentemente de qualquer contexto experimental era inadequada. Contudo, a inadequação da ontologia clássica não implica, por si só, a impossibilidade de uma ontologia quântica. O que se torna necessário é reformular o conceito de realidade física.

Para os fins desta dissertação, essa conclusão é decisiva. Na relatividade, Einstein havia mostrado que a objetividade não depende de grandezas absolutas, mas de estruturas invariantes. A pergunta que surge diante da mecânica quântica é se algo análogo pode ser feito no domínio quântico, isto é, se a realidade objetiva pode ser pensada não como coleção de propriedades clássicas individuais, mas como estrutura de correlações, estados e condições invariantes. A complementaridade de Bohr responde negativamente a uma parte dessa questão, ao recusar a descrição independente do objeto quântico, mas não encerra a possibilidade de um realismo estrutural reformulado. Desse modo, o princípio da incerteza e a complementaridade devem ser lidos como momentos decisivos da tensão entre Einstein e Bohr e abrem a questão que orientará os capítulos seguintes: a falência desse realismo clássico significa a derrota do realismo enquanto tal, ou apenas a necessidade de uma nova concepção de realidade objetiva?

4.2 A Conferência Solvay

A reconstrução histórica da Conferência Solvay aqui apresentada se apoia especialmente em Beller (Beller, 1999) e em Bacciagaluppi e Valentini (Bacciagaluppi; Valentini, 2006), mas organiza o episódio em função do problema central desta dissertação: a tensão

entre completude operacional e realidade objetiva.

A quinta Conferência Solvay, realizada em Bruxelas em outubro de 1927, ocupa um lugar central na história filosófica da mecânica quântica. Embora reunisse problemas técnicos ligados ao desenvolvimento recente da teoria, sua importância ultrapassou o plano estritamente matemático. O encontro tornou visível uma questão mais profunda: qual interpretação deveria ser atribuída ao novo formalismo quântico? A mecânica quântica deveria ser entendida como uma descrição completa dos processos microscópicos ou apenas como um esquema de previsão dos resultados observáveis? O debate não opôs simplesmente defensores e opositores da nova teoria. Quase todos os participantes reconheciam o êxito preditivo da mecânica quântica. A divergência dizia respeito ao seu significado físico. De um lado, Bohr, Heisenberg e Born tendiam a compreender o formalismo como uma teoria fechada, na qual a função de onda fornecia tudo o que podia ser fisicamente afirmado sobre o sistema. De outro lado, Einstein, Schrödinger e de Broglie recusavam a ideia de que o sucesso estatístico da teoria bastasse para garantir sua completude ontológica.

Nesse contexto, a intervenção de Louis de Broglie foi especialmente significativa. Sua teoria da onda piloto era uma tentativa de preservar uma imagem mais realista do mundo quântico. Para De Broglie, a partícula não deveria ser eliminada em favor de uma pura descrição probabilística, mas seria guiada por uma onda física real. Ainda que essa proposta não tenha vencido naquele momento, sua presença em Solvay mostra que a interpretação de Copenhague não era a única alternativa conceitualmente disponível. Havia, desde o início, tentativas de conciliar o formalismo quântico com algum tipo de ontologia objetiva.

A posição defendida por Born, Heisenberg e Bohr caminhava em outra direção. A função de onda passava a ser compreendida principalmente como instrumento para calcular probabilidades de resultados experimentais. A mecânica quântica, nesse quadro, não deveria ser julgada pela capacidade de representar trajetórias, propriedades ou estados definidos independentemente da medição. Seu êxito estaria em fornecer regras consistentes para a previsão estatística dos fenômenos observáveis. A afirmação de que a mecânica quântica seria uma teoria “fechada” expressava justamente essa confiança de que seus pressupostos fundamentais não necessitavam de uma complementação realista posterior.

Einstein não rejeitava a eficácia da mecânica quântica. Sua resistência tinha outro alvo, a saber, a pretensão de que uma teoria estatística e contextual pudesse ser considerada uma descrição completa da realidade física. Para ele, a física deveria aspirar a algo mais do que a previsão correta de resultados experimentais. Ela deveria oferecer uma representação inteligível de processos reais, independentes do ato de observação. Por isso, a controvérsia de Solvay não pode ser reduzida a uma disputa sobre cálculos, mas sim à expressão de uma divergência sobre o próprio objetivo da teoria física.

A contribuição de Schrödinger reforçava essa tensão. A mecânica ondulatória permitia uma formulação matematicamente poderosa da nova teoria, mas levantava dificuldades

interpretativas profundas. Se a função de onda fosse tomada como uma onda física ordinária, surgiria o problema do espaço de configuração, isto é, sistemas com mais de uma partícula exigiam uma função definida em um espaço multidimensional abstrato, e não simplesmente no espaço físico tridimensional. Se, por outro lado, a função de onda fosse interpretada apenas probabilisticamente, restava explicar o que, afinal, existia entre uma medição e outra. A questão ontológica permanecia aberta.

Bohr respondeu a esse quadro por meio da complementaridade. Segundo sua interpretação, conceitos como onda e partícula não descrevem propriedades simultaneamente atribuíveis a um objeto microscópico tomado isoladamente. Eles expressam modos distintos e mutuamente exclusivos de descrição, dependentes do arranjo experimental. O fenômeno quântico, para Bohr, não é o objeto isolado, mas o conjunto formado pelo sistema, pelo aparato de medição e pelas condições experimentais sob as quais um resultado pode ser definido e comunicado. Essa posição não deve ser entendida como simples negação da realidade do mundo microscópico. Bohr redefine a objetividade ao deslocá-la da atribuição de propriedades independentes ao sistema isolado para a descrição pública e não ambígua dos fenômenos experimentais. Contudo, essa redefinição deve ser distinguida da redefinição einsteiniana da objetividade na relatividade. Em Einstein, a objetividade é deslocada dos absolutos clássicos para estruturas invariantes ou covariantes, preservando a pretensão de descrever uma estrutura objetiva do mundo físico. Em Bohr, a objetividade é deslocada para as condições experimentais de definição e comunicação dos fenômenos.

Desse modo, o contraste entre Einstein e Bohr não consiste no fato de apenas Bohr redefinir a objetividade. Ambos o fazem. A diferença está no estatuto ontológico preservado por cada redefinição. A redefinição einsteiniana permanece realista em sentido estrutural, pois busca aquilo que é independente de referenciais particulares. A redefinição bohriana é fenomenológica ou contextual, pois recusa a atribuição de propriedades completas ao sistema quântico independentemente do arranjo experimental. Nesse sentido, Bohr não é antirrealista por redefinir a objetividade, mas por enfraquecer a forma forte de realismo pressuposta por Einstein no EPR.

Einstein via nessa estratégia uma renúncia excessiva. Para ele, a necessidade prática de descrever experimentos em linguagem clássica não autorizava concluir que os sistemas quânticos não possuísem propriedades ou estados independentes da medição. O fato de uma teoria não atribuir valores definidos antes da observação poderia indicar uma limitação da teoria, e não uma característica última da realidade. Esse ponto será posteriormente radicalizado no argumento EPR: se é possível prever com certeza uma propriedade de um sistema sem perturbá-lo, então essa propriedade deve corresponder a um elemento de realidade.

A Conferência Solvay, portanto, deve ser compreendida como um momento de estabilização provisória, não como encerramento definitivo do debate. A interpretação que

mais tarde seria sistematizada como ortodoxa ganhou força institucional e retórica, mas não eliminou as alternativas realistas. A análise de Beller é relevante justamente porque questiona a narrativa segundo a qual Bohr teria simplesmente derrotado Einstein de modo conclusivo. Sua crítica mostra que a história da mecânica quântica foi também uma disputa interpretativa, marcada por escolhas conceituais, estratégias argumentativas e reconstruções posteriores da ortodoxia. A complementaridade pode ter oferecido uma interpretação coerente para muitos físicos, mas disso não se segue que fosse a consequência inevitável do formalismo quântico. Desse modo, Solvay é apresentada nesta dissertação como o ponto em que a disputa sobre a mecânica quântica deixa de ser apenas técnica e se torna explicitamente filosófica. A questão decisiva passa a ser: a teoria física deve apenas organizar os resultados possíveis da experiência ou deve representar uma realidade objetiva independente da observação? Essa pergunta atravessa o debate Einstein-Bohr e prepara diretamente o argumento EPR de 1935. Se Solvay mostra o conflito entre completude operacional e realismo ontológico, o EPR transforma esse conflito em argumento formal contra a completude da mecânica quântica.

Nesse sentido, a narrativa tradicional segundo a qual Bohr teria vencido definitivamente Einstein em Solvay deve ser tratada com cautela. Beller enfatiza o caráter retórico e retrospectivo dessa reconstrução histórica, enquanto Bacciagaluppi e Valentini destacam a pluralidade de alternativas interpretativas ainda presentes em 1927.

Cabe citar ainda a resposta de Einstein ao artigo de Bohr intitulado “O Postulado Quântico e o Desenvolvimento Recente da Teoria Atômica”, no qual produziu uma exposição mais refinada e avançada de suas ideias em torno da complementaridade e da mecânica quântica do que havia apresentado antes. Quando foi informado por Schrödinger sobre o artigo, Einstein replicou que (Einstein, 1967, p.31):

“A filosofia tranquilizadora de Heisenberg-Bohr - ou religião? - é tão delicadamente elaborada que, por enquanto, fornece um travesseiro suave para o verdadeiro crente, do qual ele não pode ser despertado facilmente. Então, deixe-o ficar ali.”

A complementaridade, portanto, não encerra o problema do realismo, mas o desloca. A questão passa a ser se a objetividade física deve ser limitada ao fenômeno experimental, como em Bohr, ou se ainda é possível formular uma descrição mais profunda da realidade quântica.

4.3 O artigo EPR

Nesta dissertação, o problema da realidade objetiva designa a questão de saber se as teorias físicas descrevem uma estrutura real independente da observação ou se apenas

fornece instrumentos formais para organizar previsões de resultados experimentais. O percurso anterior permite agora formular explicitamente a tensão central da dissertação. O problema não é simplesmente opor Einstein a Bohr, nem contrastar realismo e antirrealismo de maneira abstrata. O ponto decisivo é que o próprio pensamento de Einstein parece conter duas orientações distintas. Na relatividade, Einstein admite uma profunda reformulação dos conceitos clássicos e desloca a objetividade para estruturas invariantes ou covariantes. No debate quântico, porém, ele exige que uma teoria completa descreva estados reais de sistemas individuais de modo independente da medição e, no caso EPR, de modo compatível com a separabilidade espacial.

É nesse sentido que falaremos em “dois Einsteins”. O primeiro é o Einstein da relatividade, para quem a objetividade não depende da manutenção dos absolutos clássicos. O segundo é o Einstein do EPR, para quem a realidade física parece exigir estados locais completos e independentes. A questão a ser examinada neste capítulo é se essa segunda exigência é compatível com a lição estrutural da relatividade ou se deve ser reformulada diante da não-separabilidade quântica.

A definição de objetividade bohriana adotada nesta dissertação baseia-se principalmente em três textos de Bohr. O primeiro é *The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory* (1928) (Bohr *et al.*, 1928), no qual Bohr formula a complementaridade e insiste na limitação dos conceitos clássicos na descrição dos fenômenos atômicos. O segundo é sua resposta ao artigo EPR, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?* (1935) (Bohr, 1935), na qual ele contesta o critério de realidade de Einstein, Podolsky e Rosen. O terceiro é *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics* (1949) (Bohr, 1996), texto retrospectivo em que Bohr explicita que a descrição quântica exige considerar as condições experimentais completas sob as quais o fenômeno é definido. Com base nesses textos, a objetividade em Bohr será entendida não como a atribuição de propriedades completas a sistemas físicos isolados, mas como a possibilidade de uma descrição pública, comunicável e não ambígua dos fenômenos experimentais. O fenômeno, nesse sentido, não corresponde ao objeto microscópico tomado independentemente do aparato, mas ao conjunto formado pelo sistema, pelas condições experimentais e pelo registro obtido. Por isso, a resposta de Bohr ao EPR não consiste em afirmar uma perturbação mecânica direta do sistema distante, mas em sustentar que a escolha do arranjo experimental modifica as condições que definem os tipos possíveis de previsão e, portanto, os próprios termos em que se pode falar de realidade física.

Já a definição da objetividade em Einstein adotada nesta dissertação baseia-se em quatro conjuntos de textos. O primeiro é o artigo de 1905, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (Einstein *et al.*, 1905), no qual Einstein formula a relatividade restrita a partir do princípio da relatividade e da constância da velocidade da luz, recusando a necessidade de um éter luminífero ou de um espaço absolutamente estacionário. Esse texto é fundamental

porque mostra que Einstein não preserva a objetividade física por meio de estruturas clássicas absolutas, como repouso absoluto, tempo absoluto ou simultaneidade absoluta. Ao contrário, ele reformula a objetividade eliminando estruturas privilegiadas que não desempenham papel físico efetivo na formulação das leis.

O segundo conjunto de textos é composto pelas exposições posteriores da relatividade, especialmente *Relativity: The Special and General Theory* e *The Meaning of Relativity* (Einstein, 2003). Neles, Einstein explicita a importância da estrutura espaço-temporal e das grandezas que permanecem independentes da escolha de referencial. Na relatividade restrita, medidas particulares de tempo, comprimento e simultaneidade podem variar conforme o sistema de coordenadas adotado; contudo, certas relações estruturais, como o intervalo espaço-temporal entre eventos, preservam seu significado físico através das transformações admissíveis. É nesse sentido que se pode falar, nesta dissertação, de uma objetividade relativística ou estrutural: a objetividade não reside em grandezas absolutas isoladas, mas na estrutura que permanece estável entre diferentes descrições fisicamente equivalentes.

O terceiro texto fundamental é o artigo de Einstein, Podolsky e Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*, de 1935 (Einstein; Podolsky; Rosen, 1935). Nele, a noção einsteiniana de realidade objetiva assume uma formulação mais exigente. O artigo afirma que uma teoria física completa deve representar todos os elementos da realidade física e propõe um critério suficiente de realidade: se é possível prever com certeza o valor de uma grandeza física sem perturbar o sistema, então há um elemento de realidade correspondente a essa grandeza. Esse critério mostra que, no contexto do EPR, Einstein vincula objetividade à possibilidade de atribuir propriedades reais aos sistemas independentemente do ato efetivo de medição.

O quarto texto é a *Reply to Criticisms* (Einstein, 1949b), publicada no volume organizado por Schilpp em 1949. Ali, Einstein formula de modo particularmente claro a tensão que interessa a esta dissertação. Diante da mecânica quântica, ele sustenta que o paradoxo obriga a abandonar uma de duas teses: ou a função de onda fornece uma descrição completa do sistema individual, ou os estados reais de objetos espacialmente separados são independentes entre si. Einstein prefere preservar a segunda tese e interpretar a função de onda como descrição incompleta ou estatística. Esse ponto é decisivo porque explicita que, no debate quântico, sua noção de realidade objetiva permanece ligada à independência dos estados reais de sistemas espacialmente separados.

Com base nesses textos, a objetividade em Einstein será entendida em dois sentidos relacionados, mas tensionados. No contexto da relatividade, Einstein reformula a objetividade em termos estruturais: o real não é aquilo que permanece idêntico em toda aparência particular, mas aquilo que se conserva através das transformações entre referenciais admissíveis. No contexto quântico, especialmente no EPR e nos textos posteriores, Einstein exige que uma teoria completa represente estados reais independentes da observação e preserva a

tese de que sistemas espacialmente separados possuem realidades próprias. A tensão entre esses dois sentidos constitui o eixo interpretativo desta dissertação: de um lado, o Einstein da objetividade estrutural; de outro, o Einstein da separabilidade.

Assim, analisaremos o artigo de Einstein, Podolsky e Rosen, publicado em 1935 sob o título *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, que constitui a formulação mais sistemática da objeção de Einstein à completude da mecânica quântica. O problema não era saber se a teoria produzia previsões corretas. Os próprios autores reconheciam que, até então, a mecânica quântica apresentava notável concordância com a experiência. A questão decisiva era outra: uma teoria empiricamente bem-sucedida fornece, por isso mesmo, uma descrição completa da realidade física?

A distinção entre correção empírica e completude ontológica é o ponto de partida do argumento. Uma teoria pode estar correta, no sentido de produzir previsões confirmadas experimentalmente, e ainda assim ser incompleta, caso deixe de representar elementos reais do sistema físico. Para EPR, uma teoria física completa deve conter, em sua estrutura conceitual, uma contraparte para cada elemento da realidade física. Desse modo, a discussão desloca-se da mera adequação empírica para a relação entre formalismo teórico e a realidade objetiva.

Para tornar essa exigência manejável, EPR introduz um critério suficiente de realidade¹¹.

O artigo afirma (tradução nossa) (Einstein; Podolsky; Rosen, 1935, p. 777) :

“Se, sem perturbar de forma alguma um sistema, podemos prever com certeza (isto é, com probabilidade igual à unidade) o valor de uma quantidade física, então existe um elemento da realidade física correspondente a essa quantidade.”

O experimento mental mobiliza duas partículas que interagiram no passado e depois se afastaram espacialmente. Em virtude da correlação estabelecida entre elas, uma medição realizada sobre a partícula *A* permite inferir, com certeza, o valor correspondente de uma grandeza da partícula *B*. Se for medida uma grandeza associada ao momento de *A*, pode-se determinar o momento de *B*; se for medida uma grandeza associada à posição de *A*, pode-se determinar a posição de *B*. O ponto essencial é que *B* não é medida diretamente.

A força do argumento depende da hipótese de separação espacial. Como as partículas *A* e *B* podem estar arbitrariamente distantes, a medição realizada em *A* não deveria produzir uma perturbação física instantânea em *B*. Se, mesmo sem perturbar *B*, é possível prever com certeza o valor de uma grandeza relativa a *B*, então, pelo critério EPR, essa grandeza corresponde a um elemento de realidade de *B*.

¹¹ O artigo foi redigido principalmente por Boris Podolsky, e Einstein posteriormente expressou insatisfação com a forma como o argumento foi apresentado. Ver A. Einstein, “Autobiographical Notes”, em P. A. Schilpp (ed.) (Einstein, 1949a), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Open Court, 1949, p. 85–87

A conclusão pretendida por EPR é que a mecânica quântica não fornece uma descrição completa da realidade física. A razão é que a teoria não atribui simultaneamente valores definidos a certos pares de grandezas, como posição e momento. Contudo, o argumento parece mostrar que, dependendo da medição feita em *A*, seria possível atribuir a *B* elementos de realidade correspondentes a ambas. Se esses elementos existem e não estão representados simultaneamente na função de onda, então a função de onda não é uma descrição completa do estado real do sistema.

O argumento pode ser formulado como um dilema. Ou a medição realizada em *A* influencia instantaneamente a realidade física de *B*, apesar da separação espacial, ou a mecânica quântica é incompleta. Einstein rejeitava a primeira alternativa por considerá-la incompatível com uma concepção local da realidade física. Restaria, então, a segunda, que diz que a função de onda não esgota a descrição do estado real dos sistemas físicos. Essa estrutura mostra que o EPR não é apenas um argumento técnico sobre medição. Ele explicita uma concepção de teoria física. Para Einstein, uma teoria completa deve representar uma realidade objetiva independente da observação e compatível com a separabilidade de sistemas espacialmente distantes. A mecânica quântica, ao atribuir um único estado global ao sistema composto sem fornecer estados locais completos para as partes, parecia violar essa exigência.

A resposta de Bohr (Bohr, 1935), publicada no mesmo ano e com título praticamente idêntico, recusa justamente a separação pressuposta pelo argumento. Bohr não precisava negar a correção formal das inferências probabilísticas feitas por EPR. Sua estratégia foi questionar o modo como EPR empregava os conceitos de realidade, perturbação e sistema físico. Para Bohr, a definição das grandezas atribuíveis a um sistema depende das condições experimentais sob as quais o fenômeno é constituído. O problema, portanto, não seria uma influência mecânica direta sobre *B*, mas a impossibilidade de separar rigidamente o objeto quântico das condições de descrição experimental. Essa resposta revela a distância filosófica entre Bohr e Einstein. Einstein insistia que a realidade física de *B* não deveria depender da escolha do arranjo experimental aplicado a *A*. Bohr, ao contrário, sustentava que a atribuição de grandezas físicas só tem sentido dentro de um contexto experimental determinado. Assim, a divergência entre ambos não reside simplesmente na aceitação ou rejeição de uma fórmula quântica, mas na compreensão do que significa descrever uma realidade física.

O artigo EPR, havia sido escrito por Podolski e, segundo Einstein, o papel fundamental da separabilidade tinha ficado obscurecido no artigo. Einstein queria que o princípio da separação fosse uma característica explícita do argumento EPR e não como apareceu, na última página, como algum tipo de reflexão tardia. Ele queria destacar a incompatibilidade da separabilidade e da completude da mecânica quântica. Ambas não podiam ser verdadeiras. Ele escreveu a Schrödinger sobre o que imaginava (Einstein, 1949a, p.80):

“Que considerasse um barril de pólvora instável que entrasse em combustão

espontânea em algum momento durante o ano seguinte. No início, a função de onda descreve um estado bem definido – um barril de pólvora não detonada. Mas, após um ano, a função de onda descreve uma espécie de mistura de sistemas ainda não detonados e já detonados. Por meio de nenhuma arte de interpretação, esta função de onda pode ser transformada em uma descrição adequada de um estado real de coisas, pois na realidade não há intermediário entre explodido e não explodido. Ou o barril explodiu ou não.”

Tais cartas trocadas com Einstein inspiraram Schrödinger a escrever um ensaio no qual propunha o seguinte experimento ¹².

“Um gato é confinado em uma câmara de aço, junto com o seguinte dispositivo (que deve ser protegido contra interferência direta do gato): em um contador Geiger há uma pequena quantidade de substância radioativa, tão pequena que talvez no decorrer de uma hora um dos átomos decaia, mas também, com igual probabilidade, talvez nenhum; se isso acontecer, o tubo do contador descarrega e, por meio de um relé, libera um martelo que estilhaça um pequeno frasco de ácido cianídrico. Se deixássemos todo esse sistema por si só por uma hora, diríamos que o gato ainda vive se, nesse meio tempo, nenhum átomo decaiu. O primeiro decaimento atômico o teria envenenado. A função de onda de todo o sistema expressaria isso por ter nele o gato vivo e o gato morto misturados ou espalhados em partes iguais”.

De acordo com Schrödinger e o senso comum, o gato está vivo ou morto, dependendo de se houve ou não decaimento radioativo. Mas, de acordo com Bohr e seus seguidores, o reino do subatômico é diferente: como somente um ato de observação pode decidir se houve decaimento ou não, é somente essa observação que determina se o gato está vivo ou morto. Até então, o gato está consignado ao purgatório quântico, uma superposição de estados em que não está nem morto nem vivo.

Einstein ficou encantado (Mehra; Rechenberg, 2000, p.732):

“O gato mostra, disse ele a Schrödinger, que concordamos completamente com relação ao caráter da teoria atual. Uma função de onda que contém um gato vivo e um morto não pode ser considerada como descrevendo um estado real.”

O famoso experimento mental de Schrödinger implica nas seguintes questões filosóficas: A função de onda descreve a realidade? Ou apenas nosso conhecimento? Onde ocorre a

¹² E. Schrödinger, “Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik”, *Naturwissenschaften* 23 (1935): 807–812, 823–828, 844–849, esp. p. 807 (Schrödinger, 1935)

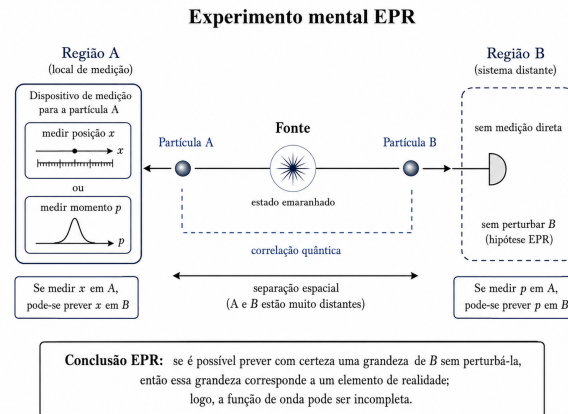


Figura 4.1 – Experimento mental EPR

passagem do quântico ao clássico? O que conta como medição? Esse conceito de medição deve fazer parte do formalismo?

Temos, assim, três premissas:

A função de onda fornece uma descrição completa de um sistema físico, a saber, se for dada ψ , pode-se derivar dela todos os fatos físicos sobre o sistema (Bohr, Heisenberg);

A equação de Schrödinger evolui linearmente;

Gato vivo ou gato morto (começa com um gato e termina com um gato);

Não se pode manter ψ completa, evolução linear e gato vivo ou morto.

Desistir da primeira premissa (Einstein) leva a teorias de variáveis ocultas (potencial quântico) tais como a Mecânica Bohmiana. Desistir da segunda leva a teorias objetivas de colapso (ψ nem sempre evolui linearmente) e desistir da terceira leva a teorias de muitos mundos (termina com dois gatos).

Para os fins desta dissertação, o EPR ocupa uma posição decisiva porque mostra a tensão entre dois aspectos do pensamento de Einstein. De um lado, o Einstein da relatividade havia deslocado a objetividade para estruturas invariantes, abandonando grandezas absolutas como tempo e simultaneidade. De outro, no EPR, Einstein parece exigir uma forma forte de separabilidade em que sistemas espacialmente separados deveriam possuir estados reais próprios e independentes. A questão que se abre é saber se essa exigência é compatível com o próprio realismo estrutural sugerido pela relatividade. O EPR, portanto, prepara o problema central dos capítulos posteriores. Se a função de onda é completa, então a realidade quântica parece ser não separável em sentido forte. Se a separabilidade deve ser preservada, então a função de onda parece incompleta. O debate entre Einstein e Bohr passa, assim, da pergunta sobre a eficácia preditiva da mecânica quântica para a questão mais profunda: que tipo de realidade física pode ser descrita por uma teoria quântica?

4.4 A resposta de Bohr ao EPR: complementaridade e realidade física

A resposta de Bohr ao artigo EPR (1935) constitui um dos momentos mais importantes do debate sobre a completude da mecânica quântica. Einstein, Podolsky e Rosen haviam argumentado que, se é possível prever com certeza o valor de uma grandeza física de um sistema sem perturbá-lo, então deve existir um elemento de realidade correspondente a essa grandeza. No caso de dois sistemas correlacionados e espacialmente separados, uma medição realizada no primeiro sistema permitiria prever com certeza o valor de uma grandeza no segundo. Como não haveria interação física direta com o sistema distante, concluía-se que tal grandeza deveria corresponder a um elemento de realidade já pertencente ao segundo sistema. Se a função de onda não representasse esse elemento, a descrição quântica seria incompleta.

Bohr contesta precisamente essa passagem. Sua objeção não consiste em afirmar que a medição realizada no primeiro sistema produz uma perturbação mecânica direta no segundo. Ao contrário, Bohr reconhece que, no caso EPR, não há perturbação mecânica ordinária do sistema distante. O ponto decisivo é outro, a saber, a escolha do arranjo experimental modifica as condições que definem quais tipos de previsão podem ser feitos a respeito do sistema. Assim, a expressão “sem perturbar o sistema”, central ao critério de realidade de EPR, conteria uma ambiguidade. Se ela significa apenas ausência de interação mecânica direta, então a premissa é aceitável, mas não autoriza a conclusão ontológica desejada por EPR. Se, por outro lado, significa ausência de alteração nas condições que tornam possível a atribuição de uma grandeza física, então a premissa já não se aplica ao caso quântico. A resposta de Bohr deve ser compreendida no quadro de sua noção de complementaridade. Para ele, grandezas como posição e momento não podem ser atribuídas independentemente das condições experimentais que definem sua aplicação. A descrição de um fenômeno quântico exige considerar não apenas o objeto microscópico, mas também o arranjo experimental por meio do qual se torna possível falar, de maneira não ambígua, de determinada grandeza física. Desse modo, a realidade física não é atribuída ao sistema isolado no sentido clássico, mas ao fenômeno total, isto é, à unidade formada pelo sistema, pelo aparato e pelas condições de descrição.

Bacciagaluppi (2014) interpreta a resposta de Bohr de maneira relativamente favorável. Segundo essa leitura, Bohr não teria simplesmente confundido o caso EPR com o experimento de uma partícula passando por uma fenda. A analogia entre os casos estaria na estrutura em duas etapas da medição quântica. Primeiro, o sistema de interesse interage com um sistema auxiliar e, depois, uma medição realizada nesse sistema auxiliar permite selecionar retrospectivamente o tipo de previsão possível sobre o sistema de interesse. No experimento da fenda, o sistema auxiliar é o diafragma; no caso EPR, a outra partícula desempenha papel

análogo. Assim, mesmo sem nova interação mecânica com o sistema de interesse, a escolha de como medir o sistema auxiliar define o tipo de descrição física que pode ser legitimamente construída. Essa reconstrução permite compreender por que Bohr não considera decisiva a separação espacial das partículas no EPR. O problema, para ele, não é saber se há uma influência causal instantânea entre sistemas distantes, mas determinar quais são as condições físicas e conceituais que permitem atribuir uma grandeza ao sistema. O que no EPR se trata como elemento de realidade independente é, para Bohr, inseparável do contexto experimental que define o fenômeno. A resposta bohriana, portanto, atinge diretamente a pressuposição de separabilidade forte, isto é, não se pode atribuir ao sistema distante um conjunto completo de propriedades independentemente das condições experimentais relevantes.

A leitura de Fine (2007), em continuidade com Beller, é mais crítica. Segundo essa interpretação, Bohr desloca a discussão de uma questão ontológica para uma questão semântica. No EPR pergunta-se se há elementos de realidade não representados pela função de onda. Bohr responde redefinindo as condições sob as quais a expressão “realidade física” pode ser usada de modo não ambíguo. Nesse sentido, a resposta de Bohr se aproximaria de uma forma de operacionalismo ou verificacionismo em que propriedades como posição e momento só teriam significado físico no interior de um arranjo experimental capaz de defini-las. Para Fine, essa estratégia não refuta plenamente o desafio realista de Einstein, mas apenas recusa a formulação do problema nos termos exigidos por EPR.

Essa divergência interpretativa é importante para o argumento desta dissertação. De um lado, Bohr oferece uma crítica poderosa à separabilidade forte pressuposta no EPR. Ele mostra que a atribuição de propriedades a sistemas quânticos não pode ser separada das condições de determinação experimental. De outro lado, sua resposta parece limitar a objetividade física ao domínio dos fenômenos experimentalmente definidos, o que a aproxima de uma concepção contextual ou operacional da realidade física. É precisamente nesse ponto que a posição aqui defendida se separa de Bohr.

A presente dissertação aceita a crítica à separabilidade forte, mas não a conclusão não ontológica que pode ser extraída da resposta bohriana. O fato de os estados locais não serem completos independentemente do contexto não implica que a realidade física se reduza ao fenômeno observado. Pode significar, antes, que a realidade quântica possui estrutura global, ou seja, os sistemas, os aparatos e as correlações não são partes ontologicamente autônomas, mas aspectos de uma configuração física mais ampla. Assim, a resposta de Bohr é indispensável porque revela o limite do realismo local clássico, contudo, ela não esgota a possibilidade de um realismo estrutural. Desse modo, a posição defendida nesta dissertação pode ser situada entre Einstein e Bohr. Contra Einstein, reconhece-se que a separabilidade forte pressuposta no EPR não pode ser mantida sem reformulação. Contra Bohr, sustenta-se que essa renúncia não obriga a reduzir a teoria quântica a uma descrição contextual dos fenômenos observáveis. A alternativa proposta é compreender a não-separabilidade como

indício de uma estrutura objetiva global, sendo local quanto à individuação de eventos, regiões e processos dinâmicos, mas global quanto às restrições de estado e às correlações.

4.5 O paradigma de Copenhague e o antirrealismo

A expressão “interpretação de Copenhague” não designa, de modo neutro, uma doutrina unificada já plenamente constituída nos anos 1920. Embora Bohr, Heisenberg, Born, Pauli e outros autores tenham participado da consolidação da mecânica quântica e compartilhado certas atitudes comuns diante do formalismo, não havia, naquele momento, uma interpretação única, sistemática e consensual que pudesse ser simplesmente identificada como a posição de Copenhague. O que existia era antes um conjunto heterogêneo de respostas ao problema da realidade quântica, articuladas em torno da complementaridade, da regra probabilística de Born, do papel da medição, da limitação dos conceitos clássicos e da recusa de uma descrição clássica completa dos processos microscópicos.

Nesse sentido, a própria ideia de uma “interpretação de Copenhague” deve ser entendida como uma construção retrospectiva. Heisenberg desempenhou papel decisivo nesse processo. Já em 1930, ao publicar *The Physical Principles of the Quantum Theory*, ele se referia ao “espírito de Copenhague” da teoria quântica, sugerindo a existência de uma orientação comum associada ao círculo de Bohr. Contudo, foi sobretudo nos anos 1950 que essa orientação passou a ser apresentada como uma interpretação relativamente definida. Em textos e conferências desse período, posteriormente reunidos em *Physics and Philosophy* (Heisenberg, 1987), Heisenberg passou a falar expressamente da interpretação de Copenhague da teoria quântica, contrapondo-a a propostas alternativas, como a teoria de variáveis ocultas de Bohm.

Esse deslocamento terminológico é filosoficamente importante. Ao nomear e estabilizar retrospectivamente uma interpretação de Copenhague, Heisenberg contribuiu para transformar uma tradição heterogênea, marcada por diferenças internas entre seus próprios protagonistas, em uma ortodoxia aparentemente unitária. A expressão passou então a sugerir que haveria uma leitura natural, quase inevitável, do formalismo quântico: uma leitura segundo a qual a função de onda não deveria ser compreendida como representação direta de uma realidade microscópica independente, mas como instrumento para calcular probabilidades de resultados experimentais, definidos em condições clássicas de observação e comunicação.

A análise dessa construção histórica é decisiva para a presente dissertação. Se a interpretação de Copenhague foi consolidada retrospectivamente como ortodoxia, então seu antirrealismo ou seu enfraquecimento da noção clássica de realidade não pode ser tratado como consequência lógica obrigatória da mecânica quântica. Trata-se, antes, de uma resposta filosófica historicamente vitoriosa ao problema colocado pelo formalismo. A heterogenei-

dade interna da chamada ortodoxia quântica permite, portanto, distinguir entre o sucesso empírico da mecânica quântica e a interpretação antirrealista que se tornou dominante em torno dela.

A reconstrução de Beller (Beller, 1999) é utilizada aqui como apoio historiográfico para questionar a imagem de uma interpretação de Copenhague homogênea e inevitável. O objetivo da presente seção, contudo, não é reproduzir sua narrativa, mas mostrar como a heterogeneidade interna da ortodoxia quântica reforça a tese desta dissertação na qual o antirrealismo de Copenhague foi uma construção interpretativa historicamente vitoriosa, não uma consequência lógica obrigatória do formalismo quântico.

Essa heterogeneidade é importante para a presente dissertação. Se a interpretação de Copenhague não é um bloco filosófico único, então ela não pode ser tomada como a consequência necessária do formalismo quântico. O formalismo da mecânica quântica impõe restrições profundas à aplicação dos conceitos clássicos, mas não determina sozinho uma única interpretação filosófica. A passagem do formalismo para uma leitura antirrealista envolve decisões conceituais adicionais, ligadas ao modo como se entende a função da teoria, o papel da medição e o estatuto da função de onda. A força histórica de Copenhague decorreu, em parte, de sua capacidade de oferecer uma linguagem comum para uma comunidade científica que lidava com problemas conceituais inéditos. A mecânica quântica havia rompido com imagens familiares da física clássica de trajetórias contínuas, propriedades simultaneamente definidas, causalidade determinista e independência entre descrição física e arranjo experimental. Nesse contexto, uma interpretação que deslocava o foco da realidade microscópica subjacente para os resultados observáveis possuía grande poder de estabilização. Ela permitia preservar a eficácia preditiva do formalismo sem exigir uma imagem ontológica clara do domínio quântico.

Esse ponto explica o apelo do antirrealismo. A atitude antirrealista não surgiu apenas como uma tese filosófica abstrata, mas como resposta a dificuldades concretas da nova física. Diante da impossibilidade de aplicar diretamente os conceitos clássicos ao domínio atômico, tornou-se plausível defender que a teoria deveria limitar-se às condições de manifestação dos fenômenos. Em vez de perguntar o que o elétron é independentemente de qualquer contexto experimental, a interpretação ortodoxa passou a privilegiar a pergunta sobre quais resultados podem ser previstos em um arranjo experimental determinado. Essa mudança atingia diretamente a noção clássica de objetividade. Na física clássica, a objetividade era normalmente associada à atribuição de propriedades definidas aos sistemas independentemente da observação. Em Copenhague, a objetividade passa a ser vinculada à possibilidade de comunicar publicamente os resultados experimentais por meio de uma linguagem comum, em especial a linguagem dos conceitos clássicos. A realidade física deixa de ser pensada como um conjunto de propriedades microscópicas plenamente determinadas e passa a ser articulada a partir dos fenômenos observáveis e das condições de sua produção.

Nesse quadro, o indeterminismo também adquire papel central, mas não de modo inteiramente simples. A mecânica quântica introduz probabilidades de maneira fundamental, sobretudo por meio da regra de Born e da impossibilidade de prever com certeza todos os resultados individuais. Contudo, transformar essa estrutura probabilística em uma tese metafísica sobre a inexistência de propriedades subjacentes exige um passo interpretativo adicional. O fato de uma teoria operar com probabilidades não implica, por si só, que toda forma de realidade objetiva esteja excluída. A questão é saber se a probabilidade quântica expressa ignorância, indeterminação objetiva, estrutura disposicional ou limitação do próprio esquema conceitual clássico. Em Heisenberg, a probabilidade se aproxima de uma ontologia das potencialidades.

É nesse ponto que a crítica historiográfica de Beller se torna útil ¹³.

A distinção decisiva é entre consistência e inevitabilidade. A interpretação de Copenhague pode ser consistente com o formalismo quântico e, ao mesmo tempo, não ser a única interpretação possível desse formalismo. Ela oferece uma resposta coerente à crise dos conceitos clássicos, mas não demonstra que toda ontologia quântica seja impossível. A sua força histórica decorreu de sua capacidade de estabilizar a prática científica e de oferecer uma narrativa comum para a nova teoria, sendo que sua força filosófica, contudo, depende de argumentos adicionais contra a possibilidade de uma descrição realista. Essa distinção permite situar melhor a oposição entre Einstein e Bohr. Einstein não recusava o sucesso empírico da mecânica quântica. Tampouco defendia simplesmente um retorno ingênuo à física clássica. Sua objeção central era que a eficácia preditiva de uma teoria não basta para estabelecer sua completude ontológica. Uma teoria pode prever corretamente os resultados experimentais e, ainda assim, deixar sem representação certos elementos da realidade física. É essa suspeita que culminou no argumento EPR.

A interpretação de Copenhague, ao contrário, tende a enfraquecer a exigência de uma realidade subjacente descrita independentemente das condições de medição. Para Bohr, a própria noção de fenômeno inclui o arranjo experimental. Já para Heisenberg, a aplicação de conceitos como trajetória, posição e momento depende das condições de observação; para Born, a função de onda adquire um significado probabilístico. Essas posições não são idênticas, mas convergem na recusa de uma descrição clássica completa do microdomínio. A consequência filosófica é que Copenhague desloca o problema da realidade. Em vez de perguntar quais propriedades pertencem ao sistema antes da medição, pergunta-se quais condições permitem a atribuição significativa de resultados. Essa mudança pode ser vista como uma reconstrução da objetividade, mas também como uma limitação da ambição realista da física. A questão central desta dissertação surge exatamente nesse ponto ao

¹³ A caracterização da interpretação de Copenhague como uma tradição heterogênea e historicamente construída apoia-se, em especial, na reconstrução crítica de Beller (Beller, 1999). Para outras reconstruções históricas e filosóficas da interpretação de Copenhague, ver também Jammer, Faye, Fine e Howard

perguntar se a mecânica quântica obriga a abandonar todo realismo ou apenas uma forma clássica, separável e local de realismo?

4.6 A questão do antirrealismo

Beller (Beller, 1999)¹⁴ propõe que a interpretação antirrealista da mecânica quântica não se impôs apenas por argumentos filosóficos abstratos. Seu êxito esteve ligado a um conjunto de fatores científicos, metodológicos e institucionais que tornaram atraente a recusa de uma ontologia microscópica definida. Em um momento de intensa transformação conceitual, no qual coexistiam formalismos matematicamente equivalentes e imagens físicas incompatíveis, a renúncia a uma descrição direta da realidade subjacente parecia oferecer uma saída metodologicamente segura.

O primeiro fator desse apelo foi o sucesso preditivo da nova teoria. A mecânica quântica fornecia resultados extraordinariamente precisos, mesmo sem apresentar uma imagem clássica dos processos microscópicos. Essa situação favorecia uma atitude segundo a qual a exigência de uma descrição ontológica poderia ser suspensa. Se a teoria funcionava, se produzia previsões corretas e organizava os dados experimentais, talvez não fosse necessário exigir dela uma representação intuitiva de partículas, trajetórias ou processos causais subjacentes. O segundo fator foi a crise dos conceitos clássicos. A física anterior pressupunha que objetos possuíam propriedades bem definidas, trajetórias contínuas e estados independentes da observação. A mecânica quântica tornou problemático esse quadro. Fenômenos como interferência, difração, quantização, indeterminação e superposição sugeriam que os conceitos herdados da mecânica clássica não podiam ser simplesmente transferidos para o domínio atômico. O antirrealismo encontrou força justamente nessa dificuldade, já que em vez de tentar preservar uma ontologia clássica, propôs limitar a teoria ao que pode ser experimentalmente definido. O terceiro fator foi a busca de unidade dentro da comunidade científica. A década de 1920 foi marcada por disputas entre formulações rivais da mecânica quântica, especialmente entre a mecânica matricial de Heisenberg e a mecânica ondulatória de Schrödinger. Embora a equivalência formal entre essas abordagens tenha sido posteriormente reconhecida, suas imagens físicas eram diferentes. Nesse contexto, uma interpretação menos comprometida com modelos ontológicos específicos podia funcionar como instrumento de pacificação ao deslocar o foco da realidade subjacente para os resultados observáveis e, assim, reduzir o conflito entre imagens rivais.

Nesse sentido, o antirrealismo teve uma função agregadora. Ele permitiu que físicos

¹⁴ Beller é utilizada nesta seção como referência historiográfica central para problematizar a consolidação da chamada interpretação de Copenhague. A presente análise, porém, não pretende reproduzir sua narrativa, mas examinar como a autoridade filosófica de Copenhague se constituiu na tensão entre formalismo quântico, complementaridade, operacionalismo e crítica ao realismo clássico

com sensibilidades filosóficas distintas aceitassem o mesmo formalismo sem precisar concordar sobre a natureza última do mundo quântico. Bohr desempenhou papel importante nessa unificação, ao apresentar a complementaridade como uma forma de acomodar descrições aparentemente incompatíveis. A interpretação de Copenhague oferecia, assim, não apenas uma tese filosófica, mas uma estratégia de estabilização conceitual para uma comunidade científica dividida. No entanto, o fato de uma interpretação exercer função unificadora não significa que ela seja filosoficamente inevitável. Esse é o ponto em que a crítica de Beller (Beller, 1999) se torna relevante. Beller chama a atenção para o caráter histórico e retórico da consolidação da ortodoxia de Copenhague. A interpretação antirrealista não venceu apenas porque derivava logicamente do formalismo quântico, mas ela se fortaleceu também porque oferecia uma narrativa capaz de apresentar a nova física como ruptura necessária com a representação clássica da realidade. O sucesso institucional dessa narrativa, porém, não deve ser confundido com demonstração filosófica contra o realismo. A distinção entre consistência e inevitabilidade é decisiva. A interpretação antirrealista pode ser coerente com a prática quântica, uma vez que ela permite calcular, prever e descrever resultados experimentais sem recorrer a entidades subjacentes bem definidas. Mas disso não se segue que toda interpretação realista seja impossível. A mecânica quântica padrão pode ser compatível com uma atitude instrumentalista ou antirrealista, mas a compatibilidade não equivale à exclusividade. Essa diferença é central para evitar que a interpretação de Copenhague seja tomada como consequência obrigatória do formalismo.

Outro elemento do apelo antirrealista é a redefinição da objetividade. Na física clássica, ser objetivo significava, em geral, descrever propriedades de sistemas independentemente da observação. Em Bohr, a objetividade passa a estar ligada à possibilidade de comunicar publicamente os resultados de experimentos realizados em condições bem definidas. O objeto isolado perde centralidade e o fenômeno passa a incluir o arranjo experimental. Essa reconstrução é filosoficamente poderosa porque preserva uma forma de objetividade sem exigir uma ontologia microscópica independente. Heisenberg oferece uma variação dessa tendência. Sua ênfase nos observáveis, nas relações de incerteza e no formalismo matemático reforça a ideia de que a teoria deve abandonar conceitos que não possuam papel operacional claro. A realidade quântica deixa de ser pensada como conjunto de propriedades clássicas preexistentes e passa a ser articulada por meio das possibilidades de medição e das estruturas matemáticas da teoria. Essa posição, embora não idêntica à de Bohr, contribui para o mesmo deslocamento, qual seja, da descrição de uma realidade independente para a análise das condições sob as quais resultados podem ser definidos.

A força do antirrealismo, portanto, não reside em uma única tese, mas na convergência de várias pressões, isto é, o fracasso das imagens clássicas, o êxito estatístico do formalismo, a centralidade da medição, a necessidade de linguagem clássica e a busca de consenso disciplinar. Essa convergência explica por que Copenhague se tornou uma ortodoxia. Mas

ela também revela sua fragilidade: aquilo que aparece como solução filosófica pode ser, em parte, uma resposta pragmática a um contexto histórico específico. A crítica realista de Einstein deve ser compreendida contra esse pano de fundo.

A análise de Heisenberg e Bohr interessa aqui menos como reconstrução biográfica da interpretação de Copenhague e mais como etapa na formação de uma alternativa ao realismo einsteiniano. Em Heisenberg, a crise dos conceitos clássicos aparece ligada à limitação operacional da atribuição simultânea de grandezas conjugadas. Em Bohr, essa limitação é reinterpretada como exigência de complementaridade e de descrição clássica dos fenômenos. O problema a ser avaliado é se essa posição implica um antirrealismo forte ou se constitui antes uma redefinição contextual da objetividade.

4.6.1 A filosofia de Heisenberg

No livro *Física e Filosofia*, Heisenberg (1987) contrapõe os argumentos de Einstein de que não se consegue descrever o que de fato ocorre por si só, sem depender das observações, nem mesmo no intervalo entre duas medições. De acordo com Einstein, algo precisa necessariamente acontecer nesse meio tempo, e, se isso não for de alguma forma descrito, então o trabalho da física permanece incompleto. O cientista precisa presumir a existência de um mundo objetivo, que ele não criou, mas que continua a existir de forma constante e independente de sua presença. Dessa forma, a interpretação de Copenhague não proporcionaria uma compreensão verdadeira dos fenômenos atômicos.

A resposta, conforme a interpretação de Copenhague seria (Heisenberg, 1987, p. 110):

“Bem, podemos dizer que a física é uma parte da ciência e, como tal, visa a descrição e entendimento da Natureza. Qualquer tipo de entendimento, científico ou não, depende de nossa linguagem, da comunicação de ideias. E toda descrição de fenômenos, experiências e de seus resultados depende da linguagem de que se faça uso, o único meio possível de comunicação. Os termos utilizados nessa linguagem representam conceitos da vida quotidiana que, através da evolução da terminologia da física, puderam ser refinados e, assim, dar lugar aos conceitos da física clássica. Esses últimos são as únicas ferramentas de que dispomos para nos expressar, sem ambigüidade, sobre eventos, experimentações e seus resultados. Se, portanto, o físico for solicitado a apresentar uma descrição do que realmente acontece em suas experiências, as palavras “descrição”, “realmente” e “acontece” podem somente se referir a suas acepções da vida diária ou, então, da física clássica. Tão logo o físico abandonasse essa última base conceitual, ver-se-ia impossibilitado de se exprimir sem ambigüidades e não teria como prosseguir em seu trabalho científico. Portanto, toda afirmação sobre o que “realmente ocorreu” é uma assertiva feita com base nos conceitos da física clássica e, assim

- devido à termodinâmica estatística e às relações de incerteza - é algo, por sua própria natureza, incompleto no que se refere aos detalhes dos fenômenos atômicos pesquisados. Exigir-se que se “descreva o que ocorre” em um processo quântico, entre duas observações sucessivas, é uma contradição *in adjecto* pois a palavra “descrever” diz respeito ao uso de conceitos clássicos, enquanto, por outro lado, esses conceitos perdem sua validade no intervalo entre as observações; eles só se aplicam no momento da observação. Dever-se-ia notar, nesse ponto, que a interpretação de Copenhague não é, de forma alguma, positivista. Isso, pois, enquanto o positivismo toma as percepções sensoriais do observador como elementos básicos da realidade, a interpretação de Copenhague considera as coisas e processos (passíveis toda interpretação de uma descrição clássica), isto é, o real, como o fundamento de toda interpretação física. Vemos, ao mesmo tempo, que a natureza estatística das leis da física devido microscópica não pode ser evitada, pois todo conhecimento do “real” é – às leis quânticas - um conhecimento incompleto por si mesmo. A ontologia do materialismo repousava na ilusão de que o sentido da existência, a “realidade” direta, do Universo que nos cerca, pudesse ser extrapolado para o domínio atômico. Essa extrapolação mostrou-se, todavia, impossível.”

Mais adiante, ele faz uma comparação com os conceitos aristotélicos de matéria e forma, afirmando que a matéria, segundo Aristóteles, vista apenas como *potentia* (isto é, uma possibilidade de existência), pode ser relacionada ao conceito atual de energia. Essa energia só se torna algo “real” quando adquire uma forma definida, o que ocorre no instante em que uma partícula elementar é criada (Heisenberg, 1987, p. 136):

“Na teoria quântica, analogamente, todos os conceitos clássicos, quando aplicados ao átomo, encontram-se tão bem ou tão mal definidos como o de temperatura de um átomo: eles estão correlacionados com certas expectativas estatísticas acerca das propriedades atômicas; somente à instâncias raras, a expectativa, isto é, a probabilidade correspondente, equivalerá à certeza. E, de novo, como no caso da termodinâmica estatística clássica, é difícil considerar-se essa expectativa como algo objetivo. Talvez se possa chamá-la de tendência ou possibilidade objetiva, uma potencialidade, a *potentia* no sentido da física aristotélica. De fato, eu pessoalmente acredito que a linguagem que os físicos utilizam, ao falar sobre fenômenos atômicos, sugere em suas mentes algo semelhante ao conceito de *potentia*. E os físicos, assim, foram gradualmente se habituando a falar, por exemplo, de órbitas eletrônicas, não como uma realidade, mas sim como uma *potentia*.”

A filosofia de Heisenberg ocupa uma posição decisiva na formação da interpretação de Copenhague, mas não deve ser confundida integralmente com a posição de Bohr. Enquanto Bohr enfatiza a indispensabilidade da linguagem clássica e a totalidade do fenômeno experimental, Heisenberg parte sobretudo da crise dos conceitos cinemáticos clássicos no domínio atômico. Sua contribuição filosófica consiste em sustentar que a mecânica quântica não apenas modifica certas leis da física, mas altera o modo como conceitos como posição, velocidade, trajetória, causalidade e estado físico podem ser empregados. O ponto de partida de Heisenberg é a constatação de que a física atômica não permite uma simples extensão das imagens clássicas ao domínio microscópico. Na mecânica clássica, descrever um sistema significa, em geral, atribuir-lhe uma trajetória definida, isto é, uma sucessão contínua de posições no tempo. No domínio quântico, porém, a tentativa de aplicar essa imagem encontra dificuldades profundas. A teoria não fornece, simultaneamente, valores definidos para todos os pares de grandezas canonicamente conjugadas, como posição e momento. Desse modo, a trajetória clássica deixa de ser um elemento fundamental da descrição física.

Essa mudança aparece com clareza no princípio de incerteza. A relação de incerteza não deve ser entendida apenas como uma limitação técnica dos instrumentos de medida, como se melhores aparelhos pudessem restaurar a descrição clássica. Ela indica uma restrição conceitual mais profunda, uma vez que determinados pares de grandezas não podem ser simultaneamente definidos com precisão arbitrária no próprio quadro formal da teoria. Assim, Heisenberg desloca a questão da ignorância empírica para a estrutura da descrição física. O problema não é apenas que não sabemos a trajetória, mas que a teoria não autoriza atribuí-la como propriedade definida nos termos clássicos usuais. Esse ponto tem consequências diretas para o debate com Einstein. Para Einstein, uma teoria física completa deveria representar uma realidade independente da observação. Mesmo quando não conhecemos todos os detalhes de um processo, deveria haver algo determinado ocorrendo entre uma medição e outra. A posição de Heisenberg contesta justamente essa exigência. Segundo sua leitura, perguntar o que acontece no intervalo entre medições pode ser uma pergunta mal formulada quando se pretende respondê-la com categorias clássicas que perderam aplicação no domínio quântico.

Em Física e Filosofia, Heisenberg (Heisenberg, 1987) reconhece que a objeção de Einstein nasce de uma exigência realista forte, assim definida: o físico supõe a existência de um mundo objetivo, independente de sua intervenção, e espera que a teoria descreva esse mundo. No entanto, Heisenberg responde que toda descrição física precisa ser expressa em uma linguagem comunicável e que, no caso da mecânica quântica, essa linguagem permanece ligada aos conceitos da física clássica. O problema é que tais conceitos só podem ser aplicados sob condições experimentais específicas. Fora dessas condições, sua utilização pode produzir pseudoproblemas ou imagens enganosas. A filosofia de Heisenberg, portanto, não é simplesmente uma negação da realidade. Ela é antes uma crítica à pretensão de descrever a

realidade quântica por meio de uma ontologia clássica de objetos com propriedades determinadas independentemente de qualquer contexto experimental. O elétron, por exemplo, não deve ser pensado como uma pequena esfera que percorre uma trajetória contínua enquanto apenas ignoramos sua posição. A teoria quântica exige uma descrição mais abstrata, na qual o estado físico é representado por estruturas matemáticas que determinam probabilidades de resultados possíveis. Nesse sentido, Heisenberg aproxima-se de uma forma de antirrealismo metodológico. Ele não precisa afirmar que nada existe independentemente da observação. Basta sustentar que a teoria física não deve atribuir realidade a elementos que não podem ser integrados de modo consistente ao formalismo.

A crítica historiográfica de Mara Beller (1999) é relevante justamente nesse ponto. Ela questiona a narrativa segundo a qual o positivismo teria sido o motor filosófico direto da descoberta da mecânica quântica. Segundo essa leitura crítica, a linguagem positivista foi frequentemente mobilizada depois da construção formal da teoria, como estratégia de legitimação conceitual. O recurso a Mach, à eliminação de inobserváveis e à crítica das trajetórias clássicas não deve ser visto como uma chave única para explicar a gênese da mecânica quântica, mas como parte de uma disputa posterior sobre seu significado filosófico¹⁵.

Essa observação permite evitar uma simplificação. Heisenberg não deve ser apresentado apenas como alguém que aplicou um programa positivista à física atômica. Seu percurso é mais ambíguo. No artigo de 1925, a recusa de grandezas não observáveis tem papel importante, mas a força da nova mecânica não veio apenas dessa recusa, mas sobretudo da construção de um formalismo capaz de organizar frequências, intensidades e transições atômicas. Em 1927, com o princípio de incerteza, Heisenberg procurou oferecer uma interpretação conceitual mais ampla desse formalismo, relacionando-o às condições de medição e aos limites da aplicação de conceitos clássicos. O problema filosófico aparece quando essa reconstrução passa da consistência interna da mecânica quântica para uma tese de inevitabilidade. Que a teoria seja compatível com uma leitura operacional ou antirrealista não significa que tal leitura seja a única possível. A crítica realista consiste em separar duas questões: a primeira é se a mecânica quântica fornece previsões corretas e um formalismo coerente; e a segunda é se esse formalismo deve ser interpretado como descrição completa da realidade física. Heisenberg tende a responder afirmativamente à segunda questão, enquanto Einstein a mantém em aberto.

Nesse ponto, a oposição entre Einstein e Heisenberg antecipava o problema central do EPR. Para Heisenberg, a ausência de uma trajetória definida ou de valores simultâneos

¹⁵ A crítica de Beller é utilizada aqui apenas como apoio historiográfico para questionar a narrativa da inevitabilidade positivista da interpretação de Copenhague. O objetivo da presente subseção não é reconstruir a narrativa de Beller, mas situar Heisenberg na tensão central desta dissertação: a passagem da crise dos conceitos clássicos para o problema da realidade objetiva

de posição e momento não indica incompletude da teoria, mas sim que a exigência clássica de tais valores perdeu legitimidade. Para Einstein, ao contrário, a impossibilidade de a teoria representar certos elementos de realidade pode ser sinal de que o formalismo, embora correto estatisticamente, não é completo. A divergência, portanto, não diz respeito apenas à interpretação de experimentos, porém ao próprio conceito de completude de uma teoria física. A filosofia de Heisenberg deve ser entendida, assim, como uma das principais fontes do apelo antirrealista da mecânica quântica. Ela oferece uma resposta poderosa à crise das imagens clássicas, isto é, quando os conceitos tradicionais deixam de funcionar, não devemos forçar sua aplicação, mas aceitar uma nova forma de descrição fundada no formalismo quântico e nas condições experimentais. Essa resposta, contudo, tem um custo filosófico. Ao limitar o significado físico ao que pode ser integrado ao formalismo e às situações de medição, ela enfraquece a exigência realista de uma descrição independente dos processos físicos.

Para os fins desta dissertação, Heisenberg é importante porque representa uma alternativa radical ao realismo de Einstein. Na relatividade, Einstein havia abandonado absolutos clássicos sem abandonar a objetividade já que a realidade foi deslocada para os invariantes. Em Heisenberg, a crise dos conceitos clássicos conduz a uma conclusão diferente, uma vez que não se deve procurar uma realidade subjacente descrita por propriedades independentes. A pergunta decisiva é se essa conclusão é uma exigência da mecânica quântica ou apenas uma interpretação historicamente vitoriosa. Na fronteira da pesquisa científica, poucos princípios permanecem imunes à reavaliação conceitual. Mesmo ideias frequentemente apresentadas como pilares da mecânica quântica, como o princípio de incerteza, a complementaridade ou a interpretação probabilística da função de onda, continuam sendo objeto de intenso debate. Essa situação reflete uma característica mais geral da física teórica pois conceitos fundamentais podem ser reformulados ou reinterpretados à luz de novos desenvolvimentos teóricos. O próprio determinismo da física clássica foi profundamente reexaminado com o surgimento das teorias do caos, enquanto o suposto indeterminismo da mecânica quântica tem sido questionado por interpretações alternativas que preservam uma dinâmica determinista, como a teoria de onda piloto desenvolvida por Dürr, Goldstein e Zanghì.¹⁶ De modo semelhante, o próprio significado físico das relações de incerteza continua sendo objeto de múltiplas interpretações na literatura contemporânea.¹⁷ O mesmo

¹⁶ D. Dürr, S. Goldstein e N. Zanghì, “Quantum Equilibrium and the Origin of Absolute Uncertainty” cite-dürr1992quantum, *Journal of Statistical Physics* 67 (1992); D. Dürr, S. Goldstein e N. Zanghì, “Bohmian Mechanics as the Foundation of Quantum Mechanics”, em J. T. Cushing, A. Fine e S. Goldstein (eds.) (Cushing; Fine; Goldstein, 1996), *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal* (Dordrecht: Kluwer, 1996) (Cushing; Fine; Goldstein, 1996)

¹⁷ D. Home e M. A. B. Whitaker, “Heisenberg’s Uncertainty Principle: The End of a Century-Long Debate?”, *Physics Reports* 210 (1992); A. Valentini, “Pilot-Wave Theory of Fields, Gravitation and Cosmology” (Valentini, 1996), em J. T. Cushing, A. Fine e S. Goldstein (eds.), *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal* (Dordrecht: Kluwer, 1996) (Cushing; Fine; Goldstein, 1996)

ocorre com a interpretação probabilística de Born e com sua análise dos processos de colisão, que continuam sendo discutidas e reinterpretadas em trabalhos recentes ¹⁸. De maneira análoga, não há consenso pleno sobre o significado ou mesmo sobre a validade geral do princípio de complementaridade onda-partícula introduzido por Bohr. Por fim, até mesmo a equação fundamental da mecânica ondulatória, a equação de Schrödinger, tem sido objeto de propostas de modificação ou generalização em programas de pesquisa que investigam possíveis extensões ou reformulações da teoria quântica.

Uma linha contemporânea próxima da ideia de Heisenberg é a interpretação de propensão, associada a Karl Popper. Segundo essa interpretação probabilidades físicas são propensões reais, isto é, tendências objetivas de sistemas físicos produzirem certos resultados. Assim, o estado quântico não representa ignorância, mas disposições reais do sistema para gerar certos resultados experimentais. No entanto, ela ainda enfrenta o problema de explicar como essas propensões se manifestam dinamicamente, isto é, qual processo físico leva à atualização de um resultado específico. Outra família de interpretações, as interpretações modais, tenta desenvolver de forma mais rigorosa a ideia de realidade como possibilidade. Nessas interpretações, o estado quântico descreve todas as propriedades possíveis de um sistema, mas apenas algumas dessas propriedades são atualizadas em um dado momento. A diferença crucial em relação a Heisenberg é que essas interpretações tentam formular essa ontologia sem recorrer ao conceito de observador ou medição como elemento fundamental. Uma terceira abordagem contemporânea é a ontologia de disposições ou poderes, desenvolvida por vários filósofos da física. Nessa perspectiva, sistemas físicos possuem disposições reais, essas disposições se manifestam em certos contextos experimentais. A função de onda pode então ser interpretada como uma representação matemática dessas disposições.

Comparadas com essas interpretações contemporâneas, as ideias de Heisenberg revelam uma tensão filosófica importante. Ele tenta afirmar simultaneamente que o estado quântico descreve potencialidades reais, porém o significado físico dessas potencialidades depende do contexto de medição. Essa combinação produz uma dificuldade conceitual, qual seja, a ontologia da teoria permanece parcialmente dependente de um conceito epistemológico. Isso leva a uma crítica recorrente na filosofia da física: a interpretação de Heisenberg não oferece uma ontologia completamente independente da prática experimental.

A historiadora da ciência Mara Beller observa que um dos equívocos mais difundidos na literatura sobre a origem da mecânica quântica consiste em atribuir um papel heurístico central ao princípio positivista de eliminação de inobserváveis. ¹⁹ Segundo Beller, essa leitura projeta retrospectivamente sobre o desenvolvimento histórico da teoria uma narrativa

¹⁸ M. Born, “Quantenmechanik der Stoßvorgänge”, *Zeitschrift für Physik* 37 (1926) (Born, 1926); D. Daumer, “Quantum Theory and the Role of Probability”, manuscrito e discussões em filosofia da física da década de 1990

¹⁹ A. Beller, *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution* (Chicago: University of Chicago Press, 1999)

metodológica excessivamente simples. Em vez de funcionar como princípio orientador do trabalho criativo dos físicos, o positivismo teria sido frequentemente mobilizado como estratégia retórica destinada a legitimar avanços teóricos já obtidos. Assim, o recurso à filosofia de Mach por parte de alguns dos protagonistas da revolução quântica deve ser entendido menos como fundamento heurístico do desenvolvimento teórico e mais como uma forma de justificação *ex post facto*.

No livro *Física e Filosofia*, (Heisenberg, 2000) há o relato de um debate com a filósofa Grete Hermann:

“É precisamente aí, disse Grete Hermann, que tantas pessoas acham que a física moderna errou. O simples fato de nenhuma causa para um determinado efeito ter sido descoberta ainda não significa que tal causa não exista. Eu mesmo concluiria simplesmente que o problema ainda precisa ser resolvido, que os físicos atômicos devem continuar procurando até descobrirem a causa. Afinal, seu conhecimento do estado do átomo de Rádio B antes da emissão do elétron é incompleto, visto que você não pode dizer quando e em que direção o elétron será emitido. Em outras palavras, você terá que continuar procurando.

Não, achamos que encontramos tudo o que há para ser encontrado neste campo”, insisti, “pois, a partir de outros experimentos com Rádio B, sabemos que não há determinantes além daqueles que estabelecemos. Deixe-me ser mais preciso: acabamos de dizer que é impossível dizer em que direção um elétron será emitido, e você nos diz para continuarmos procurando por outros fatores. Mesmo supondo que você estivesse certo e pudéssemos descobrir tais fatores, entraríamos em novas dificuldades. Veja bem, o elétron também pode ser tratado como uma onda material emitida pelo núcleo atômico. Tal onda pode causar fenômenos de interferência. Suponhamos ainda que as partes da onda que o núcleo atômico emite em direções opostas possam ser induzidas a interferir dentro de um aparato especial. O resultado será a extinção em certas direções. Nesse caso, poderíamos fazer a previsão certa de que o elétron não será emitido naquela direção. Mas se tivéssemos descoberto novos determinantes a partir dos quais pudéssemos dizer que o elétron foi originalmente emitido em uma direção claramente definida, então nenhuma interferência poderia ter ocorrido. Não haveria extinção, e nossa conclusão anterior estaria errada. De fato, porém, a extinção pode ser observada experimentalmente. Esta é a própria maneira da natureza nos dizer que não existem novos determinantes, que nosso conhecimento é completo sem eles.

Mas isso é terrível, disse Grete Hermann. Por um lado, você afirma que seu conhecimento do átomo de Rádio B é incompleto, visto que não consegue dizer quando e em que direção o elétron será emitido, enquanto, por outro lado, você

me diz que seu conhecimento é completo porque, se houvesse outros determinantes, você teria problemas com outros experimentos. Mas nosso conhecimento não pode ser completo e incompleto ao mesmo tempo. Tudo isso é pura bobagem. Carl Friedrich juntou-se à discussão. A aparente contradição, disse ele, provavelmente surge porque nos comportamos como se um átomo de Rádio B fosse uma “coisa em si”, um “Ding an sich” kantiano. Mas isso não é de forma alguma autoevidente ou correto. Até mesmo Kant tratou o “Ding an sich” como um conceito problemático. Ele percebeu que não podemos dizer nada sobre o “Ding an sich” como tal; Só podemos falar sobre os objetos da nossa percepção. Ele, no entanto, presumiu que poderíamos correlacionar ou organizar esses objetos de acordo com o modelo do “Ding an sich”. Em outras palavras, ele tratou como a priori aquela estrutura de experiência à qual nos acostumamos na vida cotidiana e que, de forma mais precisa, também é a base da física clássica. Nessa visão, o mundo consiste em coisas no espaço que mudam com o tempo, em processos que se sucedem de acordo com uma regra estabelecida. Mas na física atômica aprendemos que as observações não podem mais ser correlacionadas ou organizadas segundo o modelo do “Ding an sich”. Portanto, também não existe um átomo de rádio B em si mesmo.

Grete Hermann o interrompeu. Você não parece estar usando o termo “Ding an sich” no espírito da filosofia kantiana. Devemos distinguir claramente entre o “Ding an sich” e o objeto físico. Segundo Kant, o “Ding an sich” não aparece nos fenômenos, nem mesmo indiretamente. Este conceito tem apenas uma função: nas ciências naturais e em toda a filosofia teórica, refere-se ao que não pode ser conhecido. Porque, veja bem, todo o nosso conhecimento se baseia na experiência, e experiência significa conhecer precisamente as coisas como elas nos aparecem. Mesmo o conhecimento a priori não lida com as coisas como elas são em si; sua única função é tornar a experiência possível. Agora, se você se refere a um átomo de Rádio B, no sentido da física clássica, você está simplesmente se referindo ao que Kant chama de coisa ou objeto. Objetos fazem parte do mundo dos fenômenos: cadeiras e mesas, estrelas e átomos. Mesmo que não possamos vê-los, como átomos, por exemplo? Mesmo assim, pois os deduzimos de fenômenos observáveis. O mundo dos fenômenos é uma estrutura coerente, e é completamente impossível, mesmo na experiência diária, distinguir nitidamente entre o que vemos diretamente e o que meramente inferimos. Você vê esta cadeira, mas não consegue ver suas costas de onde está. Ainda assim, você tem certeza de que ela existe. Isso significa simplesmente que a ciência é objetiva; ela é objetiva precisamente porque fala de objetos, não de percepções. Mas quando se trata de átomos, não podemos ver nem a frente nem o verso.

Por que deveriam ter as mesmas propriedades que cadeiras e mesas? Porque são objetos. Sem objetos não pode haver ciência objetiva. E o que os objetos são é determinado por categorias como substância, causalidade, etc. Se você renuncia à aplicação estrita dessas categorias, então também renuncia à possibilidade da experiência em geral.

O ponto decisivo dessa passagem, para o argumento desta dissertação, não é apenas histórico, mas metodológico ao mostrar que a consolidação da ortodoxia quântica envolveu escolhas interpretativas e retóricas, e não uma derivação direta e inevitável do formalismo.

Conforme Beller (Beller, 1999)(tradução nossa):

“Nenhuma conclusão de natureza indeterminística foi, a princípio, derivada diretamente do formalismo. A retórica em prol de um retorno à pureza e à beleza clássicas foi abruptamente interrompida quando algo considerado ainda mais classicamente puro e esteticamente superior emergiu: a teoria ondulatória concorrente proposta por Schrödinger. Heisenberg e outros físicos alinhados à ortodoxia então formularam argumentos em favor de uma derrubada revolucionária do princípio de causalidade, em resposta à teoria rival da mecânica quântica de Schrödinger, concebida como uma alternativa causal e contínua. Esta análise também esclarece por que determinados elementos, e não outros, são selecionados para funcionar como pilares fundamentais de um novo paradigma científico. Além disso, evidencia a íntima conexão entre o enfrentamento de uma oposição teórica e a construção retrospectiva do passado científico. Foi precisamente em decorrência do desafio formulado por Schrödinger e das críticas de Einstein, que os físicos do eixo Göttingen–Copenhague elegeram a acausalidade e o indeterminismo como pontos estruturantes centrais de seu paradigma quântico em consolidação”.

4.6.2 Bohr: conceitos clássicos, complementaridade e objetividade

A posição de Bohr ocupa lugar central na interpretação filosófica da mecânica quântica porque oferece uma resposta específica à crise dos conceitos clássicos. Para Bohr, a dificuldade introduzida pelos fenômenos atômicos não poderia ser resolvida simplesmente pela substituição da física clássica por uma nova imagem microscópica do mundo. O problema era mais profundo: os próprios conceitos por meio dos quais descrevemos os resultados experimentais tais como posição, momento, trajetória, partícula, onda, aparelho, registro pertencem à linguagem clássica e continuam sendo indispensáveis para a comunicação objetiva dos fenômenos.

Essa tese da indispensabilidade dos conceitos clássicos é o ponto de partida da filosofia de Bohr. Toda evidência experimental precisa ser expressa em uma linguagem publicamente

comunicável. Um resultado físico não é apenas uma interação microscópica inobservável, mas um registro obtido em condições experimentais determinadas, quais sejam, uma marca em uma placa, um clique em um detector, um ponto em uma tela, uma leitura em um instrumento. Por isso, mesmo que a mecânica quântica imponha limites à aplicação dos conceitos clássicos aos objetos atômicos, ela não pode abandonar completamente esses conceitos sem perder a possibilidade de formular e comunicar resultados experimentais. Essa posição não equivale a um retorno simples à física clássica. Bohr não sustenta que os objetos quânticos sejam partículas ou ondas no mesmo sentido em que objetos macroscópicos podem ser descritos classicamente. Ao contrário, sua tese é que conceitos clássicos incompatíveis podem ser necessários em arranjos experimentais distintos. Em certos contextos, a descrição corpuscular é indispensável; em outros, a descrição ondulatória é exigida. O erro, segundo Bohr, estaria em tentar reunir essas descrições em uma única imagem clássica contínua do objeto quântico.

É nesse ponto que surge a complementaridade. A complementaridade em Bohr pode ser compreendida em três níveis. No primeiro, ela aparece como complementaridade onda-partícula: diferentes arranjos experimentais tornam possíveis descrições clássicas mutuamente excludentes, mas igualmente necessárias. No segundo, ela assume a forma de uma complementaridade entre descrição espaço-temporal e descrição causal-dinâmica: a determinação precisa das coordenadas espaço-temporais impede o controle completo das grandezas dinâmicas conjugadas, e vice-versa. No terceiro nível, mais importante para a resposta ao EPR, a complementaridade torna-se contextual ou fenomenológica: as propriedades físicas só podem ser atribuídas no interior do fenômeno total, definido pelo sistema, pelo aparato e pelas condições experimentais de descrição.

A complementaridade entre descrição espaço-temporal e descrição causal apresenta uma dificuldade interna. Se ela for compreendida como a tese de que não podemos conhecer simultaneamente certos aspectos de um mesmo sistema atômico, então ela parece pressupor uma distinção entre o sistema enquanto existente e o sistema enquanto conhecido. Nesse caso, a complementaridade dependeria de uma forma mínima de realismo: haveria um objeto físico subjacente ao qual se aplicariam, ainda que de modo mutuamente excludente, diferentes descrições clássicas. Por outro lado, se Bohr pretende evitar essa pressuposição realista, precisa deslocar a análise do sistema isolado para o fenômeno experimental completo. A complementaridade deixa então de ser uma limitação do conhecimento de um objeto e passa a ser uma tese sobre as condições de aplicação significativa dos conceitos físicos. É precisamente esse deslocamento que aproxima a resposta bohriana de uma posição contextual ou operacionalista.

Por outro lado, a complementaridade contextual tem sido criticada devido a experimentos de escolha demorada. Como observa Pessoa Jr. (Jr., 2001), na interpretação da complementaridade, enquanto o fenômeno não se completa, não se pode dizer se o objeto

quântico se comportou como onda ou como partícula. Apenas após o registro macroscópico seria possível determinar qual fenômeno ocorreu e, em certo sentido, o que se pode afirmar sobre o passado do sistema. Isso produz a impressão paradoxal de que o passado se atualiza no presente. A dificuldade não está na relação matemática de indeterminação, mas na interpretação contextual segundo a qual a atribuição de propriedades ao sistema depende do arranjo experimental completo. Em interpretações realistas, ao contrário, o que ocorre no futuro não altera a realidade anterior do sistema, ainda que essa realidade possa permanecer desconhecida.

Já a complementaridade onda-partícula não deve ser entendida como a afirmação trivial de que entidades quânticas são ora ondas, ora partículas. Ela é uma tese sobre os limites de aplicação de diferentes esquemas clássicos de descrição. Descrições mutuamente excludentes podem ser igualmente necessárias para esgotar as possibilidades de informação experimental sobre um fenômeno. Assim, onda e partícula, continuidade e descontinuidade, posição e momento não são simplesmente propriedades simultâneas de um objeto concebido nos moldes clássicos, mas modos de descrição vinculados a condições experimentais distintas.

A noção de fenômeno é, portanto, decisiva. Para Bohr, o fenômeno quântico não é o objeto microscópico considerado isoladamente, independentemente de qualquer arranjo experimental. O fenômeno inclui a totalidade formada pelo sistema investigado, pelo aparato de medição e pelas condições sob as quais o resultado é obtido. Essa tese desloca a objetividade física pois o objetivo da teoria não é atribuir propriedades intrínsecas e completas a objetos quânticos isolados, mas descrever de maneira inequívoca os fenômenos observáveis produzidos em contextos experimentais definidos. Essa concepção permite compreender por que Bohr recusou a exigência einsteiniana de uma descrição independente do sistema. Para Einstein, a teoria física deveria representar uma realidade objetiva cujos elementos existem independentemente do ato de observação. Mesmo quando uma grandeza não é medida, deveria haver uma realidade física determinada correspondente ao sistema. Bohr, ao contrário, considera que a atribuição de grandezas físicas no domínio quântico depende das condições experimentais que tornam essas grandezas definíveis. Não se trata apenas de desconhecimento de propriedades preexistentes, mas de uma limitação conceitual na aplicação simultânea de descrições clássicas.

A força da posição de Bohr está em reconhecer que a mecânica quântica torna problemática a ontologia clássica de objetos com propriedades determinadas, trajetórias contínuas e estados independentes do contexto experimental. Nesse sentido, Bohr não é simplesmente um antirrealista vulgar. Sua preocupação não é negar a realidade física, mas redefinir as condições sob as quais podemos falar objetivamente dela. A objetividade deixa de significar representação de uma realidade microscópica independente nos moldes clássicos e passa a significar comunicabilidade pública e controle experimental das condições de manifestação dos fenômenos. Contudo, essa redefinição tem um custo filosófico. Ao vincular a descrição

objetiva às condições experimentais, Bohr enfraquece a exigência realista de uma ontologia quântica independente. A questão é saber se esse enfraquecimento decorre necessariamente do formalismo quântico ou se constitui uma interpretação filosófica particular da teoria. É precisamente nesse ponto que a discussão historiográfica de Beller se torna relevante.

Beller²⁰ chama atenção para o fato de que a complementaridade foi frequentemente apresentada pela ortodoxia de Copenhague como se fosse uma consequência inevitável do formalismo quântico. Segundo essa leitura crítica, a dualidade onda-partícula teria sido construída retrospectivamente como o problema central da mecânica quântica, enquanto a complementaridade apareceria como sua solução filosófica natural. O problema, contudo, é que essa narrativa depende de pressupostos adicionais: a indispensabilidade absoluta dos conceitos clássicos, a recusa de uma ontologia quântica independente e a identificação da objetividade com a descrição dos fenômenos experimentais.

Essa crítica não obriga a rejeitar Bohr. Ela apenas impede que sua interpretação seja tomada como conclusão lógica incontornável da mecânica quântica. A complementaridade pode ser uma resposta coerente à crise dos conceitos clássicos, mas isso não significa que seja a única resposta possível. Outras interpretações, como a teoria de Bohm, as interpretações de colapso objetivo, as leituras estatísticas ou as interpretações de muitos mundos, mostram que o formalismo quântico admite diferentes estratégias ontológicas, ainda que cada uma delas tenha custos próprios.

A literatura secundária²¹ sobre Bohr não é unânime quanto ao estatuto filosófico de sua posição. Enquanto Beller enfatiza o caráter historicamente construído e retoricamente estabilizado da ortodoxia de Copenhague, outros intérpretes procuram reconstruir a filosofia de Bohr como uma tentativa de preservar a objetividade da descrição física sob as condições impostas pela mecânica quântica. Essa diversidade interpretativa é importante porque impede que Bohr seja reduzido tanto a um positivista simples quanto a um realista tradicional. Essas leituras permitem evitar dois extremos. De um lado, não se deve reduzir Bohr a um positivista ingênuo que nega a existência de uma realidade física. De outro, não se deve transformar a complementaridade em uma solução definitiva e inevitável para todos os problemas ontológicos da mecânica quântica. A posição de Bohr é mais sutil: ela preserva a objetividade no nível dos fenômenos experimentalmente definidos, mas suspende ou rejeita a pretensão de descrever o objeto quântico como portador de propriedades independentes das condições de medição.

Para os fins desta dissertação, essa distinção é fundamental. O debate entre Einstein

²⁰ A análise de Beller é mobilizada aqui sobretudo para questionar a pretensão de inevitabilidade da complementaridade e da interpretação de Copenhague. A presente subseção, contudo, não pretende reconstruir sua narrativa histórica, mas integrar essa crítica ao problema central da dissertação: a tensão entre a objetividade fenomenológica de Bohr e a exigência einsteiniana de uma descrição objetiva da realidade física. Para leituras complementares da filosofia de Bohr, ver também Jammer, Howard e Faye

²¹ ver também Jammer, Howard e Faye

e Bohr não deve ser apresentado como oposição simples entre realismo e antirrealismo, mas como conflito entre duas concepções de objetividade. Einstein busca uma realidade objetiva independente da observação, ainda que essa realidade possa ser estrutural e não diretamente acessível. Bohr, por sua vez, desloca a objetividade para a totalidade do fenômeno experimental e para a linguagem clássica que permite comunicar os resultados. A divergência está no estatuto da realidade física para além das condições de observação.

A interpretação de Bohr é, portanto, poderosa porque mostra que a mecânica quântica torna insustentável um realismo clássico simples. Não é mais possível atribuir ao objeto quântico, sem qualificação, todas as propriedades que a física clássica atribuiria a um sistema independente. Mas a insuficiência do realismo clássico não equivale à derrota de todo realismo. A pergunta que permanece é se ainda é possível formular uma concepção de realidade objetiva compatível com a estrutura quântica, sem retornar à ontologia clássica de propriedades locais completas. Essa pergunta prepara a transição para o argumento central da dissertação. Na relatividade, Einstein havia mostrado que a objetividade física pode sobreviver ao abandono de grandezas absolutas, desde que seja reformulada em termos de invariantes. Na mecânica quântica, Bohr sustenta que a objetividade deve ser reformulada em termos de fenômenos e condições experimentais. A questão é saber se essa reformulação bohriana deve ser aceita como limite final da descrição física ou se ainda é possível uma alternativa realista estrutural, capaz de pensar a realidade quântica em termos de estados, correlações e não-separabilidade.

Desse modo, a posição de Bohr deve ser entendida como uma das respostas mais importantes à crise quântica, mas não como encerramento do problema da realidade.

5 A tensão entre dois Einsteins

A análise desenvolvida até aqui permite identificar uma tensão interna no pensamento de Einstein. A tensão examinada nesta dissertação não decorre da noção de invariância em si mesma, tomada como propriedade formal de uma teoria física. Ela emerge quando a invariância é interpretada como indício de objetividade física, isto é, quando as estruturas invariantes ou covariantes passam a ser vistas como candidatas privilegiadas à descrição do que há de objetivo no mundo. Nesse caso, o realismo relativístico de Einstein parece apontar para uma concepção estrutural da realidade, ao passo que o argumento EPR ainda pressupõe uma exigência mais forte de separabilidade: a de que sistemas espacialmente distantes possuam estados reais próprios, completos e independentes.

Tabela 5.1 – Sentidos de invariância

Sentido	Definição	Papel na tese
Formal	Estruturas permanecem estáveis sob transformações admissíveis.	Não implica, por si só, ontologia.
Epistemológico	O invariante permite formular leis objetivas e independentes de descrições particulares.	Serve como critério de objetividade física.
Ontológico	O invariante indica a estrutura objetiva do real.	É uma interpretação filosófica do realismo einsteiniano, não uma doutrina literal explicitamente formulada por Einstein.

De um lado, o Einstein da relatividade restrita abandona grandezas absolutas herdadas da física clássica tais como tempo absoluto, simultaneidade absoluta e repouso privilegiado sem, com isso, abandonar o realismo. Ao contrário, sua estratégia consiste em deslocar a objetividade física para outro nível: o das estruturas invariantes. O real não é aquilo que aparece do mesmo modo em uma descrição particular, nem aquilo que pertence a um referencial privilegiado, mas aquilo que permanece estável através das transformações admissíveis entre referenciais. Nesse sentido, a relatividade não destrói a objetividade, mas a reconstrói em termos estruturais.

De outro lado, o Einstein do debate quântico, especialmente no argumento EPR, parece exigir algo mais próximo de uma ontologia clássica de sistemas separados. Ao criticar a completude da mecânica quântica, Einstein pressupõe que sistemas espacialmente separados devem possuir estados reais próprios, completos e independentes. Essa exigência corresponde ao princípio de separabilidade: o estado real de uma região do espaço não deveria depender do que ocorre em outra região espacialmente distante. A realidade física, nesse quadro, deve ser composta por elementos localmente individuados, ainda que relacionados causalmente

por processos compatíveis com a estrutura relativística do espaço-tempo. A dificuldade surge porque a mecânica quântica, sobretudo nos casos de emaranhamento, parece tensionar essa exigência. O estado de um sistema composto não se decompõe, em geral, em estados completos e independentes de suas partes. A função de onda de sistemas emaranhados possui uma estrutura global que codifica correlações que pertencem ao todo e não podem ser reconstruídas apenas a partir da soma de propriedades locais. Desse modo, se a função de onda for tomada como descrição completa do estado físico, a realidade quântica parece ser objetiva apenas ao preço de não ser separável em sentido forte.

É nesse ponto que emerge a tensão entre dois aspectos do pensamento de Einstein. O realismo de invariantes, desenvolvido no contexto relativístico, parece apontar para uma concepção estrutural da objetividade, mais precisamente, o real é aquilo que se conserva nas transformações e nas relações formais da teoria. Já a crítica einsteiniana à mecânica quântica parece preservar uma exigência mais forte, qual seja, a de que a realidade física seja composta por sistemas espacialmente separados com estados próprios independentes. O primeiro movimento enfraquece os absolutos clássicos em nome de uma estrutura invariante; o segundo parece reintroduzir uma forma robusta de separabilidade como condição da completude física.

A questão central deste capítulo é saber se esses dois compromissos podem ser conciliados. Seria possível interpretar a crítica de Einstein à mecânica quântica como continuação de seu realismo estrutural, ou ela revela uma tensão não resolvida entre sua concepção relativística de objetividade e sua exigência quântica de separabilidade? Em outras palavras, o Einstein da relatividade, para quem a realidade está nos invariantes, é plenamente compatível com o Einstein do EPR, para quem sistemas distantes devem possuir estados reais independentes? A hipótese apontada é que há uma continuidade profunda, mas não uma identidade simples, entre esses dois momentos. Einstein permanece realista em ambos os casos, já que insiste que a física deve descrever uma realidade objetiva independente da observação.

Essa tensão prepara a discussão das próximas seções. Primeiro, será examinada a mecânica quântica como formalismo preditivo e o problema de saber se sua eficácia empírica basta para caracterizá-la como teoria completa. Em seguida, será analisado o estatuto da função de onda e do estado quântico, mostrando como o emaranhamento intensifica a dificuldade de conciliar objetividade e separabilidade. Por fim, a discussão retornará ao EPR, a Bell e à possibilidade de reinterpretar o realismo de Einstein em termos estruturais, isto é, não como defesa de propriedades locais clássicas, mas como exigência de uma descrição objetiva da estrutura física do mundo.

5.1 A mecânica quântica como formalismo preditivo

A mecânica quântica ocupa uma posição peculiar na história da física moderna. De um lado, trata-se de uma das teorias empiricamente mais bem-sucedidas já formuladas. Seu formalismo permite calcular com extraordinária precisão resultados experimentais envolvendo átomos, moléculas, partículas, radiação e sistemas condensados. De outro lado, permanece controverso o modo como esse formalismo deve ser interpretado ontologicamente. A questão não é apenas saber se a teoria funciona, mas se ela fornece uma descrição completa da realidade física. A distinção entre sucesso preditivo e completude ontológica é essencial para esta dissertação. O problema não é negar a eficácia da mecânica quântica, mas perguntar se sua estrutura formal basta para satisfazer a exigência realista que orienta a crítica de Einstein, a saber, uma teoria física deveria representar, ainda que de modo abstrato, a estrutura objetiva responsável pelos fenômenos. Quando a mecânica quântica é apresentada apenas como um procedimento que associa preparações experimentais a probabilidades de resultados, essa exigência parece ficar suspensa.

Maudlin (2019) denomina esse modo de apresentação de “receita quântica”: um conjunto de regras que permite obter previsões, mas que não esclarece, por si só, qual ontologia corresponde ao formalismo. A crítica é útil porque explicita a diferença entre uma teoria entendida como instrumento preditivo e uma teoria entendida como descrição de uma realidade física. Contudo, o interesse desta seção não é simplesmente reproduzir a crítica de Maudlin, mas mostrar como ela retoma, em vocabulário contemporâneo, o problema einsteiniano da completude. Esse é precisamente o ponto em que a crítica de Einstein permanece filosoficamente relevante, uma vez que a física não deveria limitar-se a um procedimento de cálculo, mas oferecer uma descrição inteligível da estrutura objetiva do mundo.

A mecânica quântica padrão pode ser apresentada, em termos gerais, como um conjunto de regras que conectam preparação, evolução formal e previsão estatística. Primeiro, associa-se ao sistema um estado quântico, representado por uma função de onda ou por um vetor em um espaço de Hilbert. Em seguida, especifica-se a dinâmica desse estado, usualmente por meio da equação de Schrödinger. Por fim, aplicam-se regras probabilísticas, como a regra de Born, para extrair previsões sobre resultados possíveis de medição. Essa estrutura é suficiente para a prática experimental comum. Dado um sistema físico, um Hamiltoniano e um conjunto de observáveis, a teoria fornece probabilidades para os resultados que podem aparecer nos aparelhos de medida. Nesse sentido, a mecânica quântica possui uma eficácia operacional incontestável. O problema filosófico começa quando se pergunta se esses elementos matemáticos correspondem a entidades, propriedades ou processos reais.

A função de onda, por exemplo, pode ser tomada de diversas maneiras, tais como representação do estado físico real de um sistema individual, como codificação de informação disponível, como descrição estatística de um conjunto de sistemas igualmente preparados, ou como parte de uma estrutura nomológica mais ampla. A regra de Born, por sua vez,

conecta a função de onda a probabilidades observáveis, mas não decide sozinha se essas probabilidades expressam ignorância, propensões objetivas ou características fundamentais do mundo. Desse modo, a mecânica quântica padrão coloca uma tensão entre formalismo e ontologia. A equação de Schrödinger descreve uma evolução contínua e determinística do estado quântico. A medição, porém, parece introduzir resultados definidos e probabilísticos. Essa diferença entre evolução formal e ocorrência de resultados concretos está na base do problema da medição. A dificuldade não está na capacidade de calcular probabilidades, mas em explicar como o mundo físico produz resultados determinados a partir de uma estrutura formal que admite superposições.

Maudlin (2019) é importante nesse ponto porque insiste que uma teoria física, em sentido forte, deve dizer claramente o que existe e como aquilo que existe se comporta. A mecânica quântica ordinária, segundo sua crítica, fornece um procedimento preditivo extremamente eficaz, mas não satisfaz plenamente essa exigência ontológica se for tomada apenas como receita de cálculo. A presente dissertação utiliza essa crítica como ponto de partida, mas a reinsere em um problema mais amplo, qual seja, a continuidade entre o realismo einsteiniano da relatividade e a crítica de Einstein à incompletude da mecânica quântica.

O que está em jogo é saber se o sucesso formal e estatístico basta para encerrar a discussão sobre a realidade. Para uma leitura inspirada em Einstein, a resposta é negativa. Uma teoria física completa deveria não apenas prever resultados, mas também esclarecer quais estruturas do mundo tornam tais resultados possíveis. A mecânica quântica padrão, quando apresentada apenas como procedimento de cálculo, parece suspender essa exigência. Essa suspensão explica parte do conflito entre Einstein e Bohr.

Conforme Maudlin, termos como observador, medição e aparelho não são completamente precisos nem conceitualmente transparentes. Einstein, de acordo com Pais (1995), questionava a ideia de que o ato de observação pudesse desempenhar um papel constitutivo na determinação da realidade física. Em uma formulação célebre, ele indagou se a Lua deixaria de existir quando não está sendo observada, sugerindo que uma teoria física não deveria fazer depender a existência ou as propriedades dos objetos de atos de observação. Esse tipo de objeção aponta para a necessidade de uma formulação da teoria quântica que não recorra a noções vagas ou antropocêntricas em seus fundamentos.

É nesse contexto que as chamadas interpretações alternativas podem ser mais bem compreendidas como tentativas de formular teorias físicas completas. Por exemplo, na teoria de Bohm, partículas possuem posições bem definidas em todos os momentos, guiadas por uma equação dinâmica precisa dependente da função de onda. Já nas teorias de colapso espontâneo, como o modelo GRW, a dinâmica é modificada por processos estocásticos objetivos que eliminam superposições macroscópicas. Em ambos os casos, há uma tentativa explícita de especificar tanto uma ontologia quanto uma dinâmica bem definidas, de modo

a explicar por que o formalismo quântico padrão é empiricamente bem-sucedido. Assim, o que frequentemente é descrito como um problema meramente interpretativo revela-se, na verdade, uma questão substantiva sobre a própria estrutura de uma teoria física fundamental.

Uma teoria física definida com precisão, nesse sentido, não deve depender, em seus postulados fundamentais, de termos vagos ou contextuais como observação, medição, sistema ou aparelho. Essa exigência pode ser esclarecida à luz da distinção proposta por Carnap (1958) entre linguagem teórica, linguagem observacional e postulados de correspondência. Enquanto termos observacionais pertencem ao domínio da descrição experimental, ou seja, àquilo que pode ser diretamente relatado em situações de laboratório, os postulados fundamentais de uma teoria devem ser formulados em linguagem teórica, especificando de maneira precisa as entidades postuladas e as leis que governam seu comportamento. A conexão entre teoria e experimento deve então ser estabelecida por meio de regras de correspondência bem definidas, e não pela introdução de noções vagas no próprio núcleo da teoria.

Se essa exigência é satisfeita, a teoria fornece uma descrição física unificada de qualquer situação experimental. Um experimento de laboratório não precisa ser tratado como um caso especial, nem exige uma divisão fundamental entre sistema e aparelho, ou um juízo adicional sobre se determinada interação constitui ou não uma medição. Em vez disso, o laboratório como um todo, incluindo instrumentos, ambiente e objetos investigados, é descrito em termos da ontologia da teoria, e sua evolução é determinada pelas leis dinâmicas correspondentes. As previsões experimentais emergem então da aplicação dessas leis a configurações físicas específicas, podendo ser comparadas diretamente com os dados observacionais. Nesse sentido, a necessidade de introduzir categorias especiais como medição no nível fundamental sinaliza não uma virtude, mas uma limitação na formulação da teoria.

O formalismo da mecânica quântica pode ser assim definido:

Uma função de onda $\psi(x)$ é uma função complexa definida sobre o espaço, isto é, ela atribui um número complexo a cada ponto x . Números complexos podem ser representados em termos de amplitude e fase, na forma $Re^{i\theta}$, sendo R o módulo (ou amplitude) e θ a fase.

O módulo ao quadrado de um número complexo é dado por $|Re^{i\theta}|^2 = R^2$. Assim, para a função de onda, o produto

$$\psi^*(x)\psi(x) = |\psi(x)|^2$$

define, em cada ponto do espaço, um número real não negativo.

Diz-se que ψ é quadrado-integrável quando

$$\int |\psi(x)|^2 dx < \infty,$$

condição que caracteriza as funções pertencentes ao espaço L^2 . Nesse caso, ψ pode ser

normalizada, isto é, reescalada de modo que

$$\int |\psi(x)|^2 dx = 1,$$

Dividindo-se a função por $\sqrt{N}$, onde N é o valor da integral original.

Essa condição de normalização permite interpretar $|\psi(x)|^2$ como uma densidade de probabilidade, conforme proposto por *Born*.

As funções de onda podem ser somadas e multiplicadas por números complexos. Uma combinação linear do tipo

$$\varepsilon(x) = c \psi(x) + d \theta(x),$$

com c e d complexos, é chamada de superposição. Essa estrutura linear é central para o formalismo da mecânica quântica.

Devido a essas características ¹, o conjunto de funções de onda forma um espaço vetorial complexo, ou seja, uma coleção de itens que podem ser somados uns aos outros e multiplicados por números complexos. A função especial $0(x)$ é integrável ao quadrado, mas como a integral é zero, ela não pode ser normalizada. Se exigirmos que sistemas físicos sejam associados a funções normalizáveis, $0(x)$ não pode representar nenhum sistema físico. Essa estrutura vetorial será central para o fenômeno de superposição, que desempenha um papel crucial nas dificuldades interpretativas da teoria.

Até aqui, estabeleceu-se apenas que, em determinado instante, o formalismo quântico representa o estado de um sistema físico, por exemplo, um elétron, por meio de uma função de onda complexa normalizada. Essa caracterização, contudo, ainda não basta para constituir uma teoria física completa. Restam três problemas distintos: determinar em que condições um estado quântico deve ser atribuído a um sistema; especificar a lei de evolução desse estado; e indicar como o formalismo se conecta aos resultados experimentais.

Na formulação padrão, esses três níveis nem sempre são apresentados de modo conceitualmente uniforme. A atribuição de estados quânticos, em particular, frequentemente depende de uma descrição clássica do procedimento de preparação. Parte-se de informações sobre o arranjo experimental (colimadores, fontes, filtros, campos, detectores ou condições ideais de preparação) e, a partir delas, associa-se ao sistema uma função de onda apropriada. Assim, quando um arranjo é descrito classicamente como capaz de produzir partículas com momento bem definido, representa-se o sistema, em aproximação, por uma onda plana complexa ².

¹ Para uma apresentação detalhada dessa estrutura, ver, por exemplo, *J. von Neumann, Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (1932) (Neumann, 2018), ou textos introdutórios como *R. Shankar, Principles of Quantum Mechanics*, cap. 1 (Shankar, 2012)

² Uma onda plana complexa é próxima das ondas planas que ocorrem na água. As linhas paralelas na água representam as cristas e os vales das ondas. De forma semelhante, pode-se indicar os pontos em um campo complexo que têm a mesma fase em vez da mesma altura. Em uma onda plana complexa, essas regiões

Esse procedimento é fisicamente eficaz, mas filosoficamente limitado. Ele não fornece, por si só, um princípio geral e independente que explique por que aquele estado quântico, e não outro, deve representar a realidade física do sistema. A atribuição da função de onda permanece ligada a uma ponte entre a descrição clássica da preparação e o formalismo quântico. É precisamente essa dependência que torna a mecânica quântica padrão vulnerável à crítica de que ela opera como um formalismo preditivo extremamente bem-sucedido, mas não como uma teoria ontologicamente transparente.

Maudlin aduz ainda que apesar da analogia entre ondas complexas e ondas na água, há uma diferença crucial que limita o alcance dessa comparação. Ondas na água possuem apenas um grau de liberdade local (a altura da superfície), de modo que sua amplitude varia diretamente no espaço. Assim, o quadrado da amplitude também apresenta variações espaciais, refletindo regiões de maior ou menor intensidade física. Já no caso de ondas complexas, como as funções de onda da mecânica quântica, a situação é distinta, uma vez que a amplitude pode permanecer constante enquanto apenas a fase varia no espaço. Isso significa que $|\psi(x)|^2$ pode ser uniforme, mesmo quando a função de onda apresenta estrutura não trivial. Essa diferença compromete a analogia com ondas clássicas em um ponto fundamental. Em uma onda na água, toda a estrutura física relevante está diretamente ligada à amplitude, que é uma grandeza observável. Em contraste, na mecânica quântica, a fase, que não possui um análogo observável direto, desempenha um papel essencial, por exemplo, em fenômenos de interferência. Assim, dois estados com a mesma amplitude ao quadrado podem produzir comportamentos físicos distintos se suas fases diferirem. Essa limitação torna-se particularmente evidente em situações como o experimento de interferência, nas quais padrões observáveis dependem de diferenças de fase entre componentes da função de onda. Nesses casos, a analogia com ondas clássicas pode ser enganosa, pois sugere que apenas a amplitude carrega significado físico, quando, na verdade, a estrutura de fase é indispensável para a descrição dos fenômenos quânticos. A analogia com ondas clássicas, portanto, é heurística, mas não ontologicamente confiável.

Precisamos, ainda, especificar com precisão o comprimento de onda da chamada onda plana. Vamos usar uma regra que conecta o tratamento clássico de uma situação experimental com o tratamento quântico. A conexão foi fornecida por Louis de Broglie, que formulou esta regra para atribuir um comprimento de onda a partículas com um momento definido:

$$\lambda = h/p$$

Usando a fórmula de de Broglie, podemos associar um tipo definido de função de onda a uma partícula que classicamente teria sido preparada para ter um momento definido, isto

de fase igual formam linhas paralelas. E assim como o comprimento de onda de uma onda na água é determinado pela distância entre cristas ou vales sucessivos, o comprimento de onda de uma onda plana complexa é determinado pela distância entre regiões sucessivas com a mesma fase

é, uma onda plana complexa cujo comprimento de onda é h/p , onde a direção do movimento é ortogonal às regiões de fase constante. Para fazer previsões, também precisamos de uma regra para como essas ondas complexas evoluem no tempo. Agora, consideramos a função de onda como uma função tanto do espaço quanto do tempo

$$\Psi(x,t)$$

A regra para sua variação no tempo é fornecida pela equação de Schrödinger. No contexto não relativístico, a forma abstrata da equação é

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}, t) \right) \Psi(\mathbf{r}, t) \quad (5.1)$$

Assim, a discussão sobre a chamada “receita quântica” deve ser entendida como uma etapa na reconstrução do problema da realidade física. A mecânica quântica mostra que previsão e descrição ontológica podem se separar. A partir daí, a questão filosófica torna-se inevitável: a função de onda e o estado quântico representam algo real ou são apenas instrumentos formais para organizar expectativas experimentais? Essa pergunta conduz diretamente à análise da função de onda, do estado quântico e ao problema EPR.

5.2 A função de onda e o estado quântico

A função de onda é o objeto matemático central da formulação ondulatória da mecânica quântica. Em sua forma mais simples, ela pode ser escrita como $\psi(x,t)$, indicando uma função que depende da posição x e do tempo t . Em três dimensões, escreve-se frequentemente $\Psi(\mathbf{r},t)$, onde $\mathbf{r}$ representa a posição espacial. Do ponto de vista formal, a função de onda associa valores complexos aos pontos de um espaço de configuração. Seu papel físico, porém, não é imediatamente evidente.

A dificuldade interpretativa começa justamente aí. Uma onda clássica, como uma onda na água ou uma onda sonora, é normalmente entendida como perturbação em um meio físico. A função de onda quântica não se encaixa facilmente nesse modelo. Em sistemas com várias partículas, ela não é definida simplesmente no espaço tridimensional comum, mas em um espaço de configuração de dimensão mais alta. Isso torna problemática a interpretação da função de onda como uma onda física ordinária.

A equação de Schrödinger determina a evolução temporal da função de onda. Em sua forma dependente do tempo, para uma partícula não relativística em um potencial V , pode ser escrita como:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\mathbf{r},t)}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r},t) \right] \Psi(\mathbf{r},t).$$

Nessa equação, i é a unidade imaginária, $\hbar$ é a constante de Planck reduzida, m é a massa da partícula, ∇^2 é o operador laplaciano e $V(\mathbf{r}, t)$ representa a energia potencial. O termo entre colchetes corresponde ao Hamiltoniano do sistema, isto é, ao operador associado à energia total. A equação mostra como o estado quântico evolui no tempo.

Essa evolução possui uma característica importante: ela é linear e determinística. Uma vez especificada a função de onda inicial e o Hamiltoniano, a equação de Schrödinger determina a evolução futura do estado. Nesse aspecto, há uma analogia com a física clássica, na qual as equações de movimento determinam a evolução de um sistema a partir de condições iniciais. A diferença decisiva é que, na mecânica quântica, essa evolução não fornece diretamente valores definidos de todas as grandezas físicas observáveis. A conexão entre função de onda e resultados experimentais é feita pela interpretação probabilística de Born. Segundo essa regra, $|\psi(x, t)|^2$ representa a densidade de probabilidade de encontrar a partícula em determinada posição no instante t . Portanto, a função de onda não fornece, por si só, uma trajetória definida da partícula, mas sim fornece amplitudes a partir das quais se obtêm probabilidades de resultados.

Essa diferença entre evolução determinística e resultado probabilístico é uma das fontes do problema da medição. Enquanto a função de onda evolui continuamente segundo a equação de Schrödinger, a experiência apresenta resultados definidos, já que um detector registra uma posição, um contador dispara, uma marca aparece na tela. A teoria, em sua formulação padrão, precisa então articular dois aspectos: a evolução formal do estado e a ocorrência concreta de eventos experimentais.

O conceito de estado quântico é mais amplo que o de função de onda. Em formulações abstratas, o estado pode ser representado por um vetor em um espaço de Hilbert ou, em contextos mais gerais, por um operador densidade. O estado quântico codifica todas as informações relevantes para a geração de previsões probabilísticas acerca do sistema. Mas a questão ontológica permanece: esse estado representa uma propriedade real do sistema ou apenas nosso conhecimento sobre possíveis resultados?

Há diferentes respostas a essa pergunta. Interpretações ψ -ônticas sustentam que a função de onda corresponde, de algum modo, a um elemento real da ontologia física. Interpretações ψ -epistêmicas, por sua vez, entendem a função de onda como representação de informação, conhecimento ou crença acerca do sistema. No interior desse segundo grupo podem ser distinguidas abordagens estatísticas, nas quais a função de onda descreve ensembles de sistemas preparados de modo semelhante, e abordagens credais ou bayesianas, nas quais o estado quântico expressa graus de crença racional de um agente. Há ainda interpretações nomológicas, segundo as quais a função de onda desempenha papel semelhante ao de uma lei, estruturando a dinâmica dos sistemas físicos sem ser ela própria um objeto material

ordinário.³

Essas alternativas mostram que a função de onda não possui significado ontológico unívoco. O formalismo é comum, mas as interpretações divergem quanto ao que ele representa. Para a presente dissertação, essa pluralidade é importante porque impede que se identifique automaticamente o sucesso matemático da mecânica quântica com uma única imagem metafísica da realidade. O formalismo pode ser operacionalmente estável e, ao mesmo tempo, filosoficamente aberto. O estado quântico também introduz uma dificuldade adicional, a saber, a não-separabilidade. Em sistemas compostos, especialmente em estados emaranhados, o estado do todo não é redutível aos estados individuais das partes. Isso significa que a descrição quântica pode atribuir ao sistema composto uma estrutura global que não se decompõe em propriedades locais independentes. Essa característica será decisiva para o argumento EPR e para a discussão posterior do teorema de Bell.

Do ponto de vista da tese da dissertação, a função de onda e o estado quântico devem ser tratados como pontos de tensão entre predição e realidade. A mecânica quântica fornece um formalismo capaz de prever resultados com enorme precisão, mas esse formalismo não decide sozinho se a realidade fundamental é composta por partículas, campos, estados globais, relações, disposições ou estruturas. É precisamente essa lacuna interpretativa que permite compreender a crítica de Einstein de que a teoria pode estar correta enquanto instrumento preditivo e, ainda assim, ser incompleta como descrição da realidade objetiva. Portanto, a pergunta sobre a função de onda não é apenas técnica. Ela é filosófica. Se a função de onda é real, então a realidade quântica pode ser profundamente não clássica e talvez não separável. Se ela é apenas epistêmica, então a teoria não descreve diretamente a realidade, mas nosso conhecimento sobre ela. Se ela é nomológica, então a ontologia física pode residir em entidades locais, enquanto a função de onda desempenha papel estrutural ou legal. Cada uma dessas possibilidades implica uma resposta diferente ao problema do realismo.

O argumento de Einstein, Podolsky e Rosen parte justamente da suspeita de que a função de onda não fornece uma descrição completa do estado real de sistemas físicos separados. Se a mecânica quântica atribui um único estado global a sistemas espacialmente distantes, mas não fornece estados locais completos para cada parte, então surge a questão: a teoria está revelando uma realidade não separável ou apenas deixando de representar elementos de realidade que deveriam existir? Essa é a tensão central da discussão.

Como John Bell (Bell, 2004, p.214) insistiu:

³ A distinção entre teorias ψ -ônticas e ψ -epistêmicas foi sistematizada por Harrigan e Spekkens (Harrigan; Spekkens, 2010). A interpretação estatística ou de ensemble foi desenvolvida classicamente por Ballentine (Ballentine, 1970), embora tenha antecedentes importantes em Einstein. Para restrições recentes às interpretações ψ -epistêmicas, ver Pusey, Barrett e Rudolph (Pusey; Barrett; Rudolph, 2012). Sobre a abordagem bayesiana ou credal, especialmente no contexto do QBism, ver Fuchs e Schack (Fuchs; Schack, 2013). Para a leitura nomológica da função de onda, sobretudo no contexto da mecânica bohmiana, ver Dürr, Goldstein e Zanghì (Dürr; Goldstein; Zanghì, 1997).

Ordinary quantum mechanics is just fine for all practical purposes ⁴.

Tabela 5.2 – EPR

Tipo de teoria	O que ψ representa	Objeto da teoria	Compromisso ontológico
ψ -ôntica	Estado físico real	Sistemas individuais	Forte (realismo direto)
ψ -estatística	Propriedades estatísticas	Conjuntos (ensembles)	Moderado (realismo indireto)
ψ -credal	Crenças/informação do agente	Agentes e suas expectativas	Fraco (antirrealismo ou subjetivismo)

Que tipo de questões substantivas sobre a natureza do estado quântico permanecem relevantes, mesmo que se deixe em aberto sua categoria ontológica? Muitas questões técnicas e conceituais continuam disponíveis. Entre as mais importantes estão aquelas que dizem respeito à relação entre a função de onda (o objeto matemático central da formalização quântica) e o estado quântico. Por exemplo, pode-se perguntar quais graus de liberdade matemáticos da função de onda correspondem a graus de liberdade físicos reais. Sabe-se que a multiplicação da função de onda por uma fase global não altera qualquer previsão empírica. Isso sugere que tal fase não corresponde a um grau de liberdade físico do estado quântico, indicando que a representação matemática contém elementos redundantes do ponto de vista físico.

Outra questão diz respeito à individuação de estados quânticos. O fenômeno do emaranhamento, isto é, a existência de estados compostos que não podem ser fatorados como o produto de estados de subsistemas, desempenha aqui um papel central. Quando dois sistemas estão emaranhados, não é possível atribuir-lhes estados quânticos independentes, já que apenas o sistema composto possui uma descrição completa. Considerando a ubiquidade das interações físicas, que tendem a gerar emaranhamento, surge a hipótese de que apenas o universo como um todo possui, em sentido estrito, um estado quântico bem definido.

Aqui, retornamos à questão da inevitabilidade proposta pela interpretação de Copenhague. Niels Bohr, em seus escritos, frequentemente enfatizava a inevitabilidade de certos limites conceituais, especialmente no que diz respeito à possibilidade de uma descrição espaço-temporal e causal completa dos fenômenos quânticos. Essa atitude pode ser interpretada como uma forma de ceticismo quanto à viabilidade de uma teoria mais fundamental que ultrapasse o nível de correlação entre resultados experimentais. Nesse sentido, o sucesso empírico da mecânica quântica, aliado à autoridade intelectual de seus principais proponentes, contribuiu para a consolidação de uma postura que, ao menos temporariamente, desencorajou a busca por alternativas ontologicamente mais robustas. A história subsequente da física quântica sugere, no entanto, que essa conclusão pode ter sido prematura.

De acordo com Beller (1999), tais argumentos de inevitabilidade são meros argumentos disfarçados de consistência. A resistência da oposição a essa técnica de argumentação e sua

⁴ A mecânica quântica padrão é perfeitamente adequada para todos os fins práticos

subsequente rejeição da filosofia de Copenhague são, portanto, razoáveis, e não conservadoras, como frequentemente afirmaram os adeptos da ortodoxia de Copenhague. Os físicos de Copenhague usaram seus argumentos de inevitabilidade para demonstrar a impossibilidade de uma descrição determinística independente do observador no domínio quântico. A retórica da inevitabilidade foi especialmente perturbadora, como J. S. Bell mencionou, após a década de 1950, quando David Bohm forneceu precisamente o tipo de descrição que os físicos de Copenhague supostamente haviam descartado “em princípio”.

Conforme Beller (1999, p. 194):

“De uma certa perspectiva, a posição de que a teoria quântica é fundamentalmente acausal pode parecer natural e legítima. Se nossa melhor teoria científica é *ipso facto* acausal, que razão, além de uma crença a priori injustificada na causalidade clássica, incitaria os físicos a buscarem uma versão causal? Afinal, muitos físicos, incluindo o próprio Bohm, consideraram o determinismo nem indispensável nem atraente. O argumento de Heisenberg – de que, se os físicos estão convencidos da correção da teoria quântica, construída sobre fundamentos probabilísticos, então eles devem aceitar a acausalidade – é um exemplo característico de um tipo legítimo de raciocínio que Arthur Fine chamou de “enteorização”. A questão metafísica de saber se uma determinada propriedade é uma propriedade do nosso mundo se traduz na questão de saber se uma teoria que implica essa propriedade é frutífera ou correta. No entanto, tal enteorização sóbria é rara. Os escritos de Copenhague, incluindo os de Heisenberg, estão carregados da retórica pesada da finalidade, da inevitabilidade da acausalidade, da impossibilidade de uma alternativa causal.”

Esse diagnóstico histórico pode ser articulado de maneira mais precisa à luz do indispensabilismo na tradição naturalista da filosofia da ciência. Na versão clássica defendida por W. V. O. Quine (Quine, 1951) e Hilary Putnam (Putnam, 1971), o compromisso ontológico de uma teoria deve ser determinado por aquilo que é indispensável às nossas melhores descrições científicas do mundo. Nesse quadro, questões metafísicas tradicionais são internalizadas na prática científica, pois perguntar o que existe equivale a perguntar o que nossas melhores teorias exigem que exista. É precisamente esse tipo de raciocínio que aparece naquilo que Arthur Fine (Fine, 1996) denominou “enteorização” e que é mobilizado, de forma paradigmática, nos argumentos de Werner Heisenberg. Se a mecânica quântica, enquanto teoria empiricamente bem-sucedida, é formulada em termos probabilísticos, então, argumenta-se, deve-se aceitar a acausalidade como uma característica do mundo físico. Nesse sentido, a estrutura ontológica da realidade é inferida diretamente da estrutura formal da teoria.

Contudo, como a análise histórica sugere, os proponentes da interpretação de Copenhague frequentemente ultrapassaram essa forma moderada de indispensabilismo. Em vez de sustentar apenas que a acausalidade é uma consequência da melhor teoria disponível, passaram a defendê-la como uma característica inevitável de qualquer teoria possível. Essa transição, da indispensabilidade teórica para a inevitabilidade metafísica, constitui um passo filosoficamente problemático. O indispensabilismo, em sua formulação original, é essencialmente falibilista e revisável, já que depende do estado atual da ciência e permanece aberto à revisão diante de novas teorias. O desenvolvimento posterior da física quântica permite distinguir com mais precisão duas teses que frequentemente apareceram confundidas na defesa da interpretação de Copenhague. A primeira é uma tese formal, qual seja, a mecânica quântica impõe limites à atribuição simultânea de certos pares de grandezas, como posição e momento, e fornece apenas previsões probabilísticas para os resultados de medição. A segunda é uma tese filosófica mais forte: tais limites demonstrariam a impossibilidade de qualquer descrição causal ou ontológica mais profunda dos processos quânticos.

A passagem da primeira tese para a segunda não é automática. O fato de o formalismo quântico padrão não atribuir trajetórias definidas ou valores simultâneos a determinadas grandezas não implica, por si só, que tais elementos sejam logicamente impossíveis em toda teoria física empiricamente adequada. Implica apenas que eles não pertencem à formulação ortodoxa da teoria. A diferença entre ausência em uma formulação e impossibilidade em princípio é filosoficamente decisiva. A teoria de David Bohm (1952) tornou essa distinção especialmente clara. Ao formular uma interpretação determinística e causal da mecânica quântica, Bohm mostrou que a acausalidade não era consequência lógica inevitável do sucesso empírico da teoria quântica. Naturalmente, sua proposta tem custos teóricos importantes, sobretudo o abandono da localidade em sentido forte. Ainda assim, ela demonstra que a escolha não era simplesmente entre a formulação de Copenhague e a impossibilidade de qualquer ontologia quântica alternativa. Esse ponto é relevante para avaliar a retórica de inevitabilidade associada à ortodoxia quântica. A interpretação de Copenhague frequentemente apresentou a incerteza, a complementaridade e a renúncia a uma descrição causal como se fossem exigências lógicas do próprio formalismo. No entanto, é preciso distinguir entre uma interpretação consistente com a mecânica quântica e uma interpretação necessariamente imposta por ela.

Beller é importante precisamente por chamar atenção para essa passagem problemática entre consistência e inevitabilidade. Sua crítica historiográfica mostra que a consolidação da interpretação de Copenhague não resultou apenas de sua eficácia empírica, mas também de estratégias de legitimação filosófica. Entre essas estratégias estava o uso de uma linguagem operacional segundo a qual conceitos como posição, momento, trajetória ou causalidade só teriam sentido quando vinculados a procedimentos possíveis de medição. O operacionalismo desempenhou, assim, uma função ambígua. Por um lado, ele permitiu esclarecer os limites

de aplicação dos conceitos clássicos no domínio quântico. Por outro lado, quando usado de maneira forte, tornou possível converter limitações de mensuração em teses ontológicas: aquilo que não pode ser medido em certo arranjo passaria a ser tratado como algo sem realidade física determinada. Essa passagem é filosoficamente controversa, pois transforma um critério metodológico de uso conceitual em uma conclusão sobre a estrutura do mundo.

Grete Hermann (2017) já havia chamado a atenção para uma distinção semelhante ao separar causalidade e previsibilidade. O fato de a teoria quântica impedir previsões determinísticas completas não implica, por si só, a eliminação da causalidade. Sua análise mostra que uma limitação epistêmica não deve ser imediatamente convertida em conclusão ontológica.

Jammer (1974) também mostra que a formação da interpretação de Copenhague não foi um processo linear ou conceitualmente homogêneo, mas resultado de debates nos quais diferentes sentidos de causalidade, observabilidade e realidade foram postos em disputa.

A crítica de Bohm (1952) reforça essa objeção. Se uma teoria causal alternativa pode reproduzir as previsões da mecânica quântica, ainda que ao preço de aceitar uma forma de não-localidade, então a impossibilidade de uma teoria causal não pode ser simplesmente deduzida da própria existência das relações de incerteza. A incerteza mostra uma restrição formal e experimental da descrição quântica ortodoxa, não demonstrando, sozinha, que toda ontologia causal seja impossível.

Desse modo, o problema não é negar a força da interpretação de Copenhague. Ela ofereceu uma resposta coerente e historicamente influente à crise dos conceitos clássicos, ao mostrar que no domínio quântico não se pode simplesmente transportar, sem restrições, noções como posição, momento, trajetória e causalidade. O ponto controverso está em sua pretensão de inevitabilidade. A interpretação de Copenhague pode ser compreendida como uma estratégia bem-sucedida de estabilização conceitual da mecânica quântica, mas não como prova definitiva de que todo realismo causal ou ontológico deva ser abandonado.

É nesse sentido que a advertência de Weizsäcker é relevante. A impossibilidade de observar simultaneamente valores precisos de posição e momento não deve ser confundida com a tese pseudopositivista de que “aquilo que não pode ser observado não existe”. O ponto é mais sutil: a observabilidade é condicionada pela própria estrutura conceitual da teoria. Aquilo que não pode ser formulado como objeto possível dentro de uma teoria tampouco pode ser observado em um experimento descrito por essa mesma teoria.⁵ Essa formulação evita tanto o realismo clássico ingênuo quanto o operacionalismo forte: não se trata de identificar imediatamente o real ao observável, mas de reconhecer que a própria

⁵ C. F. von Weizsäcker argumenta contra o positivismo ingênuo ao sustentar que a observabilidade é condicionada pela estrutura teórica: apenas aquilo que pode ser incorporado ao quadro conceitual de uma teoria pode ser objeto de observação em experimentos descritos por essa teoria. Ver Weizsäcker, *The Unity of Nature* (1980)

possibilidade de observação depende de uma estrutura teórica prévia.

Essa distinção preparou a passagem para o argumento EPR. Einstein não contestava o sucesso preditivo da mecânica quântica, nem ignorava a necessidade de revisar conceitos clássicos no domínio atômico. O que ele rejeitava era a identificação entre sucesso formal, coerência operacional e completude ontológica. Para ele, uma teoria poderia fornecer todas as previsões corretas e, ainda assim, deixar sem resposta a questão de saber se descreve um estado real de coisas independente dos procedimentos de medição. O EPR nasce precisamente dessa exigência ao perguntar se a mecânica quântica, apesar de empiricamente adequada, oferece uma descrição completa da realidade física.

É aqui que o problema retorna ao eixo central desta dissertação. Na relatividade, Einstein havia reformulado a objetividade física deslocando-a dos absolutos clássicos para estruturas invariantes ou covariantes. Essa reformulação não significava abandono do realismo, mas redefinição de seus critérios. No debate quântico, porém, Einstein passa a exigir que sistemas espacialmente separados possuam estados reais próprios e independentes. Assim, a passagem para o EPR permite examinar a tensão entre dois aspectos de seu pensamento: de um lado, o Einstein que aceita a reformulação estrutural da objetividade; de outro, o Einstein que, diante da mecânica quântica, preserva uma exigência forte de separabilidade. A questão que se coloca, portanto, é se o realismo de invariantes reconstruído a partir da relatividade pode ser compatibilizado com a crítica einsteiniana à completude da mecânica quântica.

5.3 Invariantes e EPR

O que chamamos de realismo de invariantes em Albert Einstein? Por realismo de invariantes entende-se, em termos gerais, como sugerido por Einstein, Hermann Weyl e posteriormente por leituras estruturalistas contemporâneas, a tese de que o conteúdo ontológico objetivo de uma teoria física é dado por suas quantidades invariantes sob o grupo de simetrias relevante. Nesse sentido, o que é fisicamente real não são objetos considerados isoladamente, mas estruturas que permanecem inalteradas sob transformações admissíveis da teoria.⁶

Essa perspectiva torna mais sutil a noção de separabilidade. No contexto das críticas de Einstein à mecânica quântica, especialmente no argumento EPR (Einstein; Podolsky; Rosen, 1935), separabilidade é tipicamente entendida como a tese de que sistemas espacialmente distintos possuem estados próprios independentes, isto é, o que ocorre em uma região do espaço não deve depender do que é feito simultaneamente em outra região dis-

⁶ Ver, por exemplo, Hermann Weyl, *Philosophy of Mathematics and Natural Science* (1949); Albert Einstein, *Relativity: The Special and the General Theory* (1916/1920); e leituras estruturalistas contemporâneas como James Ladyman e Don Ross, *Every Thing Must Go* (2007).

tante. No entanto, quando essa ideia é reinterpretada à luz de um realismo de invariantes, particularmente no contexto da relatividade, ela não precisa ser formulada em termos de “estados intrínsecos de objetos”, mas sim em termos de estruturas fisicamente significativas associadas a regiões do espaço-tempo.

Nessa reformulação, a realidade física pode ser entendida como localmente estruturada. Isso significa, de forma mais concreta, que a cada região do espaço-tempo podemos associar certas quantidades invariantes, por exemplo, grandezas geométricas ou campos, que caracterizam fisicamente essa região. Essas quantidades não dependem de uma decomposição em objetos independentes (como partículas com propriedades próprias), mas são definidas diretamente como aspectos da estrutura física local. Ao mesmo tempo, essas estruturas locais não são completamente independentes entre si, mas estão sujeitas a restrições globais, tais como leis físicas, simetrias e condições de contorno, que determinam quais configurações locais são possíveis. Por exemplo, na relatividade geral, a geometria local do espaço-tempo em uma região depende, através das equações de campo, da distribuição de matéria e energia em outras regiões. Isso indica uma forma de dependência global, mas não implica que apenas o todo exista.

O resultado é uma posição intermediária, uma vez que há um tipo de holismo estrutural ou nomológico, no qual leis e simetrias globais desempenham um papel constitutivo, porém sem eliminar a possibilidade de distinguir regiões do espaço-tempo por meio de suas propriedades locais. Regiões não são ontologicamente independentes no sentido forte, mas permanecem descritivamente identificáveis, pois possuem estrutura física própria. Dessa forma, a exigência einsteiniana de que a realidade seja espacialmente articulada, isto é, que possamos atribuir conteúdo físico a regiões distintas, pode ser preservada, desde que não se insista que esse conteúdo consista em estados intrínsecos completamente independentes. Em vez disso, o que há são estruturas locais invariantes, cuja existência é compatível com correlações e restrições globais impostas pela teoria.

Para tornar essa discussão mais precisa, é útil distinguir explicitamente duas noções de separabilidade. Em primeiro lugar, há uma separabilidade forte, associada à leitura tradicional do argumento EPR, segundo a qual o estado físico completo de uma região composta é inteiramente determinado pelos estados físicos completos de suas sub-regiões espacialmente disjuntas. Essa formulação implica não apenas a possibilidade de descrição separada, mas uma independência ontológica robusta, já que cada região possui um estado próprio completo e o estado do todo resulta da composição desses estados.

Em segundo lugar, há uma noção mais fraca, que pode ser chamada de separabilidade metodológica, desenvolvida em leituras alternativas por autores como Don Howard, Arthur Fine e Carsten Held.⁷ Nessa interpretação, a separabilidade não é uma tese sobre

⁷ Ver, por exemplo, Don Howard, “Holism, Separability, and the Metaphysical Implications of the Bell Experiments” (1985); Arthur Fine, *The Shaky Game* (1986); Carsten Held, “The Kochen-Specker Theorem”

a constituição ontológica última do mundo, mas uma condição de objetividade científica, isto é, exige-se apenas que fatos físicos em uma região possam ser descritos sem referência essencial a operações realizadas em regiões espacialmente separadas. Trata-se, portanto, de uma restrição sobre a forma da descrição física, e não sobre a independência ontológica dos sistemas.

A diferença entre essas duas noções pode ser ilustrada por meio de sistemas quânticos emaranhados. Em tais sistemas, o estado global não pode ser decomposto em estados locais independentes, o que viola a separabilidade forte. No entanto, ainda é possível atribuir a cada região certos invariantes locais tais como valores esperados de observáveis definidos localmente cuja definição não depende de intervenções em regiões distantes. Nesse sentido, a separabilidade metodológica pode ser preservada mesmo quando a separabilidade forte falha. Isso mostra por que a separabilidade metodológica é uma exigência mais fraca, pois ela não requer a fatoração do estado global nem a existência de estados locais completos, mas apenas a autonomia descritiva local. Ao mesmo tempo, ela é mais forte do que a mera condição de não sinalização, pois não se limita a proibir a transmissão superluminal de informação, exigindo também que a própria descrição física de uma região não dependa constitutivamente de escolhas externas arbitrárias.

À luz dessa distinção, a tensão histórica no pensamento de Einstein pode ser reformulada com maior precisão. Por um lado, sua prática na relatividade sugere um compromisso com um realismo de invariantes, que favorece uma ontologia estrutural e admite formas de dependência global. Por outro lado, no contexto do argumento EPR, ele parece exigir uma forma forte de separabilidade, baseada na existência de estados locais completos e independentes. A leitura metodológica da separabilidade oferece, portanto, uma via de reconciliação já que preserva a exigência einsteiniana de objetividade local sem entrar em conflito direto com o tipo de ontologia estrutural sugerido pelo realismo de invariantes.

O problema, porém, é que o argumento EPR parece precisar de algo mais forte. O passo inferencial do EPR é:

1. (1) Medições diferentes em A permitem prever com certeza resultados em B
2. (2) Logo, esses resultados correspondem a elementos de realidade em B
3. (3) Logo, o estado quântico é incompleto

O passo crucial é a passagem de (1) para (2). É aqui que entra o chamado critério de realidade do artigo de Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen: se podemos prever com certeza o valor de uma grandeza física sem perturbar o sistema, então essa grandeza corresponde a um elemento de realidade.⁸

(2012)

⁸ Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen, “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?” (1935) (Einstein; Podolsky; Rosen, 1935)

No entanto, para que essa inferência seja válida, é necessário assumir que a escolha de medição em A não afeta ontologicamente o sistema B. Ou seja, é preciso supor que B já possui valores definidos para as grandezas em questão independentemente do que é feito em A. Essa é precisamente uma suposição de separabilidade ontológica forte (combinada com localidade), pois os estados físicos de regiões espacialmente separadas são completos e independentes.

Uma ilustração concreta ajuda a tornar esse ponto mais claro. Considere um par de partículas emaranhadas preparado de modo que a medição do momento em A permita prever com certeza o momento em B, enquanto a medição da posição em A permita prever com certeza a posição em B. De acordo com (1), temos duas possibilidades de previsão perfeita. Pelo critério EPR, isso sugere que tanto a posição quanto o momento de B correspondem a elementos de realidade. Mas esse resultado só segue se assumirmos que a escolha de qual grandeza medir em A não altera o estado físico de B. Caso contrário, a previsão em B poderia depender da escolha feita em A, e não refletir propriedades previamente existentes em B. Em outras palavras, sem uma suposição de independência ontológica entre A e B, a passagem de (1) para (2) falha.

Uma vez estabelecido (2), o passo para (3) é mais direto: a mecânica quântica não atribui simultaneamente valores definidos a grandezas incompatíveis (como posição e momento). Portanto, se tais valores existem, como exige (2), a função de onda não pode ser uma descrição completa da realidade física. Dessa forma, o peso do argumento EPR recai fundamentalmente sobre a inferência de (1) para (2), que exige uma noção robusta de independência ontológica entre sistemas espacialmente separados. É nesse sentido que o argumento pressupõe uma forma forte de separabilidade. A separabilidade metodológica assim entendida apenas como autonomia descritiva local não é suficiente para sustentar essa inferência, pois ela não garante que os valores atribuídos a B existam independentemente das escolhas realizadas em A.

Há aqui uma tensão interna real no pensamento de Einstein. Don Howard argumenta que Einstein não exige separabilidade ontológica forte, mas apenas separabilidade descritiva e localidade causal. O erro, segundo ele, estaria em ler EPR com categorias posteriores a Bell. Contudo, essa leitura enfraquece demais o argumento EPR e transforma-o quase em um argumento epistemológico. Bell considerou a interpretação de Howard evasiva. Para Bell, qualquer leitura que preserve localidade, rejeite não-localidade e enfraqueça separabilidade, está mudando o problema, não resolvendo-o.

Bell (1964)[p.195] formula explicitamente o que ele entende por localidade:

“It is the requirement of locality, or more precisely that the result of a measurement on one system be unaffected by operations on a distant system with which

it has interacted in the past.⁹

Bell interpreta isso como independência ontológica de resultados, não apenas independência descritiva. Para Bell, se os resultados não estão definidos independentemente, então a teoria já é não-local, mesmo que não haja sinalização. Em “The theory of local beables”, (Bell, 1975), ele aduz que a localidade, nesse sentido, exige que os beables associados a uma região não dependam das configurações experimentais escolhidas em uma região espacialmente separada¹⁰.

Bell exige beables localizados e dependência contrafactual (violação de localidade)¹¹. Uma separabilidade apenas descritiva não basta, uma vez que se o estado de uma região depende do que ocorre em outra, a teoria é não local. Se as correlações não são explicadas por causas locais, a teoria é não local, independentemente da linguagem usada. Ele insiste que Einstein queria estados reais locais, não apenas descrições locais. A leitura de Howard, se correta, faria Einstein cometer um erro lógico trivial no EPR, algo que Bell considera implausível.

Qual seria o ideal explicativo para Einstein? Parece-nos que ele adotou um conjunto de exigências:

1. Um realismo forte no qual a física deve descrever um mundo independente do observador;
2. inteligibilidade racional em que o mundo deve ser compreensível por meio de princípios simples e unificadores;
3. localidade, qual seja, ausência de ações à distância e estrutura espaço-temporal como arena causal;
4. continuidade e completude, isto é, desconfiança de saltos, colapsos e eventos especiais, bem como preferência por dinâmicas contínuas e globais;
5. objetividade via invariantes em que é real o que permanece invariante sob simetrias.

⁹ Trata-se da exigência de localidade, ou, mais precisamente, de que o resultado de uma medição realizada sobre um sistema não seja afetado por operações efetuadas sobre um sistema distante com o qual aquele sistema interagiu anteriormente (tradução nossa)

¹⁰ Por beables, Bell entende os elementos da teoria que correspondem ao que efetivamente existe, e não apenas ao que pode ser observado ou medido. O termo é introduzido justamente em oposição a observables, pois Bell considera inadequado que uma teoria física fundamental tenha a noção de medição como conceito primitivo

¹¹ Por dependência contrafactual entende-se, em sentido técnico na metafísica e na filosofia da física, a relação segundo a qual o resultado de um evento depende não apenas do que de fato ocorreu, mas também do que ocorreria sob condições alternativas não realizadas. No contexto do teorema de Bell, isso significa avaliar se o resultado de uma medição em uma região *A* variaria caso, contrafactualmente, a configuração experimental em uma região espacialmente separada *B* fosse diferente, mantendo-se fixas todas as demais condições relevantes (incluindo eventuais variáveis ocultas). Uma teoria viola a localidade nesse sentido se o resultado em *A* depende dessas variações contrafactuais em *B*. Essa noção pode ser formalizada em termos de independência de parâmetros e fatoração probabilística das distribuições de resultados

Em um primeiro momento, o realismo de Einstein na relatividade parece aproximar-se de uma forma de realismo estrutural. Tal realismo entende-se relações fundamentais sem relata, estruturas como primitivas ontológicas e objetos como derivados ou elimináveis. Essa estrutura oferece realismo sem observador, ênfase em simetrias e invariantes, compatibilidade com não-separabilidade, continuidade conceitual com teorias de campo. No caso do realismo de invariantes de Einstein, o encaixe seria quase perfeito, já que para ele somente quantidades invariantes têm significado objetivo. O realismo estrutural toma isso literalmente, uma vez que a realidade é igual à estrutura invariante e as coordenadas e observáveis dependentes do contexto são secundários. Tal estrutura também rejeita colapsos subjetivos e observadores como fundamentais, além de ter estruturas globais explicando regularidades e unificando domínios. São pontos extremamente alinhados com o pensamento de Einstein.

Contudo, essa aproximação não é isenta de tensões. Um realismo estrutural, especialmente em versões que atribuem primazia a estruturas globais, tende a admitir correlações fundamentais que não se reduzem a interações locais mediadas no espaço-tempo. Em contextos quânticos, por exemplo, estruturas globais (como estados emaranhados) parecem introduzir correlações que não podem ser explicadas por mecanismos causais localizados. É nesse sentido que surge a tensão, pois o realismo estrutural, ao admitir dependências globais como fundamentais, pode enfraquecer a exigência einsteiniana de que toda dependência física relevante seja mediada por processos locais no espaço-tempo.

Assim, o ponto de atrito não é com o realismo de invariantes em si, mas com certas extensões estruturalistas que interpretam a estrutura global como ontologicamente primária. Isso entra em conflito com o ideal de localidade de Einstein, segundo o qual explicações físicas devem envolver cadeias causais espaço-temporalmente contínuas. Einstein não rejeitava correlações, mas rejeitava que elas fossem tomadas como fundamentais sem uma mediação causal subjacente. Quanto ao papel da separabilidade, há de fato uma ambiguidade importante. Por um lado, Einstein frequentemente a trata como uma condição quase transcendental para a inteligibilidade física, isto é, sem a possibilidade de tratar regiões como relativamente independentes, a própria prática de decompor e analisar sistemas físicos se tornaria inviável. Nesse sentido, a separabilidade tem um papel metodológico forte, o que a aproxima de uma leitura epistêmica ou heurística.

Por outro lado, no contexto do argumento EPR, Einstein parece exigir mais do que isso, já que ele pressupõe que sistemas espacialmente separados possuem estados próprios completos e independentes, isto é, uma forma de separabilidade ontológica forte. Isso sugere que Einstein não distingue rigidamente entre os níveis metodológico e ontológico, uma vez que a separabilidade funciona simultaneamente como condição de possibilidade da descrição física e como hipótese sobre a estrutura do mundo. Por fim, é importante notar que, embora o realismo de invariantes privilegie estruturas, Einstein não adota uma ontologia puramente eliminativista de objetos. Sua linguagem permanece comprometida com entidades como

campos, eventos e distribuições de matéria no espaço-tempo. Assim, a convergência com o realismo estrutural é parcial e assimétrica, já que Einstein antecipa a centralidade das invariantes e das estruturas, mas não abandona completamente uma ontologia de “coisas” no espaço-tempo. Uma ontologia puramente estrutural captura o espírito matemático e invariância de Einstein, mas sacrifica seu compromisso com explicação causal local e inteligibilidade concreta. O ideal explicativo de Einstein é melhor realizado por um estruturalismo com portadores físicos, não por uma ontologia sem relata. A realidade é estrutural, mas não vazia.

Existe alguma forma de conciliar separabilidade forte com realismo de invariantes? Parece que sim, mas apenas ao custo de enfraquecer profundamente o conteúdo ontológico da separabilidade ou de deslocá-la para um nível não fundamental. O que exatamente queremos conciliar?

a) Separabilidade forte (Einstein) em formulação canônica: o estado completo de uma região (A) é determinado exclusivamente por fatos em (A), independentemente de regiões espacialmente separadas. Isto implica estados locais completos, composição mereológica do todo e independência ontológica entre regiões disjuntas.

b) Realismo de invariantes: o compromisso central é que as estruturas reais são invariantes sob o grupo de simetrias relevante. Implica relacionalidade fundamental, dependência de estruturas globais e rejeição de ontologias coordenadas ou perspectivais.

O problema central seria que invariantes físicos fundamentais são, em geral, globais; separabilidade exige determinação local completa. Se os invariantes são a realidade e os invariantes não são localmente fatoráveis, então a realidade não é separável. Esse é o núcleo do problema do EPR reinterpretado estruturalmente.

Existem quatro possíveis estratégias de conciliação a serem discutidas ¹².

A primeira hipótese seria uma separabilidade por invariantes locais, ou seja, definir realidade apenas por invariantes localmente definidos, tais como invariantes de gauge locais ou operadores locais. O problema é que invariantes genuínos (holonomia, entanglement entropy, topologia) não se decompõem e em QFT, álgebras locais não determinam o estado

¹² As estratégias de conciliação aqui esboçadas não correspondem a uma única formulação sistemática em um texto específico, mas sintetizam linhas de resposta desenvolvidas na literatura contemporânea em fundamentos da física e filosofia da física. A ideia de reconstruir a realidade a partir de estruturas locais (por exemplo, álgebras de observáveis associadas a regiões do espaço-tempo) é central na teoria quântica de campos algébrica; ver, por exemplo, Haag, *Local Quantum Physics* (1996) (Haag, 2012). As dificuldades associadas à não fatorabilidade de estados e à insuficiência de álgebras locais para determinar o estado global estão ligadas a resultados como o teorema de Reeh–Schlieder. A relevância de invariantes globais, como holonomias em teorias de gauge e propriedades topológicas, é amplamente discutida na literatura sobre teorias de gauge e gravidade; ver, por exemplo, Earman (1989) (Earman, 1989) e Belot (1998) (Belot, 1998). Já a interpretação estrutural e o papel de dependências globais são explorados em abordagens de realismo estrutural, como em Ladyman e Ross, *Every Thing Must Go* (2007) (Ladyman; Ross, 2007). Assim, as “estratégias” aqui apresentadas devem ser entendidas como reconstruções conceituais que articulam e combinam esses desenvolvimentos, e não como uma taxonomia estabelecida de forma unívoca na literatura

global.

A segunda opção seria a separabilidade como tese epistemológica, já exposta anteriormente. Separabilidade seria diferente de ontologia compatível com um realismo de invariantes, porém não satisfaz a exigência ontológica de Einstein. Seria uma conciliação conceitual, não metafísica.

A terceira opção consiste em interpretar a separabilidade como uma propriedade emergente. A separabilidade valeria em níveis efetivos. Nesse contexto, dizer que a separabilidade vale em níveis efetivos significa que ela se aplica em descrições aproximadas do mundo, tipicamente em escalas macroscópicas ou regimes nos quais certos graus de liberdade são negligenciados, mas não à estrutura fundamental da teoria. Em outras palavras, trata-se de uma propriedade válida em teorias efetivas, obtidas por *coarse-graining*¹³, ou por restrição a observáveis relevantes, e não de uma característica ontológica básica. Nessa perspectiva, o fundamento último permanece estrutural e potencialmente não separável, mas, sob certas condições físicas, como a interação com o ambiente e a consequente decoerência, emergem regimes nos quais sistemas podem ser tratados como aproximadamente independentes. No limite clássico, por exemplo, correlações quânticas tornam-se desprezíveis para fins práticos, e descrições em termos de estados locais bem definidos passam a ser adequadas.

Essa estratégia tem a vantagem de preservar um realismo de invariantes no nível fundamental, ao mesmo tempo em que explica por que a separabilidade parece empiricamente válida em grande parte da prática científica. Nesse sentido, ela oferece uma reconstrução naturalizada da intuição de Albert Einstein, qual seja, a separabilidade não seria uma verdade metafísica básica, mas uma propriedade emergente de regimes nos quais a estrutura global efetiva se aproxima de uma decomposição local. O custo dessa abordagem, contudo, é claro: a separabilidade deixa de ser um princípio fundamental e passa a ser apenas uma aproximação dependente de contexto. Isso entra em tensão com a posição de Einstein, para quem a separabilidade desempenhava um papel mais profundo, como condição de inteligibilidade última da realidade física. Assim, essa estratégia fornece uma conciliação historicamente e fisicamente plausível, mas não plenamente satisfatória do ponto de vista do ideal explicativo einsteiniano.

Por fim, teria a hipótese de separabilidade relacional-invariante. A separabilidade não se aplica a estados, mas a portadores de invariantes. Ou seja, o mundo é composto de regiões espaço-temporais em que cada região possui estrutura invariante própria e relações globais

¹³ O termo *coarse-graining* refere-se a um procedimento de descrição aproximada no qual graus de liberdade microscópicos são ignorados ou agregados, de modo a produzir uma descrição efetiva em termos de variáveis macroscópicas ou relevantes. Em vez de acompanhar o estado completo e detalhado de um sistema, considera-se apenas uma classe de estados indistinguíveis sob certas resoluções observacionais. Esse procedimento é central na mecânica estatística, na teoria quântica de campos e no estudo da decoerência, onde permite explicar a emergência de comportamentos clássicos a partir de dinâmicas fundamentais mais complexas

são invariantes de segunda ordem. Essa proposta, contudo, introduz uma dificuldade conceitual importante. A distinção entre invariantes de primeira ordem (locais) e de segunda ordem (globais) não pode ser meramente estipulativa ou guiada apenas por conveniência explicativa. É necessário algum critério não arbitrário físico ou matemático que justifique essa hierarquia. Uma possibilidade seria fundamentá-la na própria estrutura formal da teoria (por exemplo, na distinção entre observáveis locais e propriedades não fatoráveis, como o emaranhamento), mas essa estratégia exige desenvolvimento adicional. Assim, regiões são ontologicamente distintas, mas estados globais codificam correlações adicionais. A separabilidade é redefinida, uma vez que regiões distintas existem independentemente, mesmo que seus estados não sejam completos independentemente. Parece ser o que se adequaria filosoficamente e tecnicamente ao pensamento de Einstein, uma vez que é compatível com realismo de invariantes (regiões são definidas geometricamente, estruturas locais são reais, estruturas globais não eliminam as locais), preserva o núcleo central (localização espaço-temporal, anti-holismo ontológico radical e mundo composto de partes reais), bem como aceita o diagnóstico quântico (estados não são propriedades locais e emaranhamento é estrutural, não causal).

O preço a ser pago é que a separabilidade deixa de ser composicional, determinativa e baseada em estados completos, passando a ser ontologicamente fraca, estruturalmente condicionada e invariantemente definida. Isso não é a separabilidade de 1935, mas parece ser a única versão compatível com a física moderna sem instrumentalismo. Separabilidade forte, entendida como determinação local completa de estados, é incompatível com o realismo de invariantes. Mas uma separabilidade ontológica reformulada em termos de regiões invariantes e não de estados locais pode ser conciliada.

Seria possível um realismo estrutural ôntico (OSR)? Um realismo estrutural ôntico (OSR) não restaura a separabilidade forte, mas dissolve a discrepância entre separabilidade e invariantes ao mostrar que a separabilidade era a suposição errada. O realismo estrutural ôntico afirma que relações estruturais são ontologicamente fundamentais, sendo que objetos e estados locais são derivados ou elimináveis. Isso implica que não existem estados locais completos nem propriedades intrínsecas de subsistemas. A ontologia fundamental é global e relacional. Entretanto, tal ontologia parece ser insatisfatória, uma vez que, para se ter uma ontologia física completa, ela precisa ser reformulada para incluir o espaço-tempo de modo mais robusto. O OSR tradicional diz que a realidade fundamental é estrutura relacional; objetos são derivados ou elimináveis. O problema é onde essa estrutura vive.¹⁴

¹⁴ O realismo estrutural ôntico (OSR) é uma posição desenvolvida na filosofia da física contemporânea, sobretudo por autores como Ladyman, Ross, French e Esfeld; ver, por exemplo, Ladyman e Ross, *Every Thing Must Go* (2007) (Ladyman; Ross, 2007), e French, *The Structure of the World* (2014) (French, 2014). A tese central do OSR é que a ontologia fundamental do mundo é dada por estruturas relacionais, enquanto objetos individuais, assim entendidos como portadores de propriedades intrínsecas, são derivados ou elimináveis. Essa posição foi motivada, em parte, por desenvolvimentos na física moderna, especialmente

Na prática, o OSR quântico costuma tratar a estrutura como algo codificado no espaço de Hilbert e o espaço-tempo como emergente, secundário ou meramente fenomenal. Isso gera grandes dificuldades tais como desancoragem física, isto é, a estrutura fundamental não está no espaço-tempo, não é localizada e não tem causalidade clara. Perde-se o vínculo entre estrutura e cones de luz, bem como a noção de “localidade dinâmica” fica apenas formal. Einstein aceitava holismo, não aceitava abstração espacial vazia. Além disso, ocorre uma ruptura com o realismo de invariantes, já que estes só fazem sentido em relação a transformações físicas. Sem um espaço-tempo robusto, não está claro qual seria o grupo de simetria e o que conta como transformação física.

Um OSR robusto precisaria garantir que a estrutura fundamental é espaço-temporal ou gera espaço-tempo de modo nomologicamente necessário, não contingente. As relações estruturais devem respeitar causalidade relativística, não apenas correlação, e os invariantes devem ser definidos em relação a simetrias espaço-temporais fisicamente interpretáveis. Assim, um OSR neo-einsteiniano precisaria incorporar o espaço-tempo como parte da estrutura fundamental. Os campos seriam relações espaço-temporais reais e estados quânticos globais supervêm sobre essa estrutura. Todavia, não parece ser uma teoria que seria aceitável para Einstein.

5.3.1 Leitura neokantiana de Einstein

É possível desenvolver uma leitura neokantiana que “salva” conceitualmente a posição de Albert Einstein, mas ao custo explícito de abandonar a separabilidade forte como tese ontológica, reinterpretando-a como um princípio regulativo. Por “neo-kantiano” entende-se, em linhas gerais, uma abordagem inspirada em Immanuel Kant segundo a qual certos princípios não descrevem diretamente a estrutura última da realidade, mas funcionam como condições de possibilidade da experiência objetiva ou da prática científica. No contexto da filosofia da ciência, essa linha foi desenvolvida por autores como Ernst Cassirer e Hans Reichenbach, que reinterpretam categorias e princípios como instrumentos constitutivos da objetividade científica, e não como afirmações metafísicas sobre “o que existe”.¹⁵

Nessa leitura, a separabilidade forte não precisa ser preservada como uma tese ontológica fundamental. Em vez disso, ela pode ser reinterpretada como uma exigência meto-

a teoria quântica, onde fenômenos como o emaranhamento parecem desafiar a ideia de estados locais independentes. No entanto, uma dificuldade recorrente para o OSR diz respeito à localização ou ao suporte dessas estruturas, pois se não há objetos fundamentais, em que sentido a estrutura existe? Diferentes respostas foram propostas. Algumas versões apelam a redes de relações, sem relata fundamentais, enquanto outras tentam ancorar a estrutura em entidades como o espaço-tempo ou campos. Críticas a essa dificuldade podem ser encontradas em Esfeld (2009) (Esfeld, 2009) e em discussões sobre a necessidade de uma base espaço-temporal ou físico-causal para tornar a ontologia estrutural plenamente inteligível

¹⁵ Ver, por exemplo, Cassirer, *Substance and Function* (1910) e Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time* (1928). Para uma reconstrução contemporânea dessa abordagem aplicada à física, ver Friedman, *Dynamics of Reason* (2001)

dológica ou regulativa, isto é, como uma condição que orienta a construção de descrições físicas objetivas, permitindo tratar regiões do espaço-tempo como unidades relativamente independentes de análise. Assim, o que se preserva não é a verdade literal da separabilidade, mas seu papel na constituição da inteligibilidade física. Nesse sentido, não é a separabilidade forte em si que precisa ser salva, mas sim a função que ela desempenha na prática científica. A separabilidade, entendida dessa maneira, é instrumental no sentido metodológico, uma vez que fornece um esquema de decomposição e análise que torna possível a formulação de leis, a identificação de sistemas e a atribuição de propriedades, mesmo que tal esquema não corresponda à estrutura ontológica última do mundo.

Para tornar essa reconstrução mais precisa, é útil explicitar novamente aquilo que pode ser chamado de núcleo conceitual do pensamento de Einstein. A lista apresentada a seguir não corresponde a uma formulação sistemática explícita do próprio Einstein, mas a uma reconstrução interpretativa baseada em seus escritos físicos e filosóficos, em particular, textos sobre relatividade, causalidade e completude, bem como discussões em torno do argumento EPR.¹⁶

- Inteligibilidade objetiva do mundo: a física deve descrever uma realidade objetiva, não meras regularidades observacionais.
- Autonomia conceitual da física: a física não depende de atos de medição ou consciência para definir o real.
- Estrutura espaço-temporal como condição de objetividade: a objetividade física exige uma estrutura espaço-temporal pública e intersubjetiva.
- Realismo de invariantes: o que é fisicamente real são as quantidades invariantes sob o grupo de simetria relevante.

A separabilidade forte entra como condição clássica de inteligibilidade, não como dogma metafísico último. Bell mostra que não podemos ter separabilidade + localidade + realismo ingênuo. Porém, note-se o ponto decisivo: Bell não mostra que o mundo é ininteligível, apenas que a forma clássica de inteligibilidade falha. E, aqui, está a virada Kantiana. As categorias clássicas (objeto individual, estado local completo, composição mereológica simples) não são *a priori* do mundo, mas *a priori* do entendimento clássico. Nessa leitura, a separabilidade atuaria como princípio regulativo da objetivação. Portanto, usaríamos separabilidade para construir descrições locais, organizar experimentos, definir subsistemas operacionais, mas não exigiríamos que a realidade última obedeça a ela. Para fins de descrição objetiva e controle experimental, tratamos regiões espaço-temporais como sistemas separáveis, salvo indicação empírica contrária. Permanecem o realismo, já que a realidade é objetiva, estruturada e independente do observador; o espaço-tempo continua

¹⁶ Para textos relevantes, ver Einstein, “Physics and Reality” (1936) (Einstein, 1936), “Autobiographical Notes” (1949) (Einstein, 1949a), e Einstein, Podolsky e Rosen (1935) (Einstein; Podolsky; Rosen, 1935). Para reconstruções filosóficas, ver Howard (1985) (Howard, 1985) e Fine (1986) (Fine, 1986)

sendo a forma pública da objetividade física; as estruturas invariantes continuam sendo o critério do real. Somente a separabilidade ontológica cai, mas cai como categoria empírica, não como fracasso racional. Einstein perde a letra (o estado real de B não pode depender do que acontece em A), mas salva o espírito (a física busca estruturas objetivas invariantes que tornam o mundo inteligível).

Essa leitura parece ainda não estar de acordo com o EPR, entretanto é possível reconstruir essa leitura neo-kantiana regulativa de Einstein a partir das cartas tardias, bem como do artigo *Física e realidade* (Einstein, 2006), no qual faz uma apresentação mais simples do argumento. Como é amplamente sabido, foi Boris Podolsky quem escreveu o EPR e Einstein teria ficado insatisfeito com a maneira como o argumento foi apresentado. Podolsky parece ter percebido que faltava um passo além para demonstrar a incompletude e, por isso, adicionou o chamado “critério de realidade” (Einstein; Podolsky; Rosen, 1935, p. 777):

Se, sem perturbar de forma alguma um sistema, pudermos prever com certeza (ou seja, com probabilidade igual a um) o valor de uma grandeza física, então existe um elemento da realidade correspondente a essa grandeza.

Esse é o sentido forte de realismo. Em outros textos já é possível notar que Einstein nunca abandonou explicitamente a separabilidade, mas já não a tratava como axioma intocável ao apresentar como um princípio razoável, mas não axioma lógico ou metafísico necessário. Einstein não diz que a separabilidade é uma verdade metafísica necessária. Ele diz que sem separabilidade, não sabemos mais o que significa descrever um sistema físico e, assim a física perde clareza conceitual. Talvez entre aqui a chave para uma leitura neo-kantiana. Os conceitos fundamentais não são extraídos da experiência, porém testados por ela. A separabilidade espacial é uma condição regulativa de descrição objetiva na física clássica, cuja validade deve ser reavaliada à luz de novas estruturas empíricas, sem que isso implique abandono da objetividade ou do realismo. Talvez não seja a realidade que falhe em ser separável, mas nossos conceitos clássicos que falham em capturar sua estrutura.

Conforme (Jr; Jr; Bromberg, 2011, p. 192-193):

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. O fundamento desse princípio metodológico 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*.

Como esclarecimento, cabe enfatizar que tal estrutura ainda contrasta diametralmente com o instrumentalismo de Bohr. Para Bohr, não há fato sobre o sistema independentemente do contexto experimental. Já para Einstein há fatos estruturais objetivos, ainda que nossos conceitos clássicos falhem em capturá-los diretamente. Bohr abandona a ontologia para salvar a linguagem; Einstein revisa a linguagem para salvar a ontologia. Isso impede qualquer leitura instrumentalista de Einstein, mesmo quando se aceita a derrota da separabilidade forte.

O conceito central de um realismo desse tipo seria que a realidade física consiste em estruturas objetivas invariantes, cuja forma de objetivação depende de categorias conceituais revisáveis, historicamente determinadas pela física, e cujo domínio fundamental é espaço-temporal.

Aqui, a crítica de Maudlin (2019) a um modelo OSR (exposta no sentido de que uma estrutura sem portadores é metafisicamente incoerente, pois não há relações sem coisas relacionadas) pode ser relativizada. Para ele, estrutura pressupõe objetos e eliminar objetos é eliminar o que torna a estrutura física. Tal descrição falharia em fornecer uma ontologia física clara, uma vez que troca ontologia por matemática, confunde representação com realidade e não diz o que existe, apenas como descrevemos o que existe. Dizer holismo estrutural não explica correlações. Seria vazio ou disfarçaria não-localidade. Essa crítica sustenta que não faz sentido ontológico falar de relações sem entidades que estejam relacionadas. No entanto, essa objeção perde força quando se compreende adequadamente o tipo de ontologia que está sendo proposto. A leitura neo-kantiana não afirma a existência de “relações sem nada”, mas antes redefine os critérios de individuação ontológica. Em vez de pressupor objetos portadores de propriedades intrínsecas como unidades fundamentais, ela identifica a ontologia a partir de estruturas invariantes, ou seja, das quantidades e relações que permanecem bem definidas sob as simetrias da teoria.

Em um sentido kantiano, isso equivale a dizer que as condições de objetividade, isto é, aquilo que pode ser legitimamente tomado como “objeto” de conhecimento, são dadas pelas formas estruturais que organizam a experiência física. Assim, a individuação ontológica não é anterior à estrutura, mas emerge dela, já que só podemos identificar entidades físicas ao situá-las em uma rede de relações invariantes. Nesse sentido, elementos individuais não são eliminados, mas tampouco são fundamentais de maneira independente da estrutura.

Isso permite responder diretamente à objeção uma vez que o modelo não elimina a ontologia, mas a reconstrói em termos estruturais. Espaço-tempo e campos, por exemplo, permanecem como entidades reais, mas sua identidade não é concebida como intrínseca e auto-subsistente. Ela é dada por seu papel na estrutura física global. O que é rejeitado não é a existência de entidades, mas a ideia de objetos com identidade completamente independente das relações que os constituem. A dificuldade relativa a regiões emaranhadas pode agora ser esclarecida. Em teorias quânticas, especialmente na presença de emaranhamento, não é

possível atribuir estados completos a subsistemas de maneira independente. A crítica de que isso comprometeria a ontologia pressupõe justamente o modelo clássico de individuação, qual seja, o de que cada região deve possuir propriedades intrínsecas completas. A leitura neokantiana rejeita essa pressuposição. Em vez disso, ela sustenta que o conteúdo ontológico de uma região é dado pelas invariantes que podem ser atribuídas a ela dentro da estrutura global, mesmo que essas invariantes envolvam correlações não fatoráveis com outras regiões.

Isso explica por que o modelo não “nos obriga” a tratar o emaranhamento como um problema ontológico no sentido tradicional. O emaranhamento não indica a ausência de realidade local, mas a inadequação de uma concepção de realidade baseada em propriedades intrínsecas independentes. A ontologia continua presente, mas é estrutural e relacional desde o início. Por fim, a crítica de que tal abordagem implicaria uma fraqueza metafísica ao permitir que a teoria determine as categorias ontológicas pode ser invertida. A exigência de categorias ontológicas fixas e independentes da teoria, como pressuposta por Maudlin, pode ser vista como excessivamente rígida frente às lições da física contemporânea. A alternativa neo-kantiana sustenta que as categorias ontológicas são, ao menos em parte, revisáveis à luz das melhores teorias físicas, não arbitrariamente, mas em função de suas estruturas invariantes e de seu papel explicativo. Assim, longe de dissolver a ontologia, essa abordagem propõe uma reconceitualização: a realidade não é composta por objetos auto-subsistentes que depois entram em relação, mas por estruturas nas quais a própria distinção entre objetos e relações emerge de maneira dependente do quadro teórico.

Outra crítica ao modelo neokantiano diz respeito à inteligibilidade das correlações quânticas, em particular ao problema de saber o que, afinal, conecta duas regiões emaranhadas. A objeção pode ser formulada assim: se não há interação causal local entre as regiões, então o modelo deve explicar em que consiste a unidade física responsável pelas correlações observadas.

A resposta neokantiana típica consistiria em negar que haja algo como uma conexão causal entre as regiões. Em vez disso, sustenta-se que ambas fazem parte de uma única estrutura espaço-temporal global, cuja descrição completa não é redutível à soma de descrições locais. As correlações não resultam de influências que se propagam no espaço-tempo, mas do fato de que as regiões são aspectos de uma mesma totalidade estrutural. Nesse sentido, o emaranhamento não indica uma ligação causal entre partes independentes, mas a falha da própria ideia de independência como categoria fundamental. Ainda assim, essa resposta pode parecer insatisfatória do ponto de vista do realismo científico tradicional. Segundo esse quadro mais clássico, espera-se que teorias físicas descrevam uma realidade independente de práticas epistêmicas, na qual entidades bem definidas interagem por meio de mecanismos físicos localizáveis no espaço-tempo. Além disso, há a expectativa de que explicações científicas envolvam algum tipo de mediação, isto é, processos ou estruturas que conectem os fenômenos observados de maneira inteligível. O modelo neokantiano rompe

parcialmente com esse ideal. Ao substituir conexões causais locais por pertencimento a uma estrutura global, ele preserva a objetividade, mas enfraquece a noção de explicação como mediação física entre eventos. O resultado é uma forma de realismo estrutural na qual a inteligibilidade não deriva da decomposição do mundo em partes independentes interagindo causalmente, mas da inserção dessas partes em uma totalidade estruturada.

Esse deslocamento não implica um abandono completo do realismo científico, mas exige sua reformulação. A tradição clássica, moldada por ontologias de partículas, campos locais e princípios de separabilidade, já havia sido tensionada pela relatividade, com a rejeição da simultaneidade absoluta, e pela teoria quântica, especialmente após os resultados associados a Bell, que colocam limites severos à separabilidade local. O modelo neokantiano pode ser visto como uma tentativa de levar a sério essas lições, ainda que ao custo de revisar a ideia de que a realidade fundamental é composta por entidades individuais com identidade intrínseca e relações mediadas localmente.

Entretanto, modelos estruturais parecem colapsar muitas vezes em um realismo de estruturas matemáticas. Seria ainda um fisicalismo realista ou vira platonismo disfarçado? Vamos inicialmente esclarecer o que seria esse colapso em realismo matemático. Ele ocorre se se todas as seguintes afirmações forem verdadeiras:

- 1. Tudo o que existe fundamentalmente é uma estrutura formal;
- 2. A distinção entre estrutura física e estrutura matemática é apenas semântica.
- 3. A aplicabilidade da matemática não requer explicação física adicional.
- 4. Espaço-tempo, causalidade e dinâmica são apenas traços formais.

Ao identificar realidade com invariância (invariantes são matemáticos), objetos como não fundamentais e relações globais empurram-se para uma ontologia estrutural abstrata. Para evitar isso, a estrutura deve ter capacidade física de fazer diferença causal no mundo empírico, independentemente de sua representação matemática. Um projeto neokantiano não tem problema com isso já que os objetos que conhecemos no projeto do Kant são objetos “matemáticos” ainda que exista uma realidade por trás deles. Nesse ponto o modelo neokantiano trocaria a noção clássica de instanciação:

‘x instancia a propriedade P’

por

‘o mundo realiza um padrão de possibilidades físicas’

Essa mudança conceitual exige esclarecimento. Um “padrão de possibilidades físicas” não é simplesmente uma propriedade estática, mas um conjunto de restrições modais, isto é, restrições sobre o que pode ou não ocorrer, que governam a evolução de sistemas físicos. Tais padrões são codificados, por exemplo, em leis dinâmicas, simetrias e condições de contorno.

Dizer que estruturas são padrões modais efetivados significa, portanto, que elas não são meras descrições, mas elementos constitutivos da realidade física na medida em que determinam:

- quais processos são fisicamente possíveis;
- como diferentes regiões do espaço-tempo podem se correlacionar;
- como energia, momento e outras grandezas se distribuem e interagem.

Assim, uma estrutura S é fisicamente instanciada se, e somente se, ela desempenha um papel na dinâmica do mundo, portanto, se contribui para a determinação de relações causais, restrições modais e acoplamentos físicos. Isso permite distinguir estruturas físicas de estruturas puramente matemáticas uma vez que apenas as primeiras entram efetivamente na produção dos fenômenos. Ainda assim, essa proposta enfrenta dificuldades importantes.

A primeira é o problema da identidade estrutural, isto é, em que condições duas estruturas dinâmicas distintas representam a mesma estrutura física? Sem um critério claro, há risco de indeterminação ontológica. A segunda dificuldade é ainda mais profunda. Se o espaço-tempo for emergente, como sugerem diversas abordagens em gravidade quântica, então a própria ideia de “papel causal espaço-temporal” deixa de ser fundamental. Nesse caso, a tentativa de ancorar a realidade física na eficácia causal de estruturas espaço-temporais torna-se circular ou derivada. A ontologia estrutural precisaria então ser reformulada em um nível ainda mais fundamental, no qual nem mesmo o espaço-tempo figure como base primária. Em suma, o desafio filosófico é duplo, qual seja, evitar o colapso em platonismo matemático sem recair em uma ontologia de objetos clássicos, ao mesmo tempo em que se fornece um critério claro para distinguir estruturas fisicamente reais de meras construções formais.

Kant reconheceria tal projeto? Para ele não temos acesso direto às “coisas em si” independentemente de qualquer estrutura conceitual o que seria compatível, entretanto categorias são necessárias para toda experiência possível. Uma revisibilidade de categorias se aproximaria do empirismo. Também, as categorias organizam a experiência, enquanto que no modelo as estruturas são fisicamente reais. Isso soa como uma violação direta da distinção fenômeno/númeno. Logo, Kant rejeitaria a identificação direta entre estrutura e realidade em si, a completa fisicalização do *a priori* e a eliminação nítida do limite fenômeno/númeno.

Essa leitura neo-kantiana pode ser articulada de maneira particularmente frutífera com o debate contemporâneo sobre indispensabilismo na filosofia da ciência. Em linhas gerais, o indispensabilismo sustenta que devemos nos comprometer ontologicamente com as entidades que são indispensáveis às nossas melhores teorias científicas. Em sua formulação clássica, esse argumento foi direcionado sobretudo a entidades matemáticas, mas sua estrutura pode ser generalizada para princípios e estruturas teóricas mais amplas. A leitura neo-kantiana proposta aqui pode ser vista como uma reformulação dessa intuição: em vez de perguntar diretamente “o que existe?”, pergunta-se “quais princípios são indispensáveis para

a constituição de uma descrição objetiva da realidade”? Nesse deslocamento, princípios como a separabilidade não precisam ser verdadeiros em sentido ontológico forte para desempenhar um papel legítimo na teoria, bastando que sejam indispensáveis à prática científica enquanto tal. Em tal contexto, a separabilidade pode ser entendida como um princípio indispensável no nível da representação e da investigação, ainda que não no nível da ontologia fundamental. Ela permite a decomposição de sistemas, a definição de condições iniciais, a identificação de subsistemas e a formulação de leis locais, todos elementos centrais da prática científica. Abandoná-la completamente implicaria comprometer a própria possibilidade de descrever e investigar o mundo de forma sistemática.

Essa perspectiva permite reinterpretar a posição de Albert Einstein de maneira mais sutil. Sua insistência na separabilidade não precisa ser entendida como um compromisso metafísico rígido com uma ontologia de estados locais independentes, mas como a expressão de uma exigência mais profunda, qual seja, a de que o mundo seja inteligível em termos de estruturas localmente articuláveis. O erro, nessa leitura, não estaria na valorização da separabilidade, mas em sua elevação ao status de princípio ontológico fundamental. Dessa forma, o conflito entre a mecânica quântica e o ideal einsteiniano pode ser parcialmente dissolvido. A teoria quântica pode violar a separabilidade forte no nível ontológico, por exemplo, por meio do emaranhamento, sem que isso implique o abandono da separabilidade como princípio regulativo indispensável à prática científica. O resultado é uma posição intermediária, isto é, a ontologia pode ser global e estrutural, mas a epistemologia e a metodologia permanecem localistas.

Essa leitura não pretende afirmar que Einstein tenha abandonado explicitamente a separabilidade como tese ontológica. O ponto é mais limitado ao tentar mostrar como certos elementos de seu pensamento podem ser reconstruídos de modo compatível com a não-separabilidade quântica, desde que a separabilidade seja deslocada do plano ontológico fundamental para o plano regulativo da descrição física.

5.3.2 Seria Einstein superdeterminista hoje?

As teorias superdeterministas na mecânica quântica são uma classe de interpretações que buscam resolver paradoxos como o entrelaçamento quântico e a violação das desigualdades de Bell ¹⁷, mantendo o princípio da localidade e do realismo. Em essência, elas propõem que o universo é completamente determinístico, mas de uma forma extrema, isto é, não apenas os estados quânticos são determinados por variáveis ocultas, mas também as

¹⁷ As desigualdades de Bell expressam limites estatísticos impostos a teorias de variáveis ocultas locais. A mecânica quântica prevê, e os experimentos confirmam, violações dessas desigualdades para estados emaranhados. Isso mostra que as correlações quânticas não podem ser explicadas por uma ontologia local separável que preserve simultaneamente localidade, independência das escolhas de medição e valores definidos independentes do contexto experimental. Tal violação não permite sinalização superluminal, mas enfraquece decisivamente o realismo local clássico (Bell, 1964)

escolhas dos observadores (como quais medições realizar) são predeterminadas por causas comuns no passado distante. Isso viola a suposição de “independência estatística” assumida em teoremas como o de Bell, sugerindo que o aparente acaso quântico surge porque tudo, partículas, experimentos e decisões humanas, está correlacionado desde o Big Bang ou um evento inicial.

Apesar do superdeterminismo não destruir a causalidade em um sentido forte, talvez Einstein tivesse um problema com a causalidade local operacional e contrafactual, ou seja, a forma como leis físicas explicam eventos locais por causas locais e a forma como experimentos testam leis por variação controlada de condições locais. No superdeterminismo tudo decorre do estado inicial mais leis físicas. Uma causalidade local dinâmica dependeria de eventos explicados por interações locais, segundo leis diferenciais. Aqui, estamos trabalhando com duas noções distintas de localidade: uma dinâmica em que as interações físicas propagam-se localmente no espaço-tempo e outra explicativa/contrafactual em que acontecimentos locais são explicados por condições locais, e podemos variar condições locais mantendo o resto fixo. No superdeterminismo, uma causalidade local explicativa é substituída por coerência global da história inteira do universo. Seria aceitável uma explicação de tudo a partir do estado do universo como um todo?

Einstein exigia ontologicamente que cada região do espaço-tempo possuísse um estado físico próprio, completo em si, que determinaria sua evolução futura localmente. E no superdeterminismo o estado local não é ontologicamente local, mesmo que sua dinâmica seja local. O conteúdo físico de uma região passa a depender do estado remoto passado e também do estado remoto futuro, via correlações globais. Em uma teoria local padrão, o estado local da partícula 1 não contém informação alguma sobre qual medição será feita na partícula 2. No superdeterminismo, o estado local da partícula 1 já está correlacionado com a futura escolha de medição na partícula 2. Isso significa que o estado local não é um estado físico local completo, mas parte de uma codificação global. Mesmo sem ação à distância, a separabilidade ontológica é violada. Mas seria preciso exigir independência ontológica tão forte, se causalidade local basta?

Uma teoria superdeterminista entendida como uma teoria de campo global, cujas equações diferenciais locais determinam estados físicos ponto a ponto no espaço-tempo, poderia não violar a localidade ontológica em sentido dinâmico. Tal teoria poderia ser formulada nos seguintes termos:

- Existe um campo físico fundamental global φ , definido sobre o espaço-tempo, tal que:
 - a. possui valores locais bem definidos em cada ponto;
 - b. obedece a equações diferenciais locais;
 - c. determina completamente os resultados experimentais;
 - d. inclui correlações finas entre estados locais e configurações experimentais futuras.

Nesse caso, a teoria seria local no nível das equações dinâmicas, pois a evolução do campo em cada região seria determinada por relações diferenciais locais. Entretanto, embora matematicamente local nesse sentido, ela codificaria uma estrutura global: as correlações entre variáveis ocultas, estados físicos locais e escolhas experimentais futuras não seriam acidentais, mas fariam parte da própria solução global do universo.

É precisamente por isso que tal teoria talvez ainda fosse inaceitável para Einstein. Ela preserva a localidade dinâmica, mas abandona a independência estatística pressuposta no argumento de Bell. As configurações experimentais não seriam variáveis livres em relação ao estado físico anterior do sistema; ao contrário, estariam correlacionadas com ele por meio da estrutura global da solução. Assim, a teoria não introduz uma influência causal superluminal entre regiões espacialmente separadas, mas recusa a ideia de que se possa variar contrafactualmente os ajustes experimentais mantendo fixo todo o restante do estado físico relevante do universo.

Formalmente, pode-se expressar essa ideia de modo mais adequado assim. Seja $\mathcal{L}$ o conjunto das leis dinâmicas fundamentais, formuladas como equações diferenciais locais. Seja $\mathcal{I}$ o espaço das condições iniciais admissíveis. Para cada conjunto admissível de condições iniciais $\Sigma_0 \in \mathcal{I}$, existe uma solução global correspondente:

$$[\forall \Sigma_0 \in \mathcal{I}, \quad \exists!, U\Sigma_0 \in \text{Sol}(\mathcal{L})]$$

tal que $U\Sigma_0$ é a história física completa determinada por Σ_0 de acordo com as leis $\mathcal{L}$. No interior de um universo dado, porém, as condições iniciais não são livremente destacáveis da solução global; elas fazem parte da própria história física total. Assim, em um universo atual $U\Sigma_0$, os estados locais, os resultados experimentais e as configurações dos aparelhos pertencem a uma mesma estrutura dinâmica global.

Isso permite distinguir duas teses. A primeira é uma tese modal: as leis $\mathcal{L}$ governam um espaço de soluções fisicamente possíveis, de modo que diferentes condições iniciais admissíveis poderiam corresponder a diferentes universos possíveis. A segunda é uma tese interna a cada universo: uma vez dada uma solução global $U\Sigma_0$, todos os seus eventos físicos estão determinados. Cada universo é, portanto, internamente determinado, embora o espaço modal das leis admita uma pluralidade de soluções globais.

Essa posição não equivale simplesmente a um fatalismo trivial. Trata-se antes de um determinismo estrutural com modalidade física real. As leis não descrevem apenas regularidades observadas, mas delimitam o espaço das histórias fisicamente possíveis. A rejeição central não recai sobre a localidade dinâmica, nem sobre o realismo, nem sobre o determinismo, mas sobre a independência estatística interna pressuposta pelos teoremas de Bell. As leis continuam sendo equações diferenciais locais e princípios modais reais; o que se abandona é a suposição de que, dentro de uma mesma solução global, os ajustes experimentais possam ser tratados como variáveis independentes do estado físico total que os antecede.

Nesse sentido, a explicação última pode terminar nas condições iniciais, porém com um custo filosófico claro. Parar nas condições iniciais implica que as leis da física são fundamentais e as condições iniciais são fatos brutos. Significa aceitar algum grau de contingência ontológica. Caso não aceitemos, seríamos empurrados para alguma espécie de necessitarismo ontológico. Para o escopo desta dissertação em que a ideia foi perquirir a realidade objetiva, tal hipótese de leis fundamentais explica suficientemente tal conceito ¹⁸.

Nesta seção, propõe-se uma reconstrução alternativa do superdeterminismo, inspirada nos compromissos fundamentais da física einsteiniana. O objetivo é mostrar que, sob uma formulação adequada, a rejeição da independência estatística pode ser compatibilizada com uma ontologia local, estruturada e inteligível, sem recorrer a formas de não-localidade dinâmica. Essa reconstrução será denominada, por conveniência, de superdeterminismo einsteiniano forte. O ponto de partida dessa proposta é a concepção de realidade física subjacente à teoria da relatividade. Nessa teoria, a realidade é entendida como uma estrutura espaço-temporal definida por campos e relações invariantes. As leis fundamentais são expressas por equações diferenciais locais, invariantes sob transformações apropriadas, e descrevem a evolução de configurações físicas em regiões do espaço-tempo. Nesse quadro, a localidade não é meramente uma restrição empírica, mas um princípio ontológico: as interações físicas se propagam de maneira contínua e não superluminal, e os estados físicos são definidos em regiões localizadas.

Entretanto, essa concepção local da dinâmica não implica que todas as propriedades relevantes do sistema possam ser especificadas de maneira completamente independente em regiões disjuntas. A teoria da relatividade já sugere que a estrutura global do espaço-tempo impõe restrições sobre as configurações físicas admissíveis. Soluções das equações de campo são determinadas não apenas por leis locais, mas também por condições globais de consistência. Em outras palavras, nem toda atribuição arbitrária de dados locais corresponde a uma solução fisicamente possível. É nesse contexto que a rejeição da independência estatística pode ser reinterpretada. Em vez de postular correlações arbitrárias entre variáveis ocultas e configurações experimentais, o superdeterminismo einsteiniano forte sustenta que tais correlações são consequência da estrutura global do universo enquanto solução de um sistema de equações fundamentais. Tanto os estados dos sistemas físicos quanto as configurações dos dispositivos de medição são determinados por uma mesma estrutura dinâmica subjacente. Assim, a dependência estatística entre essas variáveis não reflete uma influência causal não-local, mas uma origem comum inscrita na configuração global do

¹⁸ Aqui adotamos o conceito de leis fundamentais de Eddy Keming Chen - Leis Fundamentais: Para qualquer mundo w , as leis fundamentais da natureza em w são os axiomas não matemáticos (postulados básicos) da teoria física fundamental completa de w . A teoria física pode empregar alguma matemática, mas os axiomas matemáticos não são leis da natureza. Portanto, as leis fundamentais da natureza são os axiomas não matemáticos. Uma concepção mínima de leis governantes: Primitivismo Mínimo. As leis fundamentais da natureza são os fatos fundamentais (não matemáticos) que governam o comportamento de objetos fundamentais; não há restrição nas formas das leis fundamentais

espaço-tempo.

Essa perspectiva permite preservar a localidade dinâmica em sentido forte. As equações fundamentais continuam sendo locais, e não há necessidade de postular influências que se propagam instantaneamente entre regiões espacialmente separadas. As correlações observadas nos experimentos quânticos não são produzidas por interações à distância, mas decorrem de restrições globais sobre as soluções admissíveis das leis físicas. A não-independência estatística, nesse sentido, não constitui uma violação da localidade, mas uma característica da estrutura probabilística derivada de uma ontologia mais profunda.

Do ponto de vista ontológico, essa abordagem também permite preservar uma forma de separabilidade, ainda que reformulada. Regiões do espaço-tempo continuam sendo entidades distintas, com propriedades físicas localmente definidas. Contudo, a determinação completa dos estados físicos não pode ser reduzida a uma simples composição de estados locais independentes. A estrutura global impõe correlações que conectam essas regiões de maneira não redutível, sem que isso implique a existência de entidades não-localizadas ou de interações não-locais. A separabilidade, portanto, deixa de ser uma tese sobre a independência completa de estados e passa a ser compreendida como uma distinção ontológica entre regiões, compatível com correlações estruturais globais.

Uma objeção recorrente a essa posição consiste em afirmar que ela comprometeria o poder explicativo das leis físicas, ao deslocar a origem das correlações para condições iniciais altamente específicas. No entanto, essa crítica só se aplica a versões ingênuas do superdeterminismo. Na formulação aqui proposta, as correlações não são impostas arbitrariamente, mas decorrem de princípios gerais que restringem o espaço de soluções possíveis. Nesse sentido, a estrutura global não substitui as leis, mas constitui parte de sua expressão. A inteligibilidade física é preservada na medida em que as regularidades observadas são explicadas por uma combinação de dinâmica local e consistência global.

A resposta neokantiana e a resposta superdeterminista convergem na rejeição da separabilidade forte e na recusa de interpretar o emaranhamento como uma influência causal superluminal entre regiões independentes. Contudo, elas diferem quanto ao estatuto da totalidade invocada. Na leitura neokantiana, a totalidade funciona sobretudo como condição estrutural de inteligibilidade e objetividade, já que as regiões são partes de uma mesma estrutura espaço-temporal ou conceitual, de modo que suas correlações não precisam ser explicadas por uma conexão causal localizável. No superdeterminismo, por outro lado, essa totalidade assume estatuto físico-ontológico mais forte. Sistemas, aparatos, escolhas de medição e resultados pertencem a uma única história física global, de tal modo que as correlações quânticas decorrem de restrições reais sobre os estados possíveis, e não apenas de uma dependência conceitual entre partes e todo. Por isso, o superdeterminismo pode ser visto como uma radicalização ontológica da intuição estrutural neokantiana. Ele aceita que a inteligibilidade das correlações não deve ser procurada em influências locais entre

partes independentes, mas acrescenta que essa estrutura global deve ser entendida como fisicamente determinante. A diferença decisiva está na independência estatística: enquanto a resposta neokantiana pode limitar-se a negar a independência conceitual das partes, o superdeterminismo nega que as variáveis relevantes do sistema sejam estatisticamente independentes dos arranjos de medição.

A questão de saber se Einstein aceitaria tal proposta permanece, em última instância, interpretativa. Por um lado, a ênfase na localidade, na estrutura espaço-temporal e na primazia de leis invariantes está claramente alinhada com seus compromissos filosóficos. Por outro, a ideia de que correlações observadas decorrem de restrições globais pode parecer tensionar sua exigência de explicações baseadas em condições locais. Ainda assim, é plausível sustentar que, diante das alternativas disponíveis (não-localidade ou abandono do realismo) uma versão estruturalmente robusta do superdeterminismo poderia ser vista como uma extensão coerente de seu programa científico.

Em suma, o superdeterminismo einsteiniano forte oferece uma via conceitual para reconciliar os resultados do teorema de Bell com uma ontologia local e realista. Ao re-interpretar a independência estatística como uma hipótese não fundamental, substituída por uma concepção de estrutura global do universo, essa abordagem preserva o núcleo do realismo einsteiniano, ao mesmo tempo em que incorpora as lições da mecânica quântica. Trata-se, portanto, de uma proposta que, embora exigente em termos conceituais, merece consideração no contexto mais amplo da filosofia dos fundamentos da física.

5.3.3 A não-separabilidade como propriedade dos estados: realismo estrutural dinamicamente local

A análise do argumento EPR e de seus desdobramentos após Bell exige distinguir com precisão três níveis que frequentemente aparecem confundidos: o nível do formalismo matemático, o nível dos estados físicos e o nível da ontologia fundamental. Essa distinção é decisiva porque a não-separabilidade quântica é, antes de tudo, uma característica da estrutura dos estados atribuídos a sistemas compostos. A partir disso, surge a questão filosófica central, qual seja, deve-se concluir imediatamente que a própria ontologia física é não-local ou não-separável em sentido forte?

A resposta defendida aqui é negativa, mas com uma qualificação importante. Não se trata de negar que a não-separabilidade dos estados tenha relevância ontológica. Seria excessivamente fraco tratá-la como mero artefato representacional ou como simples limitação epistemológica. Estados emaranhados produzem correlações empiricamente robustas e estruturalmente indispensáveis ao formalismo quântico. O ponto é outro, isto é, da não-fatorabilidade dos estados não se segue automaticamente uma ontologia de influências dinâmicas não locais ou de entidades fundamentais que perdem toda individuação espaço-

temporal. A inferência da não-separabilidade dos estados para uma ontologia radicalmente não-separável depende de um pressuposto adicional, qual seja, o de que o estado quântico fornece uma descrição ontologicamente direta, completa e exaustiva da realidade física. Se esse pressuposto for aceito, então a estrutura global da função de onda parece revelar a estrutura global da própria realidade. Mas esse pressuposto não é imposto apenas pelo sucesso empírico da mecânica quântica, mas pertence a uma interpretação específica do formalismo. É precisamente esse ponto que precisa ser discutido.

A distinção proposta nesta seção é, portanto, a seguinte: a não-separabilidade quântica deve ser entendida primariamente como uma propriedade dos estados físicos, isto é, como uma característica da estrutura matemática que codifica correlações entre sistemas. Isso não significa que ela seja irreal ou meramente subjetiva. Significa apenas que sua realidade não precisa ser interpretada como uma propriedade intrínseca de entidades fundamentais não localizadas ou como uma ação causal instantânea entre regiões espacialmente separadas. Em outras palavras, a impossibilidade de decompor um estado global em estados locais independentes não implica, por si só, que não existam regiões, eventos, campos ou sistemas fisicamente distintos no espaço-tempo. O que ela mostra é que a descrição completa das correlações entre essas regiões não pode ser obtida apenas pela composição de estados locais autônomos. A não-separabilidade, nesse sentido, é uma limitação da fatorabilidade dos estados, não necessariamente da individuação ontológica mínima das regiões físicas.

Essa distinção permite reformular a separabilidade. A separabilidade forte, pressuposta no horizonte do argumento EPR, exige que o estado completo de um sistema composto seja determinado pelos estados completos de suas partes espacialmente separadas. A mecânica quântica torna essa exigência insustentável, ao menos se os estados quânticos forem tomados como descrições completas. Mas disso não se segue que toda forma de separabilidade deva ser abandonada. Pode-se preservar uma separabilidade fraca ou estrutural, qual seja, há regiões fisicamente distintas, localizadas no espaço-tempo, embora suas propriedades de estado não sejam completamente independentes. Essa posição permite compreender melhor a tensão entre Einstein e a mecânica quântica. Einstein pretendia preservar uma realidade objetiva articulada no espaço-tempo. Seu erro, se houve um, não foi exigir objetividade, mas associar essa objetividade a uma forma forte de separabilidade, isto é, à ideia de que sistemas espacialmente separados devem possuir estados próprios completos e independentes. A mecânica quântica mostra que essa exigência é demasiadamente forte. Mas ela não obriga, por si só, a abandonar a ideia de uma realidade física objetiva estruturada localmente.

A teoria quântica de campos oferece uma ilustração importante dessa possibilidade. Nela, observáveis ou operadores são associados a regiões do espaço-tempo, preservando uma forma robusta de localização estrutural. Ao mesmo tempo, os estados do sistema, inclusive o estado de vácuo, exibem correlações não triviais entre regiões espacialmente separadas. Assim, a teoria combina uma estrutura local de observáveis com uma estrutura

global de estados. Essa combinação mostra que localidade e correlação global não são noções simplesmente incompatíveis, sendo que o que é incompatível é a exigência de que a totalidade do estado global seja redutível a estados locais independentes. Contudo, é preciso evitar uma conclusão precipitada. A localidade preservada nesse quadro não é necessariamente a localidade forte de Bell. A existência de observáveis locais ou de comutatividade entre operações espacialmente separadas não basta, por si só, para restaurar a localidade causal no sentido exigido por teorias de variáveis ocultas locais. Ela mostra, antes, que há uma distinção entre localidade dinâmica, localidade operacional e separabilidade ontológica. A mecânica quântica pode respeitar certas formas de localidade operacional, como a impossibilidade de sinalização superluminal, e ainda violar a fatorabilidade probabilística pressuposta nas desigualdades de Bell.

Por isso, a tese aqui defendida não é que a distinção entre estado e ontologia, sozinha, resolva o problema de Bell. O resultado de Bell permanece uma restrição profunda, qual seja, qualquer tentativa de preservar simultaneamente realismo e localidade precisa abandonar ou reformular algum pressuposto adicional, como a independência estatística, a completude dos estados quânticos, a fatorabilidade probabilística ou a ideia de que os resultados de medição são independentes do contexto experimental. A seção anterior sugeriu uma via possível que é reinterpretar a independência estatística como hipótese não fundamental, substituindo-a por uma concepção de estrutura global do universo.

A presente seção complementa essa proposta. Se as correlações quânticas são entendidas como propriedades globais dos estados, e não como efeitos de influências dinâmicas não locais entre entidades previamente separadas, então a rejeição da independência estatística pode ser interpretada não como conspiração, mas como expressão de restrições globais sobre o espaço de estados possíveis. As correlações observadas não seriam produzidas por uma ação à distância, mas refletiriam uma estrutura global que condiciona conjuntamente os estados dos sistemas e os contextos experimentais. Essa abordagem permite preservar uma forma de realismo local estrutural. Ela é realista porque não reduz a mecânica quântica a mero instrumento de cálculo já que as estruturas de correlação codificadas nos estados são tomadas como aspectos objetivos do mundo. Ela é local em sentido dinâmico porque não exige influências superluminais propagando-se entre regiões espacialmente separadas. E é estrutural porque a inteligibilidade da realidade física não é buscada na decomposição do mundo em partes com estados intrínsecos completos, mas na articulação entre estruturas locais e restrições globais. O realismo local estrutural, portanto, não restaura a separabilidade forte de Einstein. Ele a substitui por uma concepção mais fraca e mais adequada ao quadro quântico, qual seja, regiões e sistemas permanecem fisicamente distinguíveis, mas não possuem estados completos independentes do todo. A individualidade local é preservada no nível da estrutura espaço-temporal e das relações dinâmicas locais; a completude descritiva, porém, exige referência a estados globais e a correlações não fatoráveis.

Essa posição também evita um holismo ontológico radical. O holismo radical afirmaria que as partes não possuem qualquer estatuto físico próprio fora do todo. A proposta aqui defendida é diferente uma vez que as partes existem e são fisicamente localizáveis, mas sua descrição de estado não é autossuficiente. O todo não elimina as partes, porém impõe restrições sobre as possibilidades de articulação entre elas. Assim, a realidade física não é puramente local nem puramente global, mas estratificada, ou seja, local quanto à individuação de regiões, eventos e estruturas dinâmicas; global quanto às restrições de estado e às correlações. Essa formulação permite preservar o núcleo mais defensável do programa einsteiniano. O que deve ser mantido não é a separabilidade forte, mas a exigência de uma realidade objetiva, inteligível e independente da observação. A mecânica quântica mostra que essa realidade não pode ser descrita como uma soma de estados locais completos. Mas isso não implica que ela seja subjetiva, antirrealista ou dependente da consciência. Implica apenas que sua estrutura objetiva é mais complexa do que a ontologia clássica supunha.

A tese central pode ser formulada da seguinte maneira: a não-separabilidade quântica é primariamente uma propriedade da estrutura dos estados, e seu significado ontológico é real. Contudo, esse significado não obriga à aceitação de uma dinâmica não local ou de influências superluminais entre regiões espacialmente separadas. Ele exige, antes, a reformulação da separabilidade forte em uma separabilidade estrutural fraca, compatível com regiões fisicamente distintas, estados globalmente correlacionados e restrições invariantes sobre as possibilidades físicas. Desse modo, a mecânica quântica não refuta simplesmente o realismo local, mas refuta uma versão clássica desse realismo, qual seja, aquela que identifica realidade local com estados intrínsecos completos e independentes. O realismo que sobrevive após Bell e EPR precisa ser estrutural. Ele deve reconhecer que as correlações quânticas são objetivas, que a separabilidade forte falha e que a localidade só pode ser preservada se for entendida em sentido dinâmico e estrutural, não como fatorabilidade completa dos estados.

Essa conclusão reconcilia parcialmente Einstein com as lições da física contemporânea. Einstein tinha razão ao insistir que a física deve aspirar a uma descrição objetiva da realidade. Mas sua exigência de estados locais completos para sistemas espacialmente separados parece forte demais diante da estrutura quântica. O caminho mais promissor não é abandonar o realismo, nem retornar à separabilidade clássica, mas reformular a objetividade em termos de estruturas locais articuladas por estados globais e restrições invariantes.

5.3.4 Objeção: o realismo estrutural ainda é local?

A proposta desenvolvida nas seções anteriores pode ser confrontada com uma objeção decisiva. Se a mecânica quântica, especialmente após Bell, exige o abandono da independência estatística e da separabilidade forte, em que sentido a posição aqui defendida ainda poderia ser chamada de realista e local? Não haveria uma tensão entre, de um lado, a defesa de um realismo estrutural de inspiração einsteiniana e, de outro, a aceitação de uma estrutura

global que condiciona conjuntamente sistemas, aparatos e escolhas de medição?

A objeção é relevante porque impede uma formulação simplista da tese. Não basta dizer que a não-separabilidade é uma propriedade dos estados e não da ontologia. Essa distinção é útil, mas insuficiente se não for qualificada. Estados quânticos emaranhados codificam correlações objetivas que não podem ser reduzidas a propriedades locais independentes. Se essas correlações são reais, então há algum sentido em que a estrutura física do mundo não é separável. O problema é determinar que tipo de não-separabilidade está em jogo.

A primeira distinção necessária é entre não-localidade dinâmica e dependência global de estados. A não-localidade dinâmica envolve uma influência física superluminal entre regiões espacialmente separadas. Nesse caso, uma intervenção realizada em uma região produziria, de maneira direta, um efeito físico em outra região distante. Essa é precisamente a forma de ação à distância que Einstein rejeitava. A dependência global de estados, por outro lado, não exige uma influência propagando-se de uma parte a outra. Ela afirma que os estados locais não são completos de maneira independente, pois só adquirem sua determinação plena no interior de uma estrutura global. Essa distinção permite esclarecer a posição defendida aqui. O realismo estrutural dinamicamente local não pretende restaurar o realismo local clássico. Ele não afirma que cada região espacial possua um estado completo próprio, independente do restante do universo. Essa seria a separabilidade forte pressuposta no horizonte do argumento EPR. O que se procura preservar é outra coisa, qual seja, a ausência de influências dinâmicas superluminais e a possibilidade de compreender a realidade física como estrutura objetiva, ainda que globalmente condicionada.

Nesse sentido, a proposta deve abandonar explicitamente a separabilidade forte. A mecânica quântica, especialmente nos casos de emaranhamento, torna insustentável a ideia de que o estado do todo seja simplesmente determinado pela soma dos estados completos de suas partes espacialmente separadas. O estado global contém informação estrutural que não é recuperável apenas por meio dos estados locais. Portanto, se há realismo quântico, ele não pode ser um realismo de partes localmente completas. Essa conclusão, entretanto, não obriga a aceitar uma ontologia de ação instantânea à distância. O que Bell mostra é que não se pode manter simultaneamente todos os pressupostos do realismo local clássico: realismo, localidade, separabilidade, fatorabilidade probabilística e independência estatística. Uma vez mantidas as previsões quânticas, alguma dessas premissas precisa ser abandonada. A leitura mais comum sacrifica a localidade ou alguma forma robusta de realismo. A leitura aqui proposta sacrifica a independência estatística e a separabilidade forte, mas preserva a objetividade e a localidade dinâmica.

Essa solução, contudo, não é gratuita. Ao rejeitar a independência estatística, o superdeterminismo desloca o problema da não-localidade para o problema das correlações globais entre sistemas, aparatos e escolhas experimentais. O ganho é a preservação da localidade dinâmica, sendo que o custo é a renúncia à autonomia estatística dos contextos

de medição. Por isso, a posição defendida aqui não deve ser apresentada como restauração simples do programa de Einstein, mas como sua reconstrução estrutural sob condições pós-Bell. A independência estatística afirma que as variáveis relevantes para os resultados de medição são independentes das escolhas dos arranjos experimentais. No contexto de Bell, essa hipótese é essencial para derivar as desigualdades. O superdeterminismo rejeita justamente essa independência. As escolhas de medição e os estados dos sistemas medidos não são tratados como variáveis completamente autônomas, mas como partes de uma mesma história física global. Assim, as correlações observadas não precisam ser explicadas por uma influência não-local entre os dois lados do experimento; mas podem ser compreendidas como expressão de uma estrutura global que condiciona conjuntamente sistemas, aparatos e contextos experimentais.

Essa posição pode ser chamada de superdeterminismo einsteiniano forte, desde que o termo seja usado com cautela. Ela é “einsteiniana” porque procura preservar duas exigências centrais do pensamento de Einstein: a existência de uma realidade objetiva independente da observação e a recusa de uma ação física instantânea à distância. Ela é “forte” porque não se limita a acrescentar variáveis ocultas locais ao formalismo quântico. Ela rejeita a independência estatística e interpreta as correlações quânticas como efeitos de uma estrutura global da realidade.

Mas essa posição não preserva tudo o que Einstein parecia exigir no EPR. Em particular, ela não preserva a separabilidade ontológica forte. Sistemas espacialmente separados podem continuar sendo distintos no espaço-tempo e podem não trocar sinais ou influências superluminais, contudo, seus estados não são completos de maneira independente. Cada estado local é apenas um aspecto parcial de uma configuração global. A realidade física permanece objetiva, mas não é decomponível em partes autônomas no sentido clássico. A objeção, portanto, é parcialmente correta. Se por “localidade” entendermos a tese de que cada região espacial possui um estado completo e estatisticamente independente do restante do universo, então a proposta não é local. Mas essa é uma noção forte demais de localidade, pois incorpora a separabilidade ontológica e a independência estatística. Se, por outro lado, entendermos localidade como ausência de ação dinâmica superluminal e como preservação de uma estrutura espaço-temporal de propagação causal, então a posição ainda pode ser chamada de local em sentido qualificado.

A formulação mais precisa, portanto, não é “realismo local” em sentido simples, mas realismo estrutural dinamicamente local e globalmente condicionado. Ele é realista porque não reduz a mecânica quântica a mero instrumento de previsão, mas as estruturas de correlação são tomadas como aspectos objetivos do mundo. Ele é estrutural porque a realidade não é concebida como soma de propriedades intrínsecas locais, mas como rede de relações, invariantes e restrições globais. Ele é dinamicamente local porque não postula influências superluminais. E é globalmente condicionado porque abandona a independência estatística

e a completude autônoma dos estados locais.

Essa posição também evita o risco de colapsar em platonismo matemático. A estrutura global de que se fala aqui não é uma estrutura puramente formal, existente em um domínio matemático separado. Ela é física porque se manifesta em restrições objetivas sobre os fenômenos possíveis, quais sejam, padrões de correlação, limites de previsão, dependências entre estados e condições experimentais. A matemática representa essa estrutura, mas não a substitui. O realismo estrutural defendido aqui não afirma que a realidade seja apenas matemática, mas sim que a realidade física é melhor compreendida por meio das estruturas que permanecem estáveis e empiricamente eficazes no interior da teoria. A resposta à objeção pode, então, ser resumida em três pontos.

Primeiro, a não-separabilidade quântica tem relevância ontológica, mas não implica necessariamente ação dinâmica não-local. Segundo, a rejeição da independência estatística permite preservar a localidade dinâmica, mas apenas ao custo de abandonar a separabilidade forte. Terceiro, o realismo que sobrevive após Bell não é o realismo clássico de partes independentes, mas um realismo estrutural, no qual os estados locais são compreendidos como aspectos parciais de uma estrutura global. Ela preserva duas exigências centrais da posição de Einstein: a exigência de uma realidade objetiva e a recusa de uma ação física instantânea à distância. O que ela abandona não é a localidade dinâmica, mas a separabilidade forte pressuposta no horizonte do argumento EPR. A conclusão é que o realismo de Einstein pode sobreviver à mecânica quântica apenas se for deslocado de uma ontologia de estados locais completos para uma ontologia estrutural, dinamicamente local e globalmente condicionada.

A conclusão aqui defendida possui uma proximidade parcial com a resposta de Bohr ao EPR, na medida em que também rejeita a pressuposição de uma separabilidade forte entre sistemas espacialmente afastados. Assim como Bohr, a análise desenvolvida nesta dissertação considera problemático atribuir aos sistemas quânticos propriedades completas independentemente das condições que tornam possível sua determinação física. Contudo, a convergência termina nesse ponto. Em Bohr, essa crítica conduz a uma concepção fenomenológica e contextual da objetividade, fundada na inseparabilidade entre sistema, aparato e condições experimentais. Na presente proposta, ao contrário, a crítica à separabilidade forte é usada para reformular o realismo em termos estruturais, uma vez que as correlações quânticas não são tomadas apenas como limites da descrição experimental, mas como expressão de uma estrutura física global e objetiva.

Conclusão

Esta dissertação partiu de uma questão central: o compromisso de Einstein com a realidade objetiva sofreu uma transformação decisiva entre a formulação da relatividade e sua crítica posterior à mecânica quântica, ou esses dois momentos expressam uma mesma orientação filosófica fundamental? A resposta defendida ao longo do trabalho foi que há continuidade profunda no realismo de Einstein, mas também uma tensão interna relevante. Einstein permanece comprometido com a ideia de que a física deve descrever uma realidade objetiva independente da observação, contudo, a forma pela qual essa objetividade é concebida muda quando passamos da relatividade para a mecânica quântica.

No contexto da relatividade restrita, Einstein abandona elementos centrais da ontologia clássica, como o tempo absoluto, a simultaneidade absoluta e o repouso privilegiado, sem abandonar o realismo. Ao contrário, a relatividade mostra que a objetividade física não deve ser procurada naquilo que depende de um referencial particular, mas naquilo que permanece invariante através das transformações entre referenciais admissíveis. O real, nesse quadro, não é o que aparece de modo idêntico em todas as descrições particulares, mas o que se conserva na estrutura que conecta tais descrições. A relatividade, portanto, não representa uma dissolução da realidade objetiva, mas uma reformulação de seu critério.

A comparação com Poincaré foi importante para esclarecer esse ponto. Embora Poincaré tenha antecipado elementos técnicos fundamentais da relatividade, incluindo o tempo local, as transformações de Lorentz e a estrutura de grupo dessas transformações, sua abordagem permaneceu mais próxima de uma orientação convencionalista e eletrodinâmica. Einstein, por sua vez, atribuiu novo estatuto físico à estrutura relativística. A diferença entre ambos não se reduz à comparação de fórmulas ou resultados empíricos, mas diz respeito ao modo como cada teoria compreende a realidade física. Enquanto Poincaré ainda podia conservar estruturas subjacentes empiricamente ociosas, Einstein retira da ontologia da teoria aquilo que não desempenha papel físico efetivo. Nesse sentido, a relatividade einsteiniana expressa uma forma de realismo de invariantes.

Esse realismo de invariantes permitiu interpretar a relatividade como uma teoria realista, embora não no sentido clássico. Einstein não preserva uma ontologia de propriedades absolutas, nem um ponto de vista privilegiado sobre o mundo. Sua concepção de objetividade é estrutural no sentido de que a realidade física se manifesta nas relações invariantes, nas simetrias e nas estruturas que permanecem estáveis através de descrições coordenadas distintas. Assim, a crítica a leituras empiristas, operacionalistas, convencionalistas ou puramente epistemológicas da relatividade foi necessária para mostrar que a teoria de Einstein não reduz a física a procedimentos de medição ou convenções linguísticas. A medição é indispensável, mas não esgota o conteúdo físico da teoria.

A passagem para a mecânica quântica introduziu, porém, uma dificuldade mais pro-

funda. A interpretação de Copenhague, especialmente nas formulações de Bohr e Heisenberg, desloca a objetividade física para o domínio dos fenômenos experimentalmente definidos. Heisenberg enfatiza os limites de aplicação dos conceitos clássicos e a impossibilidade de atribuir simultaneamente valores definidos a certas grandezas conjugadas. Bohr, por sua vez, insiste na indispensabilidade da linguagem clássica e na ideia de que o fenômeno quântico deve incluir o sistema, o aparato e as condições experimentais. Essa posição não é um antirrealismo vulgar, pois não nega simplesmente a realidade física, mas reformula a objetividade em termos de comunicabilidade pública e condições de observação.

A crítica historiográfica a Copenhague permitiu mostrar, contudo, que essa interpretação não deve ser tomada como consequência lógica inevitável do formalismo quântico. A complementaridade, a renúncia a trajetórias clássicas e a rejeição de uma descrição causal subjacente constituem uma resposta coerente à crise dos conceitos clássicos, mas não encerram todas as possibilidades filosóficas. A existência de interpretações alternativas, como a teoria de Bohm, mostra que a acausalidade e a renúncia a uma ontologia não eram conclusões inevitáveis. O que a mecânica quântica torna insustentável é o realismo clássico simples, baseado em trajetórias definidas, propriedades locais completas e separabilidade forte. Disso não se segue, porém, que toda forma de realismo deva ser abandonada.

O argumento EPR torna essa tensão explícita. Einstein, Podolsky e Rosen não pretendiam negar o sucesso empírico da mecânica quântica, mas questionar sua completude. A questão era saber se a função de onda oferece uma descrição completa da realidade física ou se apenas codifica informações probabilísticas sobre resultados possíveis. Nesse sentido, uma teoria física completa deveria representar todos os elementos de realidade. Se, sem perturbar um sistema, é possível prever com certeza o valor de uma grandeza, então deveria haver um elemento de realidade correspondente a essa grandeza. A mecânica quântica, contudo, não atribui simultaneamente todos esses elementos ao sistema. Daí a conclusão do EPR: a função de onda seria incompleta. A resposta de Bohr ao EPR mostrou que a noção de realidade pressuposta por Einstein, Podolsky e Rosen dependia de uma separabilidade forte entre sistema e contexto experimental. Bohr percebeu que a atribuição de propriedades físicas não pode ser feita independentemente das condições que definem o fenômeno. Contudo, a presente dissertação interpreta essa lição de modo distinto. Em vez de limitar a realidade física ao fenômeno experimentalmente definido, propõe-se que a crítica bohriana à separabilidade seja incorporada a uma forma de realismo estrutural. A não-separabilidade não elimina a realidade objetiva, apenas indica que essa realidade não é composta por estados locais completos e independentes, mas por uma estrutura global de correlações e restrições.

A tese desta dissertação é que há uma tensão entre duas dimensões do realismo einsteiniano. Na relatividade, Einstein parece deslocar a objetividade física dos absolutos clássicos para estruturas invariantes ou covariantes, o que permite uma leitura estrutural de seu realismo. No EPR, entretanto, Einstein ainda recorre a uma exigência de separabilidade forte,

segundo a qual sistemas espacialmente separados devem possuir estados reais completos e independentes. A tensão não reside na invariância enquanto tal, mas na interpretação ontológica da invariância como critério de realidade objetiva. O problema central passa a ser, então, saber se o núcleo realista de Einstein pode sobreviver ao abandono da separabilidade forte. É nesse ponto que emerge a tensão entre dois aspectos do pensamento de Einstein. O Einstein da relatividade havia abandonado os absolutos clássicos em nome de uma objetividade estrutural fundada em invariantes. O Einstein do EPR, por outro lado, parece exigir uma forma robusta de separabilidade, qual seja, sistemas espacialmente separados deveriam possuir estados reais próprios e independentes. A dificuldade é que a mecânica quântica, especialmente no caso de estados emaranhados, parece negar precisamente essa exigência. O estado do todo não é, em geral, redutível à composição de estados locais completos das partes.

O teorema de Bell radicaliza o problema. Ele mostra que não basta acrescentar variáveis ocultas locais à mecânica quântica mantendo intactos todos os pressupostos clássicos. As correlações quânticas obrigam a abandonar alguma das condições envolvidas no realismo local clássico: localidade, separabilidade, fatorabilidade probabilística ou independência estatística. Desse modo, Bell não encerra a discussão filosófica, mas torna mais precisa a escolha conceitual que precisa ser feita. A questão passa a ser qual aspecto do realismo einsteiniano pode ser preservado e qual precisa ser reformulado.

A hipótese desenvolvida nesta dissertação foi que o núcleo mais profundo do realismo de Einstein não é a separabilidade forte, mas a exigência de uma realidade objetiva e inteligível. A separabilidade forte pertence a uma forma clássica de realismo, segundo a qual sistemas espacialmente separados devem possuir estados completos independentes. A mecânica quântica torna essa exigência difícil de sustentar. Mas a objetividade, compreendida estruturalmente, pode sobreviver. Nesse sentido, o realismo de invariantes da relatividade oferece uma pista para pensar a realidade quântica não como soma de propriedades locais independentes, mas como estrutura de relações, correlações e restrições globais. A proposta final, portanto, não consiste em restaurar integralmente o realismo local clássico de Einstein. Ela consiste em reformulá-lo. Se a independência estatística for negada, como no superdeterminismo, torna-se possível preservar uma forma de localidade dinâmica: não há necessidade de postular influências superluminais entre regiões espacialmente separadas. Contudo, essa preservação tem um preço, isto é, a autonomia estatística dos estados locais e a separabilidade ontológica forte precisam ser abandonadas. A realidade física permanece objetiva, mas não é decomponível em partes localmente completas.

Por isso, a posição mais precisa não deve ser chamada simplesmente de realismo local, mas de realismo estrutural dinamicamente local e globalmente condicionado. Ela é realista porque não reduz a teoria quântica a mero instrumento de previsão. Ela é estrutural porque entende a realidade em termos de relações, invariantes e correlações objetivas. Ela é

dinamicamente local porque rejeita a necessidade de uma ação física instantânea à distância. Mas é globalmente condicionada porque os estados locais, os aparatos e as configurações experimentais são compreendidos como aspectos de uma estrutura física mais ampla. Essa conclusão é ambivalente em relação a Einstein. De um lado, preserva-se o núcleo de sua exigência filosófica, qual seja, a física deve aspirar a uma descrição objetiva da realidade, e não apenas a um algoritmo de previsões. De outro, abandona-se uma parte importante de sua pressuposição no EPR, a ideia de que sistemas espacialmente separados devem possuir estados completos e independentes. O Einstein que sobrevive à mecânica quântica não é o defensor da separabilidade forte, mas o defensor da inteligibilidade objetiva da natureza.

Assim, a dissertação procurou mostrar que o debate Einstein-Bohr não deve ser lido como simples derrota do realismo pela mecânica quântica. O que a mecânica quântica derrota é uma determinada imagem clássica da realidade: local, separável, composta por propriedades intrínsecas completas e independentes. Mas o realismo, se reformulado estruturalmente, permanece uma possibilidade filosófica robusta. A realidade quântica pode não ser separável em sentido forte; ainda assim, pode ser objetiva, estruturada e independente da observação. A disputa, portanto, não é entre realidade e antirrealidade, mas entre diferentes conceitos de realidade: uma realidade clássica, separável e localmente completa, e uma realidade estrutural, objetiva, não separável em sentido forte, mas ainda compatível com a recusa de uma ação dinâmica superluminal.

Assim, a finalidade última desta dissertação foi defender que a ideia de realidade objetiva não é eliminada pela física moderna, mas transformada por ela. A relatividade desloca a objetividade dos absolutos clássicos para estruturas invariantes ou covariantes; a mecânica quântica, por sua vez, enfraquece a separabilidade forte sem obrigar à redução da teoria a mero instrumento preditivo. O que se preserva, portanto, não é a realidade objetiva em sentido clássico, entendida como conjunto de propriedades locais completas e independentes, mas uma realidade objetiva em sentido estrutural, isto é, uma ordem física independente da observação, acessível por meio das relações, restrições e invariantes que as teorias bem-sucedidas tornam inteligíveis.

A realidade, portanto, permanece em disputa. Entre as sombras quânticas e a luz relativística, o pensamento de Einstein revela tanto sua força quanto seus limites. Sua força está em recusar que o sucesso preditivo baste para encerrar a questão ontológica. Seu limite está em associar essa exigência de realidade a uma forma forte de separabilidade. A contribuição filosófica mais promissora de Einstein talvez esteja justamente em permitir uma reformulação no sentido de não abandonar a realidade objetiva, mas compreender que ela pode ser mais estrutural, mais global e menos separável do que a física clássica imaginava.

Referências

- ANGEL, R. B. **Relativity: The Theory and Its Philosophy: Foundations & Philosophy of Science & Technology**. [S.l.]: Elsevier, 2014. Citado nas pp. 47, 50, 53, 55, 59 e 61.
- BACCIAGALUPPI, G. Did bohr understand epr? **philsci archive**, 2014. Citado na p. 93.
- BACCIAGALUPPI, G.; VALENTINI, A. Quantum theory at the crossroads: Reconsidering the 1927 solvay conference. **arXiv preprint quant-ph/0609184**, 2006. Citado na p. 83.
- BALLENTINE, L. E. The statistical interpretation of quantum mechanics. **Reviews of Modern Physics**, v. 42, n. 4, p. 358–381, 1970. DOI 10.1103/RevModPhys.42.358. Citado na p. 122.
- BELL, J. S. On the einstein podolsky rosen paradox. **Physics Physique Fizika**, APS, v. 1, n. 3, p. 195, 1964. Citado nas pp. 130 e 143.
- BELL, J. S. **The theory of local beables**. [S.l.], 1975. Citado na p. 131.
- BELL, J. S. **Speakable and unspeakable in quantum mechanics: Collected papers on quantum philosophy**. [S.l.]: Cambridge university press, 2004. Citado na p. 122.
- BELLER, M. **Quantum dialogue: The making of a revolution**. [S.l.]: University of Chicago Press, 1999. Citado nas pp. 77, 82, 83, 96, 97, 98, 99, 103, 108, 123 e 124.
- BELOT, G. Understanding electromagnetism. **The British Journal for the Philosophy of Science**, v. 49, n. 4, p. 531–555, 1998. DOI 10.1093/bjps/49.4.531. Citado na p. 133.
- BOHM, D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables. i. **Physical review**, APS, v. 85, n. 2, p. 166, 1952. Citado nas pp. 125 e 126.
- BOHR, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? **Physical Review**, v. 48, n. 8, p. 696–702, 1935. DOI 10.1103/PhysRev.48.696. Citado nas pp. 76, 87, 90 e 93.
- BOHR, N. Discussion with einstein on epistemological problems in atomic physics. In: **Niels Bohr Collected Works**. [S.l.]: Elsevier, 1996. v. 7, p. 339–381. Citado na p. 87.
- BOHR, N. *et al.* **The quantum postulate and the recent development of atomic theory**. [S.l.]: Printed in Great Britain by R. & R. Clarke, Limited, 1928. v. 3. Citado nas pp. 76 e 87.
- BORN, M. Quantenmechanik der stoßvorgänge. **Zeitschrift für physik**, Springer, v. 38, n. 11, p. 803–827, 1926. Citado na p. 105.
- BORN, M.; EINSTEIN, A.; BORN, H.; BUCHWALD, D.; THORNE, K. S.; BORN, G. **The Born-Einstein Letters: Friendship, Politics and Physics in Uncertain Time:**

- Correspondence Between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955.** [S.L.]: Macmillan, 2005. Citado na p. 74.
- BROGLIE, L. D. **Recherches sur la théorie des quanta.** Tese (Doutorado) — Migration-université en cours d'affectation, 1924. Citado na p. 78.
- BROGLIE, L. D. **Savants et découvertes.** [S.L.]: Albin Michel, 2008. Citado na p. 36.
- CARNAP, R. **The Logical Syntax of Language.** London: Kegan Paul, Trench, Trubner & Co., 1937. Citado na p. 47.
- CARNAP, R. Empiricism, semantics, and ontology. **Revue Internationale de Philosophie**, v. 4, n. 11, p. 20–40, 1950. Citado na p. 47.
- CARNAP, R. Observation language and theoretical language. **Rudolf Carnap, logical empiricist: materials and perspectives**, D. Reidel Dordrecht, p. 75–85, 1958. Citado na p. 117.
- CERF, R. Dismissing renewed attempts to deny einstein the discovery of special relativity. **American journal of physics**, American Association of Physics Teachers, v. 74, n. 9, p. 818–824, 2006. Citado na p. 36.
- CHIBENI, S. S. **Aspectos da descrição física da realidade.** Tese (Doutorado) — [sn], 1993. Citado na p. 21.
- COPLESTON, F. **History of Philosophy Volume 1: Greece and Rome.** [S.L.]: A&C Black, 2003. v. 1. Citado na p. 18.
- CUSHING, J. T.; FINE, A.; GOLDSTEIN, S. **Bohmian mechanics and quantum theory: an appraisal.** [S.L.]: Springer Science & Business Media, 1996. v. 184. Citado na p. 104.
- DUHEM, P. A teoria física: seu objeto e sua estrutura. **Rio de Janeiro: EdUERJ**, 2014. Citado na p. 63.
- D'URR, D.; GOLDSTEIN, S.; ZANGH'I, N. Bohmian mechanics and the meaning of the wave function. In: COHEN, R. S.; HORNE, M.; STACHEL, J. (Ed.). **Experimental Metaphysics: Quantum Mechanical Studies for Abner Shimony, Volume One.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997. p. 25–38. Citado na p. 122.
- EARMAN, J. **World Enough and Space-Time: Absolute versus Relational Theories of Space and Time.** Cambridge, MA: MIT Press, 1989. Citado na p. 133.
- EINSTEIN, A. On the electrodynamics of moving bodies. **Annalen der physik**, 1905. Citado nas pp. 29, 30, 31 e 43.
- EINSTEIN, A. Zur quantentheorie der strahlung. **First published in**, p. 121–128, 1916. Citado na p. 76.
- EINSTEIN, A. **Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (gemeinverständlich).** Braunschweig: Vieweg. Repr. [S.L.]: CPAE, 1917. Citado na p. 40.

- EINSTEIN, A. Physics and reality. **Journal of the Franklin Institute**, Elsevier, v. 221, n. 3, p. 349–382, 1936. Citado na p. 137.
- EINSTEIN, A. Autobiographical notes (pa schilpp, trans.). **Albert Einstein: Philosopher-scientist**. New York: Tudor, 1949. Citado nas pp. 76, 89, 90 e 137.
- EINSTEIN, A. Reply to criticisms. **Albert Einstein: philosopher-scientist**, Tudor Evans-ton, v. 2, p. 665–688, 1949. Citado nas pp. 56, 58, 61, 64, 77, 82 e 88.
- EINSTEIN, A. On the generalized theory of gravitation. **Scientific American**, JSTOR, v. 182, n. 4, p. 13–17, 1950. Citado na p. 65.
- EINSTEIN, A. Principles of research. In: **Ideas and Opinions**. New York: Crown Publishers, 1954. p. 224–227. Citado nas pp. 40 e 63.
- EINSTEIN, A. Letter to e. schrodinger, 31 may 1928. **Letters on Wave Mechanics**,. Klein, M., Ed.; **Philosophical Library: New York**, 1967. Citado na p. 86.
- EINSTEIN, A. **The Collected Papers of Albert Einstein, Volume 15 (Translation Supplement): The Berlin Years: Writings & Correspondence, June 1925–May 1927**. [S.l.]: Princeton University Press, 1987. v. 15. Citado na p. 79.
- EINSTEIN, A. **The meaning of relativity**. [S.l.]: Routledge, 2003. Citado nas pp. 45 e 88.
- EINSTEIN, A. **Born-Einstein letters, 1916-1955: Friendship, politics and physics in uncertain times**. [S.l.]: Springer, 2005. Citado na p. 76.
- EINSTEIN, A. Física e realidade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 28, p. 9–22, 2006. Citado na p. 138.
- EINSTEIN, A. **Notas autobiográficas**. [S.l.]: Nova Fronteira, 2019. Citado na p. 45.
- EINSTEIN, A. *et al.* Zur elektrodynamik bewegter körper. **Annalen der physik**, Springer, v. 17, n. 10, p. 891–921, 1905. Citado na p. 87.
- EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B.; ROSEN, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? **Physical review**, APS, v. 47, n. 10, p. 777, 1935. Citado nas pp. 76, 77, 88, 89, 127, 129, 137 e 138.
- ESFELD, M. The modal nature of structures in ontic structural realism. **International Studies in the Philosophy of Science**, v. 23, n. 2, p. 179–194, 2009. DOI 10.1080/02698590903006917. Citado na p. 136.
- FINE, A. Einstein's realism. **The shaky game: Einstein, realism, and the quantum theory**, p. 86–111, 1986. Citado nas pp. 46 e 137.
- FINE, A. **The shaky game**. [S.l.]: University of Chicago Press, 1996. Citado nas pp. 77 e 124.
- FINE, A. Bohr's response to epr: Criticism and defense. **Iyyun: The Jerusalem Philosophical Quarterly**/: , JSTOR, p. 31–56, 2007. Citado na p. 94.

- FRAASSEN, B. C. V. **The scientific image**. [S.l.]: Oxford University Press, 1980. Citado na p. 21.
- FRENCH, S. **The structure of the world: Metaphysics and representation**. [S.l.]: Oxford University Press (UK), 2014. Citado na p. 135.
- FUCHS, C. A.; SCHACK, R. Quantum-bayesian coherence. **Reviews of Modern Physics**, v. 85, n. 4, p. 1693–1715, 2013. DOI 10.1103/RevModPhys.85.1693. Citado na p. 122.
- GARRETT, B. **Metafísica**. [S.l.]: Artmed Editora, 2016. Citado na p. 20.
- GOLDBERG, S. Poincaré's silence and einstein's relativity: The role of theory and experiment in poincaré's physics. **British Journal for the History of Science**, v. 5, n. 1, p. 73–84, 1970. DOI 10.1017/S0007087400010633. Citado na p. 35.
- GRIFFITHS, D. J.; SCHROETER, D. F. **Introduction to quantum mechanics**. [S.l.]: Cambridge university press, 2018. Citado na p. 78.
- HAAG, R. **Local quantum physics: Fields, particles, algebras**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. Citado na p. 133.
- HARRIGAN, N.; SPEKKENS, R. W. Einstein, incompleteness, and the epistemic view of quantum states. **Foundations of Physics**, v. 40, n. 2, p. 125–157, 2010. DOI 10.1007/s10701-009-9347-0. Citado na p. 122.
- HEISENBERG, W. **Física e Filosofia**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1987. Citado nas pp. 95, 100, 101 e 102.
- HEISENBERG, W. **A Parte e o Todo**. 2ª edição. ed. Rio de Janeiro: Contraponto Editora, 2000. Citado na p. 106.
- HERMANN, G. The natural-philosophical foundations of quantum mechanics. In: CRULL, E.; BACCIAGALUPPI, G. (Ed.). **Grete Hermann: Between Physics and Philosophy**. Dordrecht: Springer, 2017. p. 239–278. Citado na p. 126.
- HOLTON, G. On the origins of the special theory of relativity. In: **Thematic Origins of Scientific Thought: Kepler to Einstein**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1973. p. 165–183. Citado na p. 35.
- HOWARD, D. Einstein on locality and separability. **Studies in History and Philosophy of Science Part A**, Elsevier, v. 16, n. 3, p. 171–201, 1985. Citado nas pp. 77 e 137.
- JAMMER, M. Philosophy of quantum mechanics. the interpretations of quantum mechanics in historical perspective. **American Institute of Physics**, 1974. Citado na p. 126.
- JANSSEN, M. H. P. **A Comparison Between Lorentz's Ether Theory and Special Relativity in the Light of the Experiments of Trouton and Noble**. Tese (Doutorado) — University of Pittsburgh, 1995. Citado nas pp. 35 e 39.

- JR, O. F.; JR, O. P.; BROMBERG, J. L. **Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais**. [S.l.]: Eduepb, 2011. Citado na p. 138.
- JR., O. P. O sujeito na física quântica. 2001. Texto disponível no site do autor, Departamento de Filosofia, FFLCH-USP. Citado na p. 109.
- KATZIR, S. Poincaré's relativistic physics: Its origins and nature. **Physics in Perspective**, Springer, v. 7, p. 268–292, 2005. Citado na p. 35.
- KUMAR, M. **Quantum: Einstein, Bohr and the great debate about the nature of reality**. [S.l.]: Icon Books Ltd, 2008. Citado na p. 68.
- LADYMAN, J.; ROSS, D. **Every thing must go: Metaphysics naturalized**. [S.l.]: Oxford university press, 2007. Citado nas pp. 133 e 135.
- LOGUNOV, A. A. Henri poincaré and relativity theory. **arXiv preprint physics/0408077**, 2004. Citado na p. 38.
- LOGUNOV, A. A. **Henri Poincare and Relativity Theory**. 2005. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/physics/0408077>. Citado na p. 38.
- MAKOTO, K. Hiromatsu on mach's philosophy and relativity theory. **European Journal of Japanese Philosophy: EJJP**, Chisokudo, n. 1, p. 149–188, 2016. Citado na p. 44.
- MAUDLIN, T. **Philosophy of physics: Quantum theory**. [S.l.]: Princeton University Press, 2019. Citado nas pp. 115, 116 e 139.
- MEADOWS, T. Risk and theoretical equivalence in mathematical foundations. **Synthese**, Springer, v. 202, n. 5, p. 165, 2023. Citado na p. 47.
- MEHRA, J.; RECHENBERG, H. **The historical development of quantum theory**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2000. v. 1. Citado na p. 91.
- MICHELSON, A. A. Art. xxi.–the relative motion of the earth and the luminiferous ether. **American Journal of Science (1880-1910)**, American Periodicals Series II, v. 22, n. 128, p. 120, 1881. Citado nas pp. 25 e 26.
- MICHELSON, A. A.; MORLEY, E. W. On the relative motion of the earth and the luminiferous ether. **American journal of science**, American Journal of Science, v. 3, n. 203, p. 333–345, 1887. Citado na p. 26.
- MILLER, A. I. A study of henri poincaré's "sur la dynamique de l'électron". **Archive for History of Exact Sciences**, Springer, v. 10, p. 207–328, 1973. Citado na p. 37.
- NEUMANN, J. V. **Mathematical foundations of quantum mechanics: New edition**. [S.l.]: Princeton university press, 2018. Citado na p. 118.
- NORTON, J. D. How hume and mach helped einstein find special relativity. **Discourse on a new method: Reinvigorating the marriage of history and philosophy of science**, Open Court Chicago and La Salle, p. 359–386, 2010. Citado na p. 31.

- PAIS, A. **Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein: The Science and the Life of Albert Einstein**. [S.l.]: Oxford University Press, USA, 1982. Citado nas pp. 33, 75 e 78.
- PAIS, A. Sutil é o senhor.. **A ciência ea vida de Albert Einstein**, Ed. Nova Fronteira, 1995. Citado nas pp. 25, 26, 27, 43 e 116.
- PAULI, W. **Theory of relativity**. [S.l.]: Courier Corporation, 2013. Citado na p. 40.
- POINCARÉ, H. La mesure du temps. **Revue de métaphysique et de morale**, JSTOR, v. 6, n. 1, p. 1–13, 1898. Citado na p. 26.
- POINCARÉ, H. **La théorie de Lorentz et le principe de réaction**, **Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles**, 5. [S.l.]: Wikisource Saint Petersburg, FL, USA, 1900. Citado na p. 28.
- POINCARÉ, H. **The value of science: essential writings of Henri Poincaré**. [S.l.]: Modern library, 2012. Citado nas pp. 26 e 38.
- POINCARÉ, H. The principles of mathematical physics. *In: The Value of Science*. [S.l.]: Science Press, 1905. p. 296–317. Discurso no Congresso Internacional de Artes e Ciências, St. Louis, 1904. Citado na p. 26.
- PROKHOVNIK, S. J. Did einstein's programme supersede lorentz's? **British Journal for the Philosophy of Science**, v. 25, n. 4, p. 336–340, 1974. DOI 10.1093/bjps/25.4.336. Citado na p. 35.
- PUSEY, M. F.; BARRETT, J.; RUDOLPH, T. On the reality of the quantum state. **Nature Physics**, v. 8, p. 475–478, 2012. DOI 10.1038/nphys2309. Citado na p. 122.
- PUTNAM, H. **Philosophy of Logic**. New York: Harper Row, 1971. Citado na p. 124.
- QUINE, W. V. O. Two dogmas of empiricism. **The Philosophical Review**, v. 60, n. 1, p. 20–43, 1951. Citado na p. 124.
- REICHENBACH, H. **The Philosophy of Space and Time**. New York: Dover, 1958. Citado na p. 47.
- REICHENBACH, H. **The philosophy of space and time**. [S.l.]: Courier Corporation, 2012. Citado na p. 60.
- SCHAFFNER, K. F. Einstein versus lorentz: Research programmes and the logic of comparative theory evaluation. **British Journal for the Philosophy of Science**, v. 25, n. 1, p. 45–78, 1974. DOI 10.1093/bjps/25.1.45. Citado na p. 35.
- SCHILPP, P. A. Albert einstein, autobiographical notes: a centennial edition. **Albert Einstein**, 1979. Citado na p. 66.

- SCHRÖDINGER, E. Die gegenwärtige situation in der quantenmechanik. **Naturwissenschaften**, Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, v. 23, n. 50, p. 844–849, 1935. Citado na p. 91.
- SHANKAR, R. **Principles of quantum mechanics**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. Citado nas pp. 78 e 118.
- SOLVAY, E.; LANGEVIN, P.; BROGLIE, M. *et al.* La théorie du rayonnement et les quanta: rapports et discussions de la réunion tenue à bruxelles du 30 octobre au 3 novembre 1911; la théorie du rayonnement et les quanta: rapports et discussions de la réunion tenue à bruxelles du 30 octobre au 3 novembre 1911; the theory of radiation and quanta: reports and discussions of the meeting held in brussels from october 30 to november 3, 1911. In: **First International Solvay Conference: "The Theory of Radiation and Quanta"**. [S.l.: s.n.], 1911. Citado na p. 75.
- TASCHETTO, D. Rewriting the quantum “revolution”. **Studies in History and Philosophy of Science**, v. 109, p. 72–88, 2025. DOI 10.1016/j.shpsa.2024.12.006. Citado nas pp. 69 e 70.
- VALENTINI, A. Pilot-wave theory of fields, gravitation and cosmology. In: **Bohmian mechanics and quantum theory: An appraisal**. [S.l.]: Springer, 1996. p. 45–66. Citado na p. 104.
- WALTER, S. Hypothesis and convention in poincaré’s defense of galilei spacetime. **The significance of the hypothetical in the natural sciences**, Walter de Gruyter, p. 193–219, 2009. Citado na p. 35.
- WEINERT, F. Einstein and the laws of physics. **researchgate.net**, 2007. Citado na p. 46.
- ZAHAR, E. Why did einstein’s programme supersede lorentz’s? (i). **British Journal for the Philosophy of Science**, v. 24, n. 2, p. 95–123, 1973. DOI 10.1093/bjps/24.2.95. Citado na p. 35.



UnB