

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Ramon Wagner

No Underground da Teoria Quântica:
A estabilização do Teorema de Bell na Epistemological Letters

Porto Alegre

2022

Ramon Wagner

No Underground da Teoria Quântica:
A estabilização do Teorema de Bell na Epistemological Letters

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ensino de Física pelo Programa de Pós-graduação em Ensino de Física do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Dr. Nathan Willig Lima

Co-orientador: Dr. Matheus Monteiro Nascimento

Porto Alegre

2022

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

Gostaria de deixar meu agradecimento a todos professores do PPGEnFis pelas reflexões oportunizadas durante as disciplinas as quais cursei, em especial aos professores Nathan e Matheus por toda a contribuição, pelas orientações e sugestões que foram essenciais para o desenvolvimento da pesquisa. Gostaria de agradecer também...

... aos meus pais, Esther e Jandir, por toda ajuda e incentivo ao longo dos meus estudos, por acreditarem e influenciarem na jornada em busca dos meus sonhos. Aos meus irmãos, Diana, Karina e Ruan, pela compreensão e carinho durante meus períodos de estudo. Esse agradecimento se estende também à Eduardo e Jeferson e às minhas sobrinhas Amanda e Helena.

...à minha namorada, Pétra, pela compreensão, auxílio e pelas conversas que me alegravam e acalmavam durante o desenvolvimento da minha pesquisa.

...aos meus colegas, por todas as conversas, risadas, momentos de descontração e reflexões ao longo do desenvolvimento dos trabalhos durante o mestrado.

...à todas as pessoas que contribuíram para que eu chegasse até aqui e que me apoiaram independentemente das minhas escolhas.

RESUMO

Na presente dissertação, desenvolvemos uma investigação cujo objetivo geral é analisar o papel da *Epistemological Letters*, um veículo extra-oficial, no desenvolvimento da Teoria Quântica e, mais especificamente, como se deu a estabilização do Teorema de Bell nesse periódico. Além disso, verificamos quais foram os elementos traduzidos quando os debates relacionados ao autor, na *Epistemological Letters*, foram apresentados em periódicos oficiais. Para o desenvolvimento da pesquisa, foi utilizado o referencial da Teoria Ator-Rede (TAR) de Bruno Latour, em diálogo com a História Cultural. Partindo da análise das trinta e seis edições da *Epistemological Letters*, buscamos, inicialmente, compreender quais as discussões ocorridas no periódico, quais os autores envolvidos e a quais instituições esses autores pertenciam. Percebemos com isso, dentre outros aspectos importantes, o destaque dado às discussões em torno do Teorema de Bell e a relação com a controvérsia que estava presente na época de publicação do periódico, envolvendo os fundamentos da Teoria Quântica. Com isso, prosseguimos a pesquisa com a análise de como o Teorema de Bell se estabilizou, através do referencial da TAR e qual o contexto histórico que ocasionou ou permitiu tal fenômeno. Por fim, examinamos quatro trabalhos de Bell publicados em periódicos oficiais, que tratavam dos mesmos temas discutidos na *Epistemological Letters*, ou seja, localidade na mecânica quântica (teoria dos Beables locais), Teorema de Bell e o problema da Teoria Quântica em explicar o que é observador e o que é observável (separar o clássico do quântico). Isso oportunizou uma investigação a respeito dos possíveis elementos que foram traduzidos ou se estabilizaram, nas publicações posteriores em periódicos oficiais quando comparados aos artigos publicados no meio extra-oficial em questão. Nossas conclusões sobre a estabilização do Teorema de Bell na *Epistemological Letters* foram que conforme a discussão ganhou espaço e foi adaptada para testes experimentais, as menções ao Teorema de Bell foram mantidas iguais ou aumentavam e, em contraponto, as referências ao trabalho original do autor foram diminuindo. Essa relação de diminuição de referências ao trabalho original do autor caracteriza a estabilização do actante, tornando o conceito (desigualdade de Bell) uma caixa-preta. Em relação às traduções, quando consideradas as publicações em periódicos oficiais, constatamos que Bell, de forma geral, adicionava elementos aos seus argumentos buscando fortalecê-los em relação à forma como apareciam na

Epistemological Letters, por vezes, também, modificando-os para adaptá-los ao público-alvo.

Palavras-chave: Epistemological Letters; Teoria Ator-Rede; Teoria Quântica; Ensino de Física.

ABSTRACT

In the present dissertation, we develop an investigation whose general objective is to analyze the role of Epistemological Letters, an unofficial vehicle, in the development of Quantum Theory and, more specifically, how the stabilization of Bell's Theorem took place in this journal. In addition, we verified which elements were translated when the debates related to the author, in Epistemological Letters, were presented in official journals. For the development of the research, Bruno Latour's Actor-Network Theory (ANT) framework was used, in dialogue with Cultural History. Starting from the analysis of the thirty-six editions of Epistemological Letters, we initially sought to understand the discussions that took place in the journal, which authors were involved and to which institutions these authors belonged. With this, we perceive, among other important aspects, the emphasis given to the discussions around Bell's Theorem and the relationship with the controversy that was present at the time of publication of the journal, involving the foundations of Quantum Theory. With that, we continued the research with the analysis of how Bell's Theorem was stabilized, through the ANT framework and what was the historical context that caused or allowed such phenomenon. Finally, we examine four works by Bell published in official journals, which dealt with the same topics discussed in Epistemological Letters, namely, locality in quantum mechanics (local Beables theory), Bell's Theorem and the problem of Quantum Theory in explaining what is observer and what is observable (separating the classical from the quantum). This provided an opportunity to investigate the possible elements that were translated or stabilized in later publications in official journals when compared to articles published in the unofficial medium in question. Our conclusions regarding the stabilization of Bell's Theorem in Epistemological Letters were that as the discussion gained space and was adapted for experimental testing, mentions of Bell's Theorem were kept equal or increased and, in contrast, references to the author's original work were decreasing. This relationship of decreasing references to the author's original work characterizes the stabilization of the actant, making the concept (Bell's inequality) a black box. Regarding the translations, when considering publications in official journals, we found that Bell, in general, added elements to his arguments seeking to strengthen them in relation to the way they appeared in Epistemological Letters, sometimes also modifying them to adapt them to the target audience.

Keywords: Epistemological Letters; Actor-Network Theory; Quantum Theory; Physics Teaching.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2.3	QUESTÕES DE PESQUISA	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	HISTORIOGRAFIA E HISTÓRIA DA CIÊNCIA.....	18
3.2	ESTUDOS SOBRE PERIÓDICOS	23
3.3	TEORIA ATOR-REDE DE BRUNO LATOUR.....	25
3.3.1	A não modernidade e a crítica ao conceito tradicional de “social”	26
3.3.2	As cinco fontes de incerteza	29
3.3.2.1	Não existem grupos, apenas formação de grupos	29
3.3.2.2	A ação é assumida	31
3.3.2.3	Os objetos também agem	32
3.3.2.4	Questões de interesse vs Questões de fato	35
3.3.2.5	O risco de escrever um relato.....	37
3.3.3	Rastreando associações (tornando o social plano)	39
3.3.3.1	Localizando o Global	40
3.3.3.2	Redistribuindo o local	41
3.3.3.3	Construção de conectores.....	43
3.3.3.4	Da sociedade ao coletivo	44
3.4	O CONCEITO DE “TRADUÇÃO”	46
3.5	ALGUMAS IMPLICAÇÕES DA TEORIA ATOR-REDE PARA A PESQUISA EM HISTÓRIA DA CIÊNCIA	48
4	TRAJETÓRIA METODOLÓGICA	51
4.1	ANÁLISE DE CORRESPONDÊNCIA.....	54
5	VISÃO GERAL SOBRE A EPISTEMOLOGICAL LETTERS	58
5.1	TEOREMA DE BELL	60
5.2	CONTEXTO HISTÓRICO DE CRIAÇÃO DA EPISTEMOLOGICAL LETTERS.....	64
5.3	AUSPÍCIOS E ORGANIZAÇÃO	73

5.4	A ESTABILIZAÇÃO DO TEOREMA DE BELL NA <i>EPISTEMOLOGICAL LETTERS</i>	74
6	A TRADUÇÃO DOS TRABALHOS DE BELL PARA PERIÓDICOS OFICIAIS.....	98
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
	REFERÊNCIAS.....	122
	ANEXO A – O QUE É O PARADOXO EPR? UMA RECONSTRUÇÃO DIDÁTICA DO ARTIGO DE EINSTEIN, PODOLSKY E ROSEN (ARTIGO ORIGINAL).....	131
	ANEXO B - UMA RECONSTRUÇÃO DIDÁTICA DA APRESENTAÇÃO ORIGINAL DO TEOREMA DE BELL: <i>SOBRE O PARADOXO DE EINSTEIN, PODOLSKY E ROSEN</i> (ARTIGO ORIGINAL, SUBMETIDO EM ABRIL DE 2022)	147
	APÊNDICE C – MATERIAL SUPLEMENTAR DE “UMA RECONSTRUÇÃO DIDÁTICA DA APRESENTAÇÃO ORIGINAL DO TEOREMA DE BELL: <i>SOBRE O PARADOXO DE EINSTEIN, PODOLSKY E ROSEN</i> ”.	166

1 INTRODUÇÃO

Com a descoberta das limitações da mecânica clássica, no final do século XIX e início do século XX, foi oportunizado o surgimento de uma nova área de estudo dentro da Física, a chamada Teoria Quântica. As discussões relacionadas a tal tema, juntamente com a relatividade de Einstein, trouxeram não somente soluções e explicações para os problemas da época, mas também, controvérsias em torno dos fundamentos teóricos e filosóficos da própria Física. Olival Freire Jr (2003;2015) aponta que a história da Teoria Quântica pode ser classificada em três períodos com relação ao papel desempenhado por tais controvérsias filosóficas: o primeiro período é marcado pelo predomínio da chamada interpretação da Complementaridade, o segundo período envolve o surgimento de interpretações alternativas para a Teoria Quântica e o início de uma transição entre a controvérsia científica e a metafísica e, por fim, no terceiro período, tem-se a consolidação da controvérsia científica e as implicações filosóficas (FREIRE JR., 2003).

O primeiro período, caracterizado pela adesão dos físicos à interpretação da complementaridade de Bohr (GOMATAM, 2007; HOWARD, 2004), inicia após a conferência de Solvay em 1927. Apesar dessas discussões, muitos dos físicos tradicionais da época acharam que essas discussões não tinham interferência na Física, e teriam mais relações com ontologia e epistemologia, chegando a caracterizar esse debate como “metafísico”. Em 1932, John Von Neumann publicou o livro *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (1932) no qual estariam os fundamentos matemáticos da Mecânica Quântica, na forma de axiomas, destacando-se a impossibilidade de serem adicionadas novas variáveis (sendo estas, ocultas) aos problemas e também foi interpretada por muitos físicos como mais um suporte a interpretação da Complementaridade, apesar de não se restringir a ela. Esse primeiro período histórico analisado por Freire Jr (2003) destacava a negação de que a controvérsia Física fosse vista como controvérsia científica, como uma forma de eliminar a tendência ao “metafísico”. Após a Segunda Guerra Mundial, algumas relações ideológicas e políticas fizeram com que, até certo ponto, a interpretação da complementaridade perdesse um pouco da sua força, em determinados países. Na União Soviética, a ideologia marxista fez com que teorias consideradas idealistas perdessem força de discussão, devido a influência materialista. Já nos Estados

Unidos, a necessidade de compreender os fenômenos atômicos e subatômicos fez com que o foco dos físicos se desse em aplicações da teoria, e não em especulações abstratas. Esse caráter pragmatista operacionalista fez com que grande parte dos físicos americanos não dessem atenção às questões dos fundamentos da TQ, fazendo com que os EUA, um dos centros de estudos da TQ pós segunda guerra, não tivessem grande interesse na Complementaridade (FREIRE JR., 2003, 2015).

O segundo período é caracterizado pelo início da transição entre o primeiro contexto histórico e a institucionalização da controvérsia na Teoria Quântica. David Bohm (1952) sugeriu em seu artigo "*A suggested interpretation of the Quantum Theory in terms of 'hidden' variables*", uma interpretação alternativa à Complementaridade, chamada de "Variáveis Ocultas", modificando o formalismo quântico para inserir um modelo em que as partículas teriam trajetória bem definida. O surgimento da interpretação alternativa teve uma consequência de grande importância, que foi motivação para que J. Bell reexaminasse os argumentos de Von Neumann (sobre a impossibilidade da adição de novas variáveis à Teoria Quântica) e encontrasse uma contradição, onde pôde compreender que o argumento era válido somente para Variáveis Ocultas locais e não para as Variáveis Ocultas Não-Locais (FREIRE JR., 2003, 2015). É importante destacar que em 1935 a matemática e filósofa Grete Hermann, já havia examinado a prova de Von Neumann e encontrado uma falha, a qual Bell detectou posteriormente, porém acabou sendo ignorada pela comunidade física na época.

Alguns anos depois, John Bell publicou um artigo que afetou a forma como uma grande parte dos físicos compreendia a Teoria Quântica e estabeleceu uma diferença entre fenômenos quânticos que não poderiam ser explicados classicamente. Esse artigo foi uma resposta ao que ficou conhecido como paradoxo de Einstein-Podolsky-Rosen (EPR), uma das críticas mais fortes à incompletude da TQ. O artigo "*On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox*" (BELL, 1964) apresentou uma desigualdade a qual as teorias realistas locais deveriam obedecer, mostrando então que a TQ violava a desigualdade (como era esperado) e continha caráter não-local. Portanto, o Teorema de Bell se mostrou importante para muitas áreas da física e também áreas não diretamente relacionadas a ela, deixando claro que poderiam existir diferentes interpretações em relação aos fenômenos quânticos. Isso fez emergir a polêmica de que seria possível arranjar experimentos capazes de refutar ou corroborar diferentes formulações da Teoria Quântica. Então Everett (1957), após tentar unificar gravitação

e quântica, criou uma teoria em que não houvesse colapso da função de onda, apontando para um domínio em que a Complementaridade não poderia ser aplicada. Isso acabou dividindo opiniões entre os adeptos da interpretação da Complementaridade (FREIRE JR., 2003). Eugene Wigner (1963) desenvolveu uma descrição mais sofisticada do interacionismo mente-corpo, em que o impacto do observador não poderia ser eliminado.

Um dos primeiros indícios da consolidação da controvérsia foi a fundação da revista *Foundations of Physics*, em 1970, pois no corpo editorial da revista estavam atores que se mantiveram durante muito tempo em lados opostos nas disputas sobre temáticas da Teoria Quântica, como de Broglie e Bohm ao lado de Fock e, também com visões epistemológicas distintas, Popper e Wigner (FREIRE JR., 2003). Ainda em 1970, ocorreu uma escola de verão, onde foi tratado o tema dos fundamentos da Teoria Quântica e a realização de uma crítica à instrumentalização da Física, dirigida por d'Espagnat, na qual se expuseram palestrantes como Wigner, Jauch, Shimony, d'Espagnat, De Broglie, Bell, Selleri e Bohm. Uma conferência realizada em Erice, em 1976, permitiu um ponto de virada, de acordo com John F. Clauser (que, alguns anos antes, tentava realizar um experimento favorável ao teorema de Bell), em que a subcultura quântica finalmente começou a ser debatida.

É justamente no contexto desse segundo período (em transição para o terceiro) que, diante o receio da exposição das ideias e em um momento em que as questões interpretativas não tinham espaço para serem debatidas, os físicos necessitavam de meios para que houvesse discussões sobre os temas mais voltados aos aspectos que eram considerados metafísicos, para os físicos mais pragmáticos. Artigos com essa temática não eram aceitos nos periódicos mais prestigiados nem pesquisadores interessados nesses temas eram contratados pelos centros de pesquisa (KAISER, 2011). Então em 1973, François Bonsack auxiliado por Abner Shimony, e tendo como local sede o *Institut de la Méthode* com auspícios da Associação *Ferdinand Gonseth*, fundaram a revista *Epistemological Letters* (HOWARD; RAMIREZ, 2019). A *Epistemological Letters* contou com 36 edições, publicadas entre os anos de 1973 e 1984. As temáticas iniciais foram as mesmas discutidas em um curso de verão dirigido por d'Espagnat, em 1970: Variáveis Ocultas e o desacordo de algumas interpretações com a Teoria Quântica. A importância da revista se deu pelo fato de permitir discussões que saíam da linha tradicional da interpretação da Complementaridade, interpretações que eram “proibidas” inicialmente por serem consideradas

inadequadas à Física. Por esse motivo, muitos dos trabalhos iniciais e importantes de Bell foram publicados nessa revista da “subcultura quântica” e, portanto, não aparecem tão visivelmente na literatura.

Enquanto, na história da Teoria Quântica, encontramos as diferentes controvérsias científicas e metafísicas, sabe-se que, de forma contrastante, o ensino da Teoria Quântica possui um excessivo enfoque no formalismo e uma limitada conexão histórica e conceitual com a qual é tratada (GRECA; MOREIRA; HERSCOVITZ, 2001; JOHANSSON *et al.*, 2018; LIMA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2017). Dessa forma, ao tratar somente do formalismo, o aluno pode compreender como utilizar a equação, mas não compreenderá suas limitações, pressupostos e contexto de desenvolvimento, fatores necessários para que o estudante se situe no contexto em que o formalismo foi criado. Além disso, por vezes, são citados nomes e respectivas equações, mas não aparecem os meios pelo qual o conhecimento foi desenvolvido e nem a obra a qual aparece originalmente (LIMA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2017). O estudo histórico do desenvolvimento da Teoria Quântica pode priorizar a compreensão conceitual por detrás do formalismo matemático e retomar o enfoque interpretativo e filosófico que acabou sendo esquecido na época em que ganhou força a expressão “cale a boca e calcule” (JOHANSSON *et al.*, 2018). Nesse período, o foco dos físicos era direcionado às questões práticas da TQ, sendo o espaço destinado às dúvidas e questões filosóficas quase nulo. Isso fez com que algumas universidades adotassem um caráter mais instrumentalista da física, focando na resolução de problemas e práticas experimentais.

Um segundo ponto de relevância para se estudar a história da Teoria Quântica é o fato dela permitir que formemos uma visão mais complexa sobre a natureza do trabalho científico (PÉREZ *et al.*, 2001). Em uma análise feita a nível dos livros de ensino médio do PNLDEM de 2015 (LIMA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2017), os autores descreveram que, em 13 dos 14 enunciados destacados, os recortes históricos eram iguais, inclusive nos erros de historicidade, em relação aos principais livros introdutórios do ensino superior. Isso destaca a importância do tratamento histórico que os livros deveriam ter, pois na omissão do contexto histórico, acaba sendo repassada a falsa impressão de que a teoria surgiu “do nada” (LIMA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2017). A compreensão do desenvolvimento histórico de episódios da Teoria Quântica pode agregar também no estabelecimento de raciocínio filosófico e cultural da época, pois uma das visões distorcidas (PÉREZ *et*

al., 2001) que se têm da ciência é dado por erro de historicidade, ao considerarmos situações passadas utilizando concepções e tradições da atualidade.

É de grande importância também, e se relaciona com o ponto abordado anteriormente, que compreendamos a história para não desvincularmos um conhecimento ou teoria de outro que sucedeu seu período. Dessa forma os problemas relacionados à emissão de radiação de corpo negro acabam sendo desvinculados do resto dos conteúdos de Mecânica Quântica ou Física Moderna (LIMA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2017), sendo, às vezes, deixado de fora em alguns estudos por exigir conceitos mais direcionados para a Mecânica Clássica (GRECA; MOREIRA; HERSCOVITZ, 2001). Alguns livros acabam destacando recortes históricos específicos que foram de grande importância para o desenvolvimento da Teoria Quântica, deixando de fora acontecimentos que corroboraram para esse fato ou locais de discussão de diversas teorias que ajudaram no desenvolvimento de vários conteúdos abordados em livros atualmente, como o caso do periódico *Epistemological Letters*.

Existem diferentes modalidades de pesquisa histórica da ciência. Em especial, ao longo do século XX, pode-se reconhecer o desenvolvimento de vertentes que reconhecem a dimensão cultural da ciência a partir de uma perspectiva não estruturalista (LIGHTMAN, 2016), o que é denominado de História Cultural da Ciência (D'ASSUNÇÃO, 2003; PERON, T. da S.; MORAES, 2017). Sua origem, usualmente, é associada ao período pós-guerra e após a publicação do livro *A Estrutura das Revoluções Científicas* (KUHN, 1966), quando historiadores, sociólogos e antropólogos profissionais passaram a se debruçar sobre a história da ciência, em contraposição à “história do cientista aposentado” praticada até então (VIDEIRA, 2007). Dessa forma, a História Cultural nasce em uma associação entre a área denominada Estudos das Ciências (*Science Studies*) (LIGHTMAN, 2016; MOURA *et al.*, 2019).

Ela atravessa o campo da cultura, tendo como estudo o contexto social, mecanismos de produção de objetos (e seus mecanismos de recepção), práticas culturais, modos de vida de grupos sociais, movimentos, correntes e expressões culturais, afastando-se, portanto, da “história dos conceitos” (D'ASSUNÇÃO, 2003). A História Cultural parte do princípio de que a manifestação da atividade humana possui significado social, fazendo parte de uma rede conhecida como sociedade (PERON; MORAES, 2017). O uso da história cultural permite, então, que sejam encontrados os

atores envolvidos nos episódios relacionados à Teoria Quântica, podendo ser estudado o contexto e a forma ou meio de veiculação das ideias científicas na época, chegando então ao foco deste estudo. A História Cultural, em nossa pesquisa, não teve o papel de um referencial teórico, mas permitiu que fossem estabelecidos diálogos entre a história envolvendo a Teoria Quântica e a Teoria Ator-Rede, para que examinássemos o episódio em questão. Pretende-se tomar a revista *Epistemological Letters* como objeto de estudo para compreender a importância desse meio de veiculação das ideias frente ao desenvolvimento da Teoria Quântica, as interações e associações que ocorreram entre os atores e os contributos dos debates ocorridos internamente para o desenvolvimento dessa nova área da Física, na época em que veiculou. Mais especificamente, nas contribuições e na estabilização que o Teorema de Bell teve no periódico.

Exposta toda essa relação histórica e a importância do estudo dos temas referentes a Teoria Quântica, o tema a ser tratado na presente dissertação é a estabilização do Teorema de Bell na *Epistemological Letters*. Nesse sentido, verificaremos qual a importância da revista, no diz que respeito ao desenvolvimento da TQ, sobre os aspectos relacionados às publicações de John S. Bell e como se deu a estabilização do Teorema de Bell nesse meio. Posteriormente analisaremos como os temas tratados na *Epistemological Letters* foram reestruturados ou repassados para os periódicos oficiais, pelos próprios escritos de Bell. Para tal análise, utilizaremos o referencial da Teoria Ator-Rede (TAR), pois enfatiza o aspecto de que a controvérsia deva ser tratada de forma simétrica em relação as questões naturais e sociais e possibilitará a análise de aspectos humanos (relações sociais, pensamentos e política) e não-humanos (relações matemáticas, conceitos e experimentos). A TAR, de Bruno Latour, auxiliará na análise da forma como os argumentos de Bell apareceram em publicações futuras, dessa vez em periódicos e meios oficiais, através do conceito de tradução.

Além disso, a TAR contribuirá para a pesquisa em questão devido a conceitos como “estabilização” de fatos científicos e “tradução”. Um outro elemento favorável à TAR, que destaca sua escolha, é a possibilidade de olhar para o interior e o exterior da ciência ao mesmo tempo (não separa social do natural, a rede da ciência é composta por agentes humanos e não-humanos) em contraponto a outras teorias que possibilitam somente o olhar interno ou o externo à ciência. A antropologia simétrica de Latour acompanhará todo o desenvolvimento da pesquisa, desde a escolha do

tema até as relações finais sobre a estabilização e tradução para interpretação dos dados obtidos. Inicialmente será realizada uma análise das 36 edições da *Epistemological Letters*, a qual permitirá identificarmos os atores mais envolvidos no periódico (sejam os autores ou temas discutidos). Para verificar a relação entre atores e temas e os possíveis polos formados entre esses grupos, será utilizada a Análise de Correspondência (AC), que permitirá a compreensão da associação entre os autores que mais publicaram na *Epistemological Letters* e os temas os quais debatiam, além das possíveis associações e antiassociações entre os temas específicos. Na sequência, o número de menções aos temas relacionados ao Teorema de Bell permitirá a realização de uma análise relacionando menções e referências ao trabalho do autor, buscando verificar se houve estabilização do actante em questão. Em uma segunda etapa, serão estudadas as traduções das discussões de Bell, da *Epistemological Letters* para periódicos oficiais, relacionando também com linha de pensamento do referencial da TAR.

2 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar, valendo-se das premissas teórico-metodológicas da Teoria Ator-Rede, o papel que um veículo “extra-oficial”, a dizer, a revista *Epistemological Letters*, teve no desenvolvimento da Teoria Quântica; mais especificamente na estabilização Teorema de Bell.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mapear os temas que aparecem na *Epistemological Letters*.
- Descrever as redes sociotécnicas em torno de cada tema (tanto fatores humanos quanto não humanos: autores, instituições, experimentos, formalismos matemáticos, argumentos e etc.).
- Rastrear traduções¹ de tais redes para veículos oficiais da ciência no que se refere ao Teorema de Bell.

2.3 QUESTÕES DE PESQUISA

- O que motivou o início e término da revista? Qual o contexto histórico-científico ao longo do seu desenvolvimento?
- Quais os atores e controvérsias (temas) envolvidos na *Epistemological Letters*?
- Qual a rede sociotécnica (experimentos, signos, argumentos) mobilizada para sustentar diferentes actantes?
- As discussões presentes nas *Epistemological Letters*, em especial sobre o Teorema de Bell, foram, posteriormente, traduzidas para os periódicos

¹ O conceito de tradução será abordado posteriormente, no tópico relacionado ao referencial teórico.

“oficiais”? Caso sim, como se deu o processo de tradução, isto é, que elementos foram perdidos, adicionados e transformados ao longo do tempo?

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 HISTORIOGRAFIA E HISTÓRIA DA CIÊNCIA

A História da Ciência como disciplina autônoma só se desenvolveu no século 20, mas descrições e análises históricas sempre acompanharam o desenvolvimento da ciência, “durante a maior parte do período em que a ciência se desenvolveu, ela foi aprendida e cultivada como parte de uma tradição histórica que era indistinguível da ciência propriamente dita” (KRAGH, 1987, p. 9, tradução nossa). A ciência era cultivada na relação feita com os pensadores de épocas anteriores. O autor (Ibid.) ainda destaca que quando um matemático buscava solução para um problema, começava dando um relato histórico sobre ele. Videira (2007) aponta que a melhor definição historiografia é “o estudo da escrita da história, e o estudo da historiografia da ciência, portanto, toma como seus temas a variedade de maneiras pelas quais o passado da ciência foi escrito” (VIDEIRA, 2007 *apud* CHRISTIE, 1990, p. 5). Ou ainda, pode-se descrever como:

Um discurso crítico, que procura mostrar, o mais claramente possível, as bases epistemológicas, históricas, políticas e axiológicas sobre as quais os discursos históricos são construídos. Em outros termos, as narrativas em história da ciência possuem “raízes” que não são visíveis. Cabe à historiografia descobrir que “raízes” são essas e por que foram elas as escolhidas. (VIDEIRA, 2007, p. 122)

A historiografia da ciência, dependendo do seu uso, pode contribuir para uma visão mais crítica e realista, o que não significa que seja superior ou que tenha uma verdade última. Mas se torna melhor, quanto mais conseguir mostrar a complexidade e riqueza de detalhes existentes no interior da ciência (VIDEIRA, 2007). Nos últimos 35 anos, o estudo da história da ciência se modificou, devido à uma nova abordagem historiográfica. Agora, os historiadores não se importam mais somente com o progresso obtido por “grandes nomes” da ciência, mas se preocupam em compreender como a ciência é praticada em laboratórios e em seus outros locais de produção. O papel do cientista se difere daquele designado ao historiador da ciência, enquanto o primeiro se preocupa com avanços em teorias, transcendência e progresso o outro foca nos julgamentos morais de forma independente e na forma como o conhecimento científico foi construído em determinado contexto (LIGHTMAN,

2016). O mesmo autor então aponta que por vezes, para compreender a ciência em qualquer período da história, deveriam ser estudadas as atividades científicas consideradas como pseudocientíficas e marginais.

As mudanças que ocorrem na história da ciência obrigam os historiadores a colocarem em questão qual a natureza do objetivo da história da ciência e qual a importância da atividade (VIDEIRA, 2007). Essa falta de uma definição exclusiva se deve a ampla gama de sua utilização na antiguidade e sem essa definição, a História da ciência se vê em um problema de identidade. Essa tensão na definição de história da ciência se deve, na visão do autor (VIDEIRA, 2007), à dois modos de se fazer História da Ciência. O primeiro modo é o dos cientistas, onde eles como atores da história, acabam passando de atores para autores, nessas situações o gênero escolhido para a escrita é majoritariamente autobiografias e história disciplinares (Ibid.). Muitas vezes esses cientistas fazem história para legitimar seus ideais e concepções, mas essa busca por legitimidade pode fazer com que os domínios da ciência sejam ultrapassados, gerando uma situação de cientificismo. Em contraponto, existe a visão de historiadores da ciência e sociólogos, os quais se consideram:

Muito mais críticos em relação aos próprios valores veiculados e defendidos pelos cientistas. Esses últimos não seriam movidos por nenhuma preocupação ou interesse que não fosse a compreensão de como se deu o desenvolvimento da ciência. Para esse grupo, seria inaceitável conferir à história da ciência o direito e a possibilidade de legitimar a ciência. (VIDEIRA, 2007, p. 112)

Nos séculos 16 e 17, no surgimento da nova ciência, a história ainda era parte integrante do conhecimento científico, sendo que a história serviu também como legitimação do conhecimento científico. A partir do século 17 iniciou-se uma separação entre antiguidade e atualidade, o conhecimento científico focou na modernidade e atualidade, até mesmo fazendo emergir críticas aos pensadores clássicos (KRAGH, 1987). A História da Ciência estabelecia a relação do progresso de um conhecimento em comparação a épocas anteriores, o que acabou ocasionando de forma equivocada a representatividade da História de Ciência como História do progresso. Sprat, por volta de 1670, devido a sua grande influência, acabou influenciando a visão de ciência adotada pela Royal Society, onde a ciência agora deveria ser baseada em uma visão empírica e não mais dedutivista (KRAGH, 1987). Com o tempo, o conhecimento recente começou a ser visto como importante, e os conhecimentos desenvolvidos no passado eram inferiores e ultrapassados. Leibniz,

entre muitos outros, acreditava na importância da História da Ciência, pois poderia trazer a origem das ideias e conhecimentos realizados de forma reflexiva e não somente por acaso ao realizar experimentos (Ibid.). A História da Ciência (HC) poderia então expandir a arte da “descoberta” ao exemplificar como os indivíduos notáveis obtiveram sucesso.

No século 18 a crença no progresso da ciência aumentou, devido ao Iluminismo, que trouxe um sentimento de otimismo científico, que considerava a Ciência como um fenômeno histórico (KRAGH, 1987). Com o Iluminismo, a HC começou a se ausentar, isso devido ao aspecto de cognição adotado pelos filósofos, com os ideais racionalistas. Já no final do século 18 e início do 19, a historiografia da ciência começou a ter grande influência, a história passou a ser considerada relativista, assim os valores e práticas de cada época passaram a ser levadas em conta nos estudos de produção dos conhecimentos científicos (Ibid.).

Em meados do século 19, a história da ciência começou a ganhar destaque, mas dessa vez por interesse nas questões técnicas e especializadas, de caráter positivista. Essa onda positivista acabou gerando uma perspectiva ahistórica da História da Ciência, pois se interessava somente pela ciência contemporânea e pelos predecessores imediatos. Então durante esse período (séc. 18 e 19) os cientistas, autores dos livros, costumavam fazer uma introdução histórica sobre a importância dos assuntos trabalhados, adicionando seus próprios contributos (KRAGH, 1987). Para Whewell, a ciência era um fenômeno puramente europeu, e ainda afirmava que a história é a única fonte aceitável de um conhecimento filosófico da ciência.

Já Ernst Mach, defendia que o método histórico era o mais adequado para se obter informações sobre o método científico. Whewell, em 1834 na publicação de um artigo, elaborou o termo “papéis da ciência” como uma crítica a tendência moderna de subdivisões da ciência em várias disciplinas (Ibid.). Além disso inventou o termo “cientista” como uma forma de unificar novamente todas as áreas da ciência, conflitando com as especializações dessa área.

Lightman (2016, p. 5, tradução nossa) define então a diferença entre objetos da ciência e ferramentas, dizendo que “os objetos científicos são as coisas estudadas pelos cientistas, enquanto os instrumentos são as ferramentas pelas quais esses objetos são estudados”. Os objetos começaram a ganhar papéis que iam além da cultura material, agora eram epistemologicamente importantes. O historiador pode

direcionar seu foco para compreender como algumas práticas e formas de conhecimento vieram a se tornar ciência.

Conforme se desenvolvia a História da Ciência, foram desconstruídas algumas visões distorcidas a qual acompanhavam-na, como: neutralidade da HC e que o desenvolvimento da Ciência conduz obrigatoriamente a um bem-estar social e o progresso da humanidade (VIDEIRA, 2007). Após a primeira e a segunda guerra, começou-se a discussão sobre quão bom era o papel da ciência, devido à construção de armamentos de guerra e bombas atômicas. Depois de três séculos do surgimento da Ciência Moderna, torna-se evidente a necessidade de legitimar a ciência, reaproximando-a do público em geral, ao qual se utiliza em todas as partes dos objetos por ela desenvolvidos (Ibid.).

Personagem importante da Institucionalização da HC é o americano James Conant, que pôs em prática um programa sobre História da Ciência no ano de 1950 e como um de seus produtos, influenciou Thomas Kuhn (VIDEIRA, 2007). Um dos papéis da HC que ganhou maior destaque foi a de aproximar a ciência do público leigo, os não cientistas. Lightman (2016) afirma que a partir dos anos 1970 os historiadores passaram gradualmente a adotar uma abordagem construtivista social, a qual vê “o desenvolvimento do conhecimento científico como dependendo fortemente de particularidades das circunstâncias locais, pessoais, epistemes e políticas, e que não necessariamente os aproxima ainda mais em direção a uma verdade única” (LIGHTMAN, 2016, p. 8, tradução nossa). Donna Haraway defendia a chamada “perspectiva parcial”, que dava agência e autoridade a indivíduos que antes não eram percebidos e notados, demonstrando que o conhecimento é construído por seres humanos e não algo descoberto na natureza e, além disso, que esse processo de criação não foi composto individualmente, mas sim, de forma social (Ibid.). Uma das consequências disso foi que, devido ao fato de o conhecimento científico ser algo construído, ele não poderia chegar à uma verdade absoluta. O valor de verdade de uma afirmação no passado não pode ser baseado em nossos ideais atuais, pois o que é conhecido como “verdade” pode amadurecer ou se modificar ao longo do tempo.

Com a modificação do ponto de vista historiográfico novos atores iam aparecendo. Na medida que os historiadores da ciência expandiam seu campo de estudo para além dos laboratórios, foi percebida toda a característica de contexto que interferia em um conhecimento científico. Cada vez mais era destacada a importância das “coisas científicas”, onde entravam os objetos utilizados e as práticas. Uma das

características centrais foi a virada do construtivismo social para a prática experimental. Se o pensamento é discurso, então os produtos do pensamento também são passíveis de desconstrução (Ibid.).

Na década de 1970, a HC começou a se expandir como disciplina acadêmica, e isso ajudou no aprofundamento de suas divisões internas, havendo então, como solução, a divisão institucional entre HC conceitual e social. Outro acirramento ocorreu em 1990, onde ocorreu a chamada guerra da ciência, onde alguns autores apresentaram o relativismo na HC, onde esse relativismo “negaria radicalmente a pretensão da ciência em explicar verdadeiramente o mundo real. A ciência não seria objetiva, nem possuiria qualquer capacidade explanatória; os resultados da ciência seriam apenas ficções (VIDEIRA, 2007, p. 125).

Nos anos finais do século XIX e nos iniciais do século XX, o *Collège de France* abrigou uma cátedra de HC e ainda na primeira metade do século XX foi criada a revista “ÍISIS” que contemplava as temáticas dessa área. Entre os anos de 1950 a 2000 a História da Ciência teve três fases, a primeira era positivista (até 1960), a segunda foi pós-positivista (influenciados por Kuhn e Lakatos, durando até 1970) e a terceira fase chamada pós-modernista. Nesta última a ciência passou a ser vista como “uma entidade sociológica configurada por restrições contingentes, vinculadas a agentes específicos e a práticas locais” (VIDEIRA, 2007). A historiografia com maior consciência histórica só começou por volta do século 20, onde foi enfatizado o caráter de que o passado deveria ser analisado de acordo com suas próprias premissas e houve uma crítica à construção linear do conhecimento científico. Por volta de 1900 a História da Ciência começou a ser considerada como uma profissão independente (KRAGH, 1987).

Um princípio aceito na história da ciência é que o conhecimento começa localmente, e a uma das formas mais estudadas da disseminação desses conhecimentos é através da escrita (LIGHTMAN, 2016). Além disso, a divulgação científica que por muito tempo foi vista como diluidora da ciência real, agora é vista como digna de estudo pelo fato de seus escritos e público receptor serem intérpretes culturais ativos (Ibid.). Então os atores envolvidos na história podem ser ampliados ainda mais, pois os historiadores perceberam que além de meios de veicular conhecimento científico, os jornais, livros e artigos poderiam fornecer informações sobre os autores, artistas, editores e patrocinadores que contribuíram para o trabalho científico impresso. Além disso, mover o conhecimento científico é uma forma de

reestruturá-lo e modificá-lo, como é feito, por exemplo, na tradução de algum livro ou material de pesquisa (LIGHTMAN, 2016). O conhecimento não é simplesmente transposto para uma nova linguagem, mas modificado culturalmente. A ciência foi disseminada e homogeneizada na medida de algo, para que seja verdadeiro, deve ser verdade em mais de um lugar, então veio a preocupação dos cientistas em replicar as situações em vários laboratórios e detalharem seus experimentos, criando uma sensação de concordância empírica (Ibid.).

A paisagem da história da ciência é aquela que habitamos e cultivamos simultaneamente: à medida que a ciência e nossas preocupações culturais mais amplas continuam a mudar, o mesmo acontecerá com a história da ciência, [...] os historiadores da ciência agora tratam a ciência como algo que foi produzido histórica e contingentemente, não alcançado por meio de um reconhecimento crescente de verdades. Em vez disso, emergiu através do cultivo de valores particulares que sustentaram a investigação do mundo material ao nosso redor, em diferentes direções em diferentes épocas e lugares. As pessoas que realizam as atividades que chamamos de “ciência” criaram um espaço cultural para si mesmas, avançando e aproveitando novas instituições e formas comunicativas; estes, por sua vez, foram sustentados pelos compromissos e meios de subsistência de muitas pessoas que não são “cientistas”. (LIGHTMAN, 2016, p. 16, tradução nossa)

3.2 ESTUDOS SOBRE PERIÓDICOS

Inicialmente, no século XVII, entre os anos de 1665 e 1699, foram criados 35 periódicos que tratavam de temas relacionados a ciência (LIGHTMAN, 2016). Henry Oldenburg, criador do periódico *Philosophical Transactions*, tinha um intuito mais simples do que aquilo que se pretende atualmente, considerava-o um jornal que veiculava as últimas notícias acadêmicas da Europa (Ibid.). Em uma pesquisa realizada em 2001 (TENOPIR; KING), com aproximadamente 14.000 cientistas, os periódicos foram destacados como meio de veiculação de informações mais importantes, sendo que cada participante lia em média 120 artigos por ano, tendo em média uma variação de 18 a 26 periódicos. No século XVIII o cenário foi ampliado, existiam mais de mil revistas científicas e técnicas estabelecidas (LIGHTMAN, 2016), mas existia pouca especialização disciplinar, até 1730. O autor ainda destaca que as sociedades científicas recém estabelecidas utilizavam desses periódicos para relatarem suas atividades, sendo que o maior número de publicações em sequência permitiria provar o valor e existência das mesmas.

O século XIX, no qual ocorreu uma maior alfabetização e educação na América e Europa, as notícias e controvérsias apareciam em publicações que pudessem ser difundidas em massa, até mesmo em jornais ou periódicos (LIGHTMAN, 2016). Então a comunicação científica passou a ser uma das bases para a aceitação de teorias e discussões emergentes (ANNA, 2019). Ainda no século XIX, devido à ampliação do público para a Ciência, os periódicos se tornavam cada vez mais especializados e a linguagem delimitava seu público-alvo (LIGHTMAN, 2016). Os países com maior liderança científica na época acabaram dominando a quantidade de publicações, sendo eles: França, Alemanha e Grã-Bretanha. Com a chegada da televisão e rádio (século XX), conseqüentemente o crescimento de adeptos, o impacto foi reconhecido também na divulgação de informações científicas, pois o público por vezes destinava seu tempo a série e filme na televisão (Ibid.), situação que ajudou também a atrair jovens para a ciência (com a divulgação da série Cosmos, de Carl Sagan). A existência de mais de 15 línguas nas quais os periódicos eram construídos, mostrava a extensão que a ciência ganhava no globo. A circulação de periódicos aumentou no período pós-guerra, cada vez mais pessoas desejavam receber os materiais de produção científica, finalmente se tornando um atividade lucrativa para sociedades científicas e empresas (LIGHTMAN, 2016).

No início do século XIX era possível consolidar uma carreira somente com publicações de livros (LIGHTMAN, 2016), mas o fato mudou após esse período e os periódicos e as publicações de artigos se tornaram cada vez mais requisitadas. Inclusive eram pré-requisitos para a entrada em sociedades eruditas. O século XX, além de fortalecer a divulgação da ciência e produções acadêmicas através dos periódicos, possibilitou uma padronização em relação as publicações, onde foi criada a estrutura de introdução, métodos, resultados e discussões. Atualmente, o conhecimento científico registrado em periódicos dobra a cada 15-17 anos (TENOPIR; KING, 2001). Os periódicos são muito importantes, agora e no passado, para a validação e aceitação de teorias científicas (ANNA, 2019), por destacar os métodos utilizados na investigação. Os autores ainda destacam que:

No decurso do fluxo da comunicação científica, à medida que os resultados vão sendo concretizados, eles são submetidos para avaliação pela comunidade científica, e, ao serem aceitos, tornam-se legítimos e confiáveis, fato esse que viabiliza a publicação desses resultados, principalmente em canais formais. (ANNA, 2019)

Os periódicos foram sinônimos de possibilidade de divulgação de teorias e ideias dentro da ciência e, na maioria das vezes, sem discriminação. Permitem que teorias emergentes também ganhem espaço para discussão, mesmo que seja para explicar seus pontos principais, ainda que o tema esteja em aberto. Em decorrência dessa falta de espaço, em que as teorias pudessem ser debatidas formalmente, foi fundado um periódico não oficial, denominado *Epistemological Letters*, justamente possibilitando o debate de temas da subcultura quântica, os quais não tinham espaço em revistas mais tradicionais da época.

Assim, uma primeira reflexão sobre o papel dos periódicos nos mostra uma tensão fundamental entre dois papéis que um periódico desempenha. Por um lado, ele é fonte de segurança e rigor, visto que somente os trabalhos aprovados por pares são publicados. Por outro lado, entretanto, esse rigor pode ser um inibidor de pesquisas inovadoras e criativas, que fujam do paradigma vigente (KUHN, 1966, 2011).

3.3 TEORIA ATOR-REDE DE BRUNO LATOUR

O referencial exposto a seguir será baseado em uma das mais recentes obras de Latour sobre a Teoria Ator-Rede², o livro “*Reassembling the Social: An Introduction to Actor-Network Theory*” que teve sua publicação no Brasil, em versão traduzida, em 2012. A sigla que será adotada durante o referencial, será a versão em português, TAR, de *Teoria Ator-Rede*. A versão da sigla em inglês é ANT, uma metáfora utilizada por Latour ao comparar a sigla ANT à uma formiga, pois “o estudioso da ANT tem de arrastar-se como uma formiga, carregando seu pesado equipamento para estabelecer até o mais insignificante dos vínculos” (LATOUR, 2012, p. 47).

Latour é antropólogo, sociólogo e trabalha na área da filosofia da ciência, com sua Teoria Ator-Rede, em que utiliza como base a chamada antropologia simétrica, que foi destacada em seu livro “*Jamais fomos Modernos: Ensaio de Antropologia Simétrica*”. De acordo com Latour, a origem da abordagem da TAR se deu pela

² Essa dissertação representa uma continuidade nos trabalhos sobre Latour, já desenvolvidos pelo grupo (CRUZ; LIMA, 2020; LIMA *et al.*, 2019; LIMA; NASCIMENTO, 2022; LIMA; NASCIMENTO; MOURA, 2021; LIMA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2018) e um aprofundamento nos conceitos trabalhado no livro “*Reagregando o Social: Uma Introdução à Teoria Ator-Rede*”.

necessidade de uma teoria social que se ajustasse aos estudos da tecnologia e da ciência, iniciada com três documentos Latour (1988), Callon (1984) e Law (1986).

3.3.1 A não modernidade e a crítica ao conceito tradicional de “social”

Bruno Latour em sua obra “*Jamais fomos Modernos*” explica a chamada Antropologia Simétrica, onde expõe que tanto a natureza (não-humanos) quanto a sociedade (humanos) devem ser tratadas de forma simétrica. O autor destaca que os modernos, pela influência de Kant e Descartes, conseguiriam romper com a hibridização tendo como resultado a purificação, onde não se misturariam mais os aspectos naturais e sociais (LATOUR, 1984). E é essa característica dos modernos que Latour critica, cada vez é mais complexo tentar separar social e natural, humanos e não-humanos, pois todas as novidades ou criações em laboratórios acabam permeando ambos os lados, os híbridos estão cada vez mais presentes em noticiários, basta observarmos.

Nesse mesmo livro, Latour aborda o debate ocorrido entre Hobbes e Boyle a respeito da bomba de vácuo (e a pena contida nela) e a confiabilidade de testemunhos não-humanos. Enquanto Hobbes defendia que a confiabilidade deveria estar nas mãos do Estado, onde o Soberano uniria a figura do conhecimento e do poder, Boyle defendia que os não-humanos poderiam dar credibilidade e confiabilidade aos experimentos, por não serem suscetíveis à influência de outras pessoas (LATOUR, 1984). Para o primeiro a política representa as pessoas ou o cidadão, e estes não poderiam ter interação com os objetos produzidos pela ciência, do segundo tinha-se que a ciência é a representação dos objetos, onde a política não poderia interferir (Ibid.). Nesse embate é possível perceber a tentativa de separação entre social e natural, ou os humanos e não-humanos.

Com isso Latour descreve o que seria a Constituição Moderna e a tentativa de obter uma cisão entre o mundo natural e o social. A Constituição Moderna continha os pontos de apoio aos quais os Modernos deveriam se guiar, sendo eles: 1) nós fazemos parte da natureza, mas ela age como se não a constituíssemos; 2) nós não formamos a sociedade, mas ela age como se nós a constituíssemos; 3) Natureza e Sociedade devem permanecer distintas, o trabalho de mediação é diferente do da purificação e 4) Deus está afastado da esfera pública e passa a ser algo íntimo de

quem desejar (LATOUR, 1984). Esses pontos permitem que o poder seja alternado. A Constituição tenta então separar os objetos dos humanos, negando a existência de híbridos. Esse detalhe de negação dos híbridos é o que os faz proliferar mais rapidamente.

O papel da Antropologia Simétrica pode então ser sintetizado em três pontos principais, verdade e erro sendo analisadas pelo mesmo ferramental (estando em um mesmo nível), considerar em mesmo nível os humanos e não-humanos e por último, considerar em mesmo nível a cultura ocidental e as demais culturas (Ibid.).
Complementando:

Assim, para Latour, não devemos mais pensar na existência de uma natureza e de uma sociedade independentes que podem ser usadas como fonte de explicação das coisas. Pelo contrário, devemos olhar para os quase-objetos ou os híbridos e, a partir deles, rastrear empiricamente a rede sociotécnica que os cercam e, a partir disso entender a construção da sociedade e da natureza (LIMA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2018, p. 372)

Ainda não somos capazes de separar a natureza e a sociedade, mesmo que pensemos estar fazendo isso. O mundo está repleto de híbridos, que em certas ocasiões, não podem mais ser purificados, sendo que os modernos pecam neste detalhe. Para Latour, o motivo de jamais termos sido modernos é pelo fato de que mesmo a constituição prevendo a não existência de híbridos, o discurso acaba contrariando isso (LATOUR, 1984).

Latour, no início de sua obra “Reagregando o Social: uma introdução à Teoria Ator-Rede”, faz uma crítica ao uso do termo “social” pelos pesquisadores, que no sentido adotado por eles, não representa de forma correta a mutabilidade da sociedade. O autor então desconstrói a dimensão fixa dada à palavra, que iria contra a capacidade dinâmica que a sociedade, o ser humano e os grupos têm (LATOUR, 2012). Apresenta, também, a divisão que faz entre duas escolas dentro da sociologia onde nenhuma tem como objetivo ser melhor que a outra, mas proporcionar visões e metodologias diferenciadas. A primeira escola foi denominada de Sociologia do Social e esta, de acordo com Latour (2012, p. 22) admite “a existência de vínculos sociais distintos que traem a presença oculta de certas forças sociais específicas”, as quais os sociólogos do social usam como um armazenamento para explicar algumas falhas no andamento metodológico ou erro humano no processo de pesquisa. Já a segunda escola, Sociologia das Associações, defende o ponto de vista de que não existe uma

dimensão social que explique os traços que os outros domínios não explicam. Sobre as duas escolas, ainda pode ser destacado que:

Se, na primeira abordagem, toda atividade – direito, ciência, tecnologia, religião, organização, política, administração etc. – podia relacionar-se e ser explicada pelos mesmos agregados sociais *por trás* dela, na segunda versão de sociologia não há *nada* subjacente a essas atividades, embora elas possam ser agrupadas de modo a produzir uma sociedade – ou *não*. (LATOURE, 2012, p. 26)

A segunda escola ou abordagem da sociologia é onde aparece a TAR, que objetiva dar aos atores a capacidade de elaborar suas próprias teorias sobre a constituição do social. Latour (2012, p. 31) explica que “a sociologia do social funciona bem quando se trata daquilo que já foi *agregado*, mas nem tanto quando o problema é reunir novamente os participantes naquilo que não é – *ainda* – um tipo de esfera social”. O sentido que o autor quer retomar, para “social”, é o significado que o termo tinha antigamente, onde não eram criadas subáreas e todas as disciplinas fragmentadas, quer retomar que o social é “um movimento peculiar de reassociação e reagregação” (Ibid, p. 25).

A teoria desenvolvida por Latour não busca resolver as controvérsias, mas usá-las para ajudar a compreender a formação de grupos, os atores, as ações e o estabelecimento de redes. Uma controvérsia, para Venturini (2010), é um pedaço de um tema tecnológico e científico que ainda não está estabilizado, sendo adotado pelo autor como um sinônimo para descrever uma incerteza compartilhada. Callon (1984) destaca que as controvérsias são também as manifestações pelas quais a representatividade de um “porta-voz” é questionada ou discutida. As controvérsias envolvem todo tipo de atores, sejam eles humanos ou não-humanos, como adotado pela TAR. Venturini (2010) elenca alguns fatores que devem ser observados na escolha de uma controvérsia: evitar a escolha quando há concordância entre as opiniões dos atores, delimitar a controvérsia, evitar controvérsias passadas e superficiais (as quais o público não tem acesso).

A adesão da TAR pode ser verificada através de alguns testes, de acordo com Latour. Em primeiro lugar, os não-humanos devem ter papel definido, não são somente projeções simbólicas, mas sim atores. Um segundo ponto é a instabilidade do termo “social”, uma pesquisa que o mantenha estável, não é considerada TAR. Por último, verificar se o estudo almeja reagregar o social ou se foca na desconstrução, a TAR não tem ênfase pós moderna, por isso busca superar esse obstáculo de desconstrução e dispersão do social (LATOURE, 2012). O objetivo da TAR é seguir os

atores para verificar o que a existência coletiva se tornou e explicar como ocorreram as associações que eles foram obrigados a estabelecer (Ibid.) O autor opta por não dividir o domínio social, mas falar sobre as controvérsias que o compõem, “acho possível trabalhar com as principais intuições das ciências sociais examinando cinco grandes incertezas” (LATOURE, 2012, p. 42).

3.3.2 As cinco fontes de incerteza

A escolha do termo incerteza também não foi ao acaso, Latour faz uma analogia com o significado que o termo tem na área da Física, denominou as incertezas sobre o domínio social assim porque “não é possível decidir se está no observador ou no fenômeno observado” (LATOURE, 2012, p. 42). Essas cinco incertezas se referem a formação de grupos, às ações serem assumidas, os objetos terem ação, a natureza dos fatos e sobre os estudos considerados como científicos, os relatos têm um risco. Nesta seção serão apresentadas essas cinco incertezas apontadas por Latour e como a TAR as utiliza para reestabelecer associações. A TAR não tem exatamente um roteiro a ser seguido, mas o autor sempre prefere deixar exposto aquilo que não se deve fazer ao utilizá-la em uma pesquisa.

3.3.2.1 Não existem grupos, apenas formação de grupos

O ser humano é dinâmico, característica que o faz mudar de opinião no decorrer de uma polêmica ou controvérsia na medida em que surgem novas evidências ou ações que desestabilizem o grupo. Dessa forma, os grupos estão em constante mudança e os atores se conectam e desconectam desses grupos. Latour (2012) destaca que a Sociologia do Social (em oposição à TAR) tende a pré-estabelecer os grupos estudados, sem perceber que seus integrantes estão conectados por laços frágeis, que em qualquer momento podem ser desfeitos. É nessa perspectiva que Latour apresenta a primeira incerteza, não podemos pré-definir um grupo, pois ele não é imutável e fixo ao longo do desenvolvimento de uma controvérsia. Complementando, o autor afirma que não devemos começar com o social estabilizado, mas justamente o contrário, “o ponto de partida tem que ser justamente as controvérsias acerca do agrupamento a que alguém pertence” (LATOURE, 2012, p.

52). Como sugestão, deveríamos “substituir a lista de agrupamentos compostos de agregados sociais pela de elementos sempre presentes em *controvérsias* a respeito de grupos” (Ibid, p. 54). Sendo assim, quando um grupo está se formando ou sendo redistribuído, temos o mecanismo responsável por mantê-los, visível, permitindo que seja rastreado.

Existem quatro mecanismos que permitem a visualização dos mecanismos de associação. Em primeiro lugar, está a necessidade da definição de um “porta-voz”, que diga quem são os atores, o que eles farão e quem serão, sendo representantes dos atores envolvidos (LATOURE, 2012), o que resulta na observação de que a representação “cala” a diversidade de vozes do grupo. Como comentado anteriormente, um dos motivos de uma controvérsia existir é o questionamento e negação das opiniões e comandos impostos pelo porta-voz. Em segundo lugar, está a formação de anti-grupos, devido à necessidade de afirmar as características de um determinado grupo, por comparação, outros grupos parecerão obsoletos, vazios e perigosos (LATOURE, 2012). Um grupo também pode ser definido pelo que não é, dessa forma o autor destaca que “é pela comparação com outros vínculos concorrentes que se enfatiza um vínculo” (LATOURE, 2012, p. 56). E isso, para quem observa, é muito vantajoso, pois permite que o pesquisador veja como os atores identificam seu próprio “contexto social” e dessa forma definindo o tipo de sociologia que cabe melhor na situação.

Em terceiro lugar aparece uma característica comum em situações em que os grupos estão se formando ou sendo redistribuídos, que é a necessidade de definição do que o grupo é, dessa forma entra em cena o porta-voz do grupo, que no momento que delimita as características, acaba selecionando os anti-grupos. Deve-se tomar cuidado com as limitações, pois podem fazer com que o grupo não deixe “traços” ou vestígios para que sejam rastreadas as associações. Por fim, no quarto mecanismo, é necessário estabelecer uma ideologia em que, no discurso, apareça a identidade do grupo (HOLANDA, 2018).

Na formação ou redistribuição de grupos, os objetos podem ter definição *performativa* (desaparece quando não é representado) ou *ostensiva* (permanece onde está, independente do que aconteça). No caso da TAR, como o estudo se dá em torno de controvérsias, o ideal é “fugir” da definição performativa, pois no momento que os grupos se estabilizarem ou deixarem de evidenciar suas associações, não serão mais objetos de estudo. O comportamento que a entidade adota durante o estudo também

é considerado essencial. As entidades podem ter papel intermediário, “transporta significado ou força sem transformá-los” (LATOURE, 2012, p. 65) ou mediador (traduz, modifica ou altera significados).

3.3.2.2 A ação é assumida

As ações também têm grande importância na TAR e estão diretamente relacionadas aos atores. A ação está longe de ser algo previsível e que pode ser definido facilmente. O social comumente está associado a um conjunto de características ou ações que fazem parte do acervo das entidades estudadas. Dessa forma, quando lemos notícias em jornais, quando assistimos vídeos em redes sociais ou quando consumimos algum produto, uma ação nossa que parecia local, pode ser generalizada para uma grande quantidade de pessoas, nossas ações, por vezes, são inconscientes. E então, “quem está agindo?”... A segunda incerteza destaca justamente esse caráter não transparente das ações, quando observamos algo, compramos algo ou falamos sobre algo, estamos assumindo ações (ou os outros assumem nossas ações), isso pode explicar por que tantas pessoas pensam e agem de forma parecida. A TAR começa pelas controvérsias em torno do quê e quem está agindo, pelo fato de o que nos leva a agir não ser feito de “material social”, podendo ser reagrupado de várias maneiras (LATOURE, 2012).

A ação em uma rede não é transparente, ela tem vários nós, os atores não são levados a agir por “forças sociais”, mas existem entidades que os fazem agir ou que mudem suas ideias iniciais. Ainda, como afirma Latour (2012, p. 75), “o ator-rede não é fonte de um ato e sim o alvo móvel de um amplo conjunto de entidades que enxameiam em sua direção”. Dessa forma o autor retoma o sentido dado à “ator”, pois em um palco nunca sabemos quem está atuando ou agindo, pois, um ator nunca está sozinho no palco. Nisso, é necessário estabelecer a relação com a incerteza anterior, pois todos os atores devem ser escutados, todos eles têm ações com diferentes pontos de vista, então devemos olhar além da opinião expressa pelo porta-voz do grupo. Novas perspectivas permitem que novas entidades (actantes) sejam reveladas durante o desenvolvimento do estudo.

Na incerteza anterior, quanto a formação de grupos, na separação ou reorganização de um grupo, os próprios atores podem acabar fornecendo relatos controversos, então deve-se evitar colocar a origem das ações nas mãos de forças

sociais globais (LATOUR, 2012), não tentar “adivinhar” o que está oculto nos relatos. Ainda, como na formação de grupos havia uma lista de mecanismos que ficavam visíveis na formação e reestruturação de grupos, existe uma lista de características sempre presentes nos argumentos contraditórios a respeito do que aconteceu, no qual cada autor relata sua percepção. Essa lista é composta por quatro observações. Em primeiro lugar, as ações aparecem como responsáveis por um feito, transformando o estado das coisas. Uma ação que não faça diferença, não entre nos relatos e não deixe traços não é uma ação (LATOUR, 2012). Em segundo lugar, “se a ação é uma coisa, sua figuração é outra” (Ibid, p. 85). A figuração diz respeito à relação entre pessoas, já ação, é algo que pode ser realizado também por entidades não-humanas, nesse sentido, surge o termo *actante*, que representaria os dois lados (humanos e não-humanos).

Assim como na incerteza anterior existiam anti-grupos, o terceiro lugar dessa lista diz respeito a relação de crítica às ações relatadas por outros indivíduos. O relato de um ator pode ser diferente do outro, destacando novas ações e até mesmo eliminando entidades do contexto. Isso destaca uma certa dependência para os pesquisadores pois, quando não participam da ação relatada, acabam tendo que adotar o que foi dito pelos atores. No entanto, termos que compreender uma situação pelo ponto de vista dos outros, acaba fazendo com que assumamos às ações que pertencem a rede estudada. Em quarto lugar, “os atores podem ter suas próprias teorias da ação para explicar como se produzem os efeitos da ação” (LATOUR, 2012, p. 90), dessa forma, é necessário identificar se ação se faz sentir pela perspectiva de um mediador ou intermediário, modificando uma situação ou não. Por fim, “a concretude de um estudo vem da proporção entre mediadores e intermediários, não se deve estabelecer desde o início um *locus* privilegiado onde a ação seja mais abundante” (Ibid., p. 96). As ações que são mediadas (se modificam, são traduzidas), são modificadas por alguma intenção não transparente, intenções assumidas juntamente da ação, pelos atores.

3.3.2.3 Os objetos também agem

A incerteza anterior destacou alguns aspectos sobre a natureza das ações, mais especificamente a característica de as assumirmos. Porém, estas ações, sejam elas fontes ou entidades que as incorporem, não são somente humanas, pois os

actantes envolvidos podem ser também não-humanos, dessa forma, os objetos interferem nas ações tanto quanto os participantes humanos. A quarta incerteza de refere justamente a isso, a capacidade de os objetos agirem. Porém, acontece que:

Da mesma maneira que a assunção de uma ação por outra não significa que a sociedade esteja se impondo, a flagrante assimetria de recursos não quer dizer que eles sejam gerados por assimetrias sociais. Este raciocínio leva precisamente a conclusão oposta: se desigualdades são geradas, outros tipos de atores que não os sociais entram no jogo. (LATOUR, 2012, p. 98)

Na passagem acima, há um indicio do motivo pelo qual Latour acredita que os objetos agem, as desigualdades devem ser compensadas de alguma forma, nesse caso, com a inserção de “novos atores”. O social agora não representa mais um domínio da realidade, mas como a TAR afirma, é um movimento, deslocamento, uma transformação. E um segundo significado ainda é proposto por Latour, “o social é o nome de uma associação momentânea caracterizada pelo modo como se aglutina assumindo novas formas” (2012, p. 100). O autor, para simplificar, faz uma analogia com um supermercado, onde o social não seria a gôndola ou ala onde os objetos se encontram, mas sim a modificações que foram feitas para que o produto se tornasse visível.

Por vezes, os humanos podem também ser considerados apenas intermediários, fato que acaba por destruir uma possível hierarquia prévia entre humanos e não-humanos (HOLANDA, 2018). A ação é assumida por diferentes tipos de atores (incluindo a discussão relacionada a esta incerteza, os não-humanos), sendo eles responsáveis por transmiti-las ou levá-las adiante. Retomando o que foi comentado em tópicos anteriores, os humanos acabam contradizendo suas próprias ideias, pois apesar de acharem os objetos sem importância, o discurso acaba revelando outra perspectiva. Pode-se exemplificar isso em situações cotidianas, pois muitos de nós utilizamos expressões como: a faca “corta”, o elevador “sobe”, a caneta “escreve”, a borracha “apaga”, entre outras. Os termos entre aspas revelam verbos referentes a ações, o que deixa claro o agir dos objetos/não-humanos³.

Os não-humanos ajudam na explicação da existência de assimetrias e do exercício de poder, os objetos interferem nas relações de poder. Latour sugere que

³ Os não-humanos, sozinhos, têm certas capacidades e realizações/ações, assim como os humanos. Porém, quando se relacionam as possibilidades individuais, desta vez combinadas, não-humano e humano possibilitam um novo conjunto de ações.

as visões ontológicas e epistemológicas que separam a sociedade e a natureza, o humano e o não-humano, deveriam ser repensadas, pois essa impressão de divisão não existe de fato (LATOUR, 1984, 2012). Um curso de ação costuma então ir de um lado para o outro, entre humanos e não-humanos, sendo preciso rastrear as associações. Nesse rastreamento de associações, não podemos desistir ao aparecerem não-humanos (mundo material), pois como não existe uma separação entre os dois, o mundo social pode se tornar mais claro, mais transparente, devido a compreensão geral oportunizada. Para que os objetos sejam notados em relatos ou apareçam nas ações, devem ter uma análise performativa (como visto na primeira incerteza), precisam ser notados para participarem do mundo das associações. Porém, cotidianamente, os objetos ou ações acontecem e depois não se prenunciam mais, permanecem como estão.

É possível então, estabelecer uma lista de situações em que os objetos possam retomar o “palco” (relacionando à metáfora dos atores). Em primeiro lugar, para que os objetos ganhem o devido destaque novamente, basta estudar inovações pois estas são debatidas em projetos, reuniões, esboços, passam por regulamentos e provas, fazendo com que os não humanos tenham destaque (LATOUR, 2012). Em segundo lugar, quando alguns objetos mais exóticos ou arcaicos conseguem deixar rastros, conseguem se tornar, por alguns instantes, mediadores, de forma parecida com as inovações. Por terceiro, é a situação oferecida por acidentes, rupturas e golpes, nos quais os objetos tornam-se mediadores de forma abrupta. Latour (2012) exemplifica isso ao comentar o caso da nave *Columbia*, que explodiu e mostrou como um objeto pode mudar seu modo de existência. Em quarto lugar, está a situação em que os objetos recuam em definitivo para os bastidores. Esses objetos já arquivados ou em museus podem oferecer informações importantes sobre relatos históricos.

Nas próprias relações de poder o objeto é repartido em duas partes, a social e a não social. Um exemplo que Latour aborda é a instalação de uma nova mesa telefônica (fato não social) mas em contraponto vem a escolha da cor desses aparelhos telefônicos (fato social), do mesmo jeito com a situação de um ciclista que bate numa pedra e tenta manter equilíbrio (não social) mas depois ultrapassa o semáforo vermelho (fato social). Dessa forma, é criada uma divisão artificial entre o não social (que fica a cargo de cientistas, engenheiros e conexões entre objetos) e o que é “social”, representado pelo caráter humano.

3.3.2.4 Questões de interesse vs Questões de fato

A palavra “social”, em seu sentido tradicionalmente utilizado, foi muito debatida por Latour no livro “Reagregando o Social”, incluindo os dois principais sentidos atribuídos. O primeiro sentido considera o social como uma espécie de material que liga tudo e mantém conexões (sociologia do social) e, a segunda, que se direciona para o significado de movimento e reunião de entidades sociais (sociologia das associações). Além da problemática estabelecida na palavra “social”, outra palavra também acabou ganhando espaço de discussões e controvérsias, “construção”. Em nosso cotidiano e em muitos domínios, “construir” é sinônimo de algo sólido, algo bom, que é firme. Porém, os cientistas e antropólogos/sociólogos não tiveram essa mesma impressão com a utilização do termo pois, para eles, construir remetia a algo não verdadeiro, algo manipulado (LATOURE, 2012). A ciência é responsável pela construção social de fatos científicos, pois nos laboratórios existe uma articulação entre humanos e não-humanos de forma a produzirem um novo conhecimento, ou pelo menos, algo que não era conhecido até então.

Latour continuou utilizando o termo “construção social”, pois é nesse momento em que há interação entre o humano e o não-humano, onde os dois se fundem. Porém, como comentado anteriormente, essa denotação acabou não agradando aos cientistas, pois a ciência passou a ser vista como uma “construção”. Isso gerou uma falsa divisão na qual “ou uma coisa era real e não construída ou era construída e artificial, ideada e inventada, composta e falsa (LATOURE, 2012, p. 134). Para a TAR a construção social significa algo mais voltado para a visualização das várias realidades heterogêneas na fabricação de um certo estado das coisas (Ibid.). Nesse sentido, é importante destacar o que é uma “tradução”, que seria a mudança de uma informação ou fato de acordo com os interesses dos atores. Por exemplo, os cientistas traduzem as informações ao realizarem experimentos, pois os não-humanos não podem se comunicar, sendo necessária a tradução realizada pelos pesquisadores.

As pessoas costumam destacar uma certa divisão entre o que é social e o que é considerado não-social (natural). Nesse sentido, Latour (2012) explica a diferença entre questões de fato e questões de interesse, sendo que a primeira é ligada às questões relacionadas à natureza, à exatidão. Já as questões de interesse são relacionadas aos interesses humanos, a parte social, ou seja, aquilo que não for questão de fato, é questão de interesse. É justamente essa divisão entre fato-natureza

e interesse-social que deve ser extinguida, pois os objetos também agem e devem ir além da prisão que lhes foi dada pelas questões de fato, não podendo ser reduzidos à essa dimensão (ou seja, os objetos também interagem com relações sociais). Os cientistas em seus laboratórios tentam, todos os dias, tornarem as questões de fato mais visíveis, isso pode ser observado pelo número de artigos em periódicos. O que diferencia as questões de fato das questões de interesse é que as questões de fato são consideradas fabricadas e as questões de interesse podem ser mapeadas com mais facilidade pois estão presentes em toda parte, são controvertidas e incertas (Ibid.). Porém, conforme perdem sua característica controversa e o interesse, tornam-se frias, como descreveria Venturini (2010), e as questões de interesse podem acabar se tornando questões de fato. As questões de fato não conseguem fornecer o mapa para chegarmos às associações, mas as questões de interesse podem aproximar a ciência da linguagem dos atores.

Por fim, Latour (2012) desenvolve uma lista de observações sobre como desdobrar questões de interesse. Em primeiro lugar, os fatos são fabricados e existem em diversos momentos e fases. Para compreendermos melhor como os fatos são construídos, devemos ir ao local de fabricação, onde são criados. Assim essas questões podem ser estudadas antes de se tornarem controvérsias “frias”. Em segundo lugar, devemos verificar como as associações podem ser rastreadas. Os locais e fábricas mencionados anteriormente não se limitam aos laboratórios, elas se estendem, e quanto mais se estendem, mais tornam suas associações rastreáveis. Em terceiro lugar, as controvérsias geram um sítio/local onde as questões metafísicas e ontológicas são estudadas, sendo possível, nesses locais, compreender o que significa o aumento na variedade de agências, pois os atores humanos se relacionam com o não-humanos, criando novas interpretações. Em quarto lugar é possível verificar como foi dado o aprofundamento às questões de interesse. A diferença entre as questões de fato e de interesse foi se tornando pública na medida que surgiram controvérsias sobre as coisas naturais, pois se há controvérsia, significa que não existe mais uma unicidade na explicação da questão.

Essa última incerteza apresentada, juntamente das outras três anteriores, parece mostrar que há uma controvérsia na relação entre ciência e sociedade, sendo os laboratórios (produtores de questões de fato) que acabam se tornando locais onde as questões de interesse também surgem. As questões de interesse possuem objetivos, que na maioria das vezes são definidas pelos cientistas, mas as ações

precisam ser assumidas por diversos atores, para que o objetivo se torne possível (LATOURE, 2012). Após tomarmos cuidado com as relações e definições estabelecidas por um grupo, saber que as ações são assumidas para cumprir a um objetivo, que os objetos agem e que há uma relação entre questões de fato e de interesse, chega o momento em que é necessário escrever o relato do estudo.

3.3.2.5 O risco de escrever um relato

Latour, ao se referir às incertezas vistas anteriormente, explica que “podemos engolir uma, talvez duas, mas não quatro em sequência” (LATOURE, 2012, p. 179), pois ao pularmos tantas incertezas, nosso relato pode acabar se tornando duvidoso. Nesse sentido, a TAR continua alimentando as incertezas, buscando observar o desenrolar das controvérsias, pois a última a ser tratada, agora, refere-se ao estudo em si, trazendo o relato para primeiro plano. Os atores, que fazem parte do relato, não seguem uma mesma direção dentro da controvérsia estudada, sendo papel do pesquisador decidir qual ator seguir, durante quanto tempo e saber quando parar.

Sabendo, da incerteza anterior, que fabricação não é oposto de verdade e que artificialidade não é o oposto de objetividade, o próprio texto se torna um mediador, pois modifica o significado e sentido da informação que transporta. O que aconteceu é algo único da situação real, o relato é a interpretação de alguém sobre um determinado acontecimento ou ação, dessa forma, fica evidente que o relato acaba adotando o papel de um mediador. Dentro desse contexto, do relato agir como mediador, estão influências que pressionam sua escrita, como: prazos, pressões teóricas, pressão de colegas e a escolha de conceitos a serem utilizados. Nessa escrita de relatos, os cientistas sociais tentam imitar a escrita dos cientistas das áreas exatas, revelando dois problemas referentes a essa literatura: “primeiro, os estudiosos tentam imitar a escrita negligente dos cientistas ‘exatos’; segundo, contrariamente a eles, não convocam em seus atores suficientemente recalcitrantes que hesitem para interferir na má escrita” (LATOURE, 2012, p. 184). Latour ironiza, ao definir uma das diferenças entre ciências “exatas” e “humanas”, argumentando que não se pode calar não humanos, mas humanos, sim.

O relato dos cientistas sociais, diferentemente do que se tem a falsa ideia, não tem por objetivo criar narrativas e histórias fictícias, mas sim buscar uma escrita coerente. Uma busca pela escrita coerente não significa mentir em um relato e não é

por que descreve a realidade que precisa ser monótono ou entediante. Disso tem-se que, “nenhum cientista social pode chamar-se cientista se evitar o risco de escrever um relato *verdadeiro e completo* sobre o tópico à mão” (LATOUR, 2012, p. 187). O relato é como laboratório para o cientista social, por isso é necessária muita atenção ao que for escrito, assumindo também a possibilidade e o risco de falhar, “um bom relato é aquele que *tece uma rede*” (Ibid., p. 189). O bom relato, retomando o que foi discutido nas seções das incertezas anteriores, mostra a relação de grupos sendo estabelecidas e desfeitas, mostra rastros deixados pelos atores e ações realizadas por eles, mostra que várias associações são feitas, gerando sempre mais caminhos e respostas em uma controvérsia. Enfim, Latour define o termo *rede* da teoria Ator-Rede, com o seguinte aspecto:

Rede é uma expressão para avaliar quanta energia, movimento e especificidade nossos próprios relatos conseguem incluir. Rede é conceito, não coisa. É uma ferramenta que nos ajuda a descrever algo, não algo que esteja sendo descrito. [...] do mesmo modo, rede não é aquilo que está representado no texto, mas aquilo que prepara o texto para substituir os atores como mediadores. (LATOUR, 2012, p. 192)

É difícil criar um relato ideal ou um caminho de sucesso ao descrever a pesquisa, mas é possível compreender o que faz com que um relato seja ruim. Dentre esses aspectos estão: atores que não agem, excesso de clichês ou não deixar claro um vínculo que facilite o prosseguimento do relato. Como já é de praxe, ao longo da descrição das incertezas, Latour (2012) descreve uma lista, mas dessa vez, com a função de abordar (sugerir) possíveis cadernos ou modos de organização para adotarmos ao longo da pesquisa. O primeiro caderno é o diário da pesquisa, no qual são anotadas todas as transformações sofridas no estudo, as mudanças de concepção e reações às visitas de campo, sendo preenchido com regularidade. O segundo caderno deve possibilitar uma organização cronológica de todos os itens da pesquisa, para que depois sejam rearranjados em arquivos e subarquivos. O terceiro, é um caderno onde possam ser feitos esboços e desenhos de pesquisa, onde as ideias fluem naturalmente, impedindo que as ideias apareçam de forma mecânica no relato futuro. O quarto caderno tem o papel de “registrar o efeito do relato escrito nos atores cujo mundo tenha sido desdobrado ou unificado” (LATOUR, 2012, p. 197).

Sobre a escrita dos relatos, pelos estudiosos, Latour aponta que a tarefa de os escrever sem transformá-los é muito complexa. Ao acrescentarmos nossas

explicações ou subentendidos das ações e falas dos atores, estamos interferindo no real significado do relato e ainda adicionando fatores desnecessários. Os estudiosos não devem ocupar o tempo de escrita dos relatos tentando adequar a linguagem à teoria desenvolvida pelas ciências sociais, justamente para não recair nas “forças sociais”. Os relatos contêm toda a manipulação de dados e interpretações feitas por quem o escreve, por esse e pelos outros motivos relacionados ao ato de compor um relato é que essa tarefa se torna tão arriscada, devendo ser direcionada muita atenção para não ocasionar uma distorção na situação estudada.

3.3.3 Rastreamento associações (tornando o social plano)

Os vínculos sociais são evasivos e o problema, de acordo com Latour, é justamente a forma como o “social” é compreendido. Como visto nas incertezas descritas anteriormente, as associações são mais facilmente rastreáveis quando o mecanismo que as revela se torna visível. O vínculo social só pode ser rastreado no momento em que ocorrem modificações, quando algo se altera e “deixa rastros”. O papel da sociologia das associações, na qual está a TAR, é desdobrar as controvérsias sobre as quais as associações são possíveis (LATOURE, 2012), mas a sociologia focou tanto nesse elemento que acabou limitando as agências que faziam os atores agirem, excluiu os não-humanos e reforçou a divisão entre natureza e social.

Os teóricos sociais consideram a sociedade como uma realidade virtual, uma hipótese e uma ficção. A composição do coletivo de forma justa é dificultada pelas duas “monstruosidades” compreendidas por Latour: a natureza reunindo os não-humanos separados dos humanos e a sociedade separando os humanos dos não-humanos (LATOURE, 1984, 2012). Para que a definição de social, como associações, seja estudada, deve ser gerada uma nova paisagem, uma migração entre o global e o local. As interações locais são complexas, “maioria dos ingredientes que compõem a cena não foi levado para lá por você, e muitos deles foram improvisados no local pelos demais participantes” (LATOURE, 2012, p. 240). Essas interações estão cheias de elementos de outro tempo e lugar, e foram gerados por meio de uma mediação. Por exemplo, podemos estar em casa utilizando um computador (interação) com peças feitas em 2010 (tempo) vindas e fabricadas na China (lugar), feitas em um contexto por agências específicas.

É gerado então um certo paradoxo entre local e global, de forma que quando há foco em interações locais, é solicitado que se ache um contexto no qual ela encaixe, no caso contrário, tendo um contexto global, nos vemos obrigados a torná-lo mais humano, torná-lo local, mais compreensível. A TAR alega que deve existir um equilíbrio entre “interações não existem realmente pois precisam ser inseridas num contexto” e “o contexto nunca existe efetivamente pois é sempre uma instância da prática individual” (LATOURE, 2012, p. 246). Um dos trabalhos da Teoria Ator-Rede é, então, manter o domínio social plano, sem ser necessária uma terceira dimensão na qual todas interações deveriam estar conectadas. Para manter esse mapeamento de associações em uma paisagem plana, são necessários três movimentos: localizar o global, redistribuir o local e construir conectores.

3.3.3.1 Localizando o Global

A passagem de um ponto de vista local para um global deveria significar uma multiplicação dos pontos de vista (LATOURE, 2020), no sentido de ampliar variedades e consideração de um maior número de seres (inclusive os não-humanos), ampliando também as culturas envolvidas, possibilitando uma participação de todos. Porém, a chamada globalização, está fazendo justamente o contrário, ao invés de permitir que todos participem com suas respectivas culturas, compreensões e pontos de vista, está reduzindo essas características, espalhando uma visão hegemônica a ser adotada por outros “locais”.

O que Latour (2020) define como local-mais é o sentimento legítimo de preservação dos costumes e práticas locais, sendo que quando esses pontos de vista e culturas são globalizados, vários pontos de vista são considerados, todos têm acesso e participação (o que foi denominado de globalização-mais). Em contraponto, quando essa passagem local-global de multiperspectivas é substituída por perspectivas particulares e com interesses isolados/limitados, sendo que um “local” quer somente o prevalecimento do seu ponto de vista, aparece o que Latour denomina de globalização-menos. Esse último movimento, por consequência, ocasiona a defesa extrema de uma tradição/cultura sem permitir que outras perspectivas sejam consideradas, erguendo a verdade como algo que somente é obtido dentro dessa fronteira nacional ou étnica, a isso denomina-se local-menos. Em suma, o “menos”

significa as características negativas da globalização e do local e o “mais”, as características positivas.

O primeiro dos movimentos é a localização do global, assumindo uma paisagem bidimensional. Os vários locais (pontos de vista específicos) existentes têm alguma relação com outros locais, conectando-os, o que faz com que atores criem novas associações e ações sejam assumidas por um grande número de atores. Esses caminhos que levam de uma perspectiva local até outra são feitos por meio dos mediadores (LATOURET, 2012), atores, humanos e não-humanos, que deixam rastros passíveis de serem rastreados. Continuando com a metáfora de planificar o social, as barreiras a nossa visão que eram causadas pela tentativa de deixar o social disposto em três dimensões, são retiradas na consideração bidimensional do social, dessa forma tornando visível o que transporta uma ação de um local até outro.

Nenhum local é maior que outro, o que diferencia seu tamanho é justamente a planificação, pois o que antes (tridimensionalmente) era visto de forma sobreposta (conexões mais seguras com outros locais), agora está planificado, deixando lado a lado aquilo que tentava superar ou incluir (a cima ou abaixo um do outro). O que antes eram saltos (lacunas, informações ocultas) entre as três dimensões, agora são caminhos planos. A evolução da ciência e tecnologia permite que as conexões sociais sejam mais facilmente identificadas/rastreadas, pois as tecnologias constroem materiais que destacam os vínculos (LATOURET, 2012). Na tentativa de estabelecer um determinado contexto (visão ampla) para uma perspectiva local, por vezes, emolduramos uma paisagem, sendo que essa paisagem não pode ser inserida dentro de uma maior, mas sim, devemos pular de uma moldura para outra. Localizar o global pode ser visto como buscar qual o local que originou o global (considerando que a visão adotada por muitos é a globalização-menos), quais as características e agências que tentam globalizar determinadas ações/culturas/pontos de vista, verificar como essas associações se conectam aos atores.

3.3.3.2 Redistribuindo o local

É muito complexo tentar, ao mesmo tempo, ter uma visão geral do “todo” e conseguir perceber os detalhes que as pequenas partes que o compõe têm. Isso torna perceptível a informação de que não existe um global que consiga englobar tudo e fornecer os detalhes das informações necessárias. Dizer que uma interação local é

moldada por vários elementos que estão em cena não nos permite identificar esses elementos nem suas procedências, mas permite verificarmos que eles não vêm de um contexto global, pois os elementos representam a especificidade do local e as culturas em seu entorno. Os atores não-humanos criam os meios pelos quais os ingredientes da ação interagem, então o pesquisador deve estar apto a seguir essas múltiplas ações no local e no global (LATOURE, 2012).

Ao supor que deixar uma cena local seja relacionado à nos encaixarmos num contexto, esse contexto permite que vários locais interajam, que várias perspectivas diferentes fiquem frente a frente, tornado as conexões e diferenças mais visíveis. Dessa forma, a interação local adquire um sentido diferente:

Interação local é o conjunto de todas as outras interações locais distribuídas no tempo e no espaço, trazidas à cena por outros tantos atores não-humanos. As presenças transportadas de uns lugares para outros chamo de *articuladores* ou *localizadores*. (LATOURE, 2012, p. 281)

Buscando facilitar o processo de distribuição do local, Latour propõe uma lista de interações que não funcionam, sendo assim, elas *não* podem ser:

- Isotrópicas, não pode ter essa característica pois algo que atue em vários pontos e provenha de diferentes locais, aumenta a dificuldade de encontrarmos conexões (entre os lugares);
- Síncronas, nenhuma interação pode ser considerada assim pois os elementos foram formados por vários “tempos” distintos. Um exemplo pode ser elaborado ao pensarmos em uma mesa, ela pode ter sido construída em um tempo, mas a madeira da árvore foi cortada em outro tempo, a árvore foi cortada em um tempo diferente também, assim como a época em que ela foi plantada;
- Sinóticas, as interações não podem ser visualizadas em seu todo, não podemos observar e resumir todos os participantes e ações que ocorrem nas interações;
- Homogêneas, a qualidade do desempenho dos atores (humanos e não-humanos) não é mantida de forma homogênea, sendo assim, as formas como as interações ocorrem são variáveis;
- Isobáricas, a pressão ou intensidade com a qual cada ator necessita aparecer ou ser notado (deixar rastros) não é a mesma para todos.

Levando em conta o que foi observado na incerteza referente à formação de grupos, é difícil determinar um “local”, pois inúmeros atores atuam ao mesmo tempo nas interações (seja agindo, sendo anexados ou retirados dos grupos/culturas), fazendo com que as fronteiras desse “local” se modifiquem, o que possibilita a redistribuição dessas fronteiras, do que é considerado local. Ao mesmo tempo que nenhum lugar consegue predominar tanto de forma a ser global, não consegue também ser autônomo o suficiente para ser local (LATOURE, 2012). Devido a isso, Latour decide adicionar um novo grampo para manter plana a cartografia da TAR, chamando-o de “conectores” ou conexão. Os conectores são elementos que permitem o funcionamento e conexão de coisas que antes não eram possíveis. Além da planificação do social, pela TAR, é necessário achatar a noção de ator, tornando-o um “ator-rede”, deixando mais claro ele é levado a agir por uma complexa rede, onde os mediadores se movimentam. Nessa rede, quanto mais um ator tem vínculos, mais ele existe (no sentido da TAR, de deixar rastros) e mais ele poderá assumir ou exercer ações sobre os outros.

3.3.3.3 Construção de conectores

Após entender como localizar o global e como distribuir o local, o terceiro movimento proposto por Latour é o fator que conecta os dois movimentos anteriores através de vínculos, essa conexão ou os meios que a produzem foram chamados de “conectores”. Os tópicos anteriores tiveram o objetivo de modificar a estrutura de pesquisa, sempre tentando colocar grampos para manter o estudo plano. No tópico localizando o global, o objetivo foi de transferir “o global, o contextual e o estrutural para dentro de lugares minúsculos, permitindo-nos identificar através de quais circulações de mão dupla esses lugares poderiam adquirir relevância para outros” (LATOURE, 2012, p. 315). Já no tópico referente a redistribuir o local, o objetivo é “transformar cada lugar no ponto de chegada provisório de outros locais distribuídos pelo espaço tempo, com cada um se tornando o resultado da ação a distância de outro agente” (LATOURE, 2012, p. 316).

Na medida em que uma conexão se estabelece, um agente é responsável por atribuir uma dimensão a algo. A forma como tradicionalmente se compreende local e global não faz sentido quando utilizado em um estudo, pois algo pode ser local (utilizando protocolos, sinais e aspectos culturais próprios) e ao mesmo tempo global

(na medida que utiliza padronizações referente aos aspectos e sinais específico). O que conecta os vários locais é o deslocamento da informação, ação ou atores, por meio dos conectores.

Os mediadores, já mencionados anteriormente, têm um papel importante, pois eles “convocam e reúnem o coletivo na medida daquilo que vocês até agora chamaram de social, limitando-se a uma versão padronizada de agregado; ‘se quiserem seguir os próprios atores, sigam-nos também.’” (LATOUR, 2012, p. 343). Dessa forma, a sociedade não é algo onde tudo está contido, mas sim algo que permeia tudo, estabelecendo relações.

Nosso papel como pesquisadores/estudiosos não deve ser o de tentar preencher lacunas, pois o material utilizado para essa tarefa pode acabar alterando as perspectivas. Ao tentarmos definir um grupo, o seu modo de agir se modificará, da mesma forma que, ao tentarmos justificar uma ação através de uma expressão, estaremos induzindo outras pessoas a assumirem essa ação. O papel dos conectores é, então, aproximar a distância que separa o global do local, aproximando também as ações, possibilitando que os padrões existentes em cada local sejam transportados para os “globais”.

3.3.3.4 Da sociedade ao coletivo

Os grupos não podem ser definidos previamente, pois isso geraria uma incerteza na mobilidade das relações entre os atores, ou seja, não podemos definir previamente algo que é instável e pode modificar a cada instante. Da mesma forma ocorre nas ações, o ator ou ator-rede não é fonte da ação, mas acaba assumindo uma ação que foi imposta por outras agências. Nisso entram os objetos, que ajudam a estabelecer e equilibrar relações de poder e inclusive modificam o estado de uma ação e em muitas ocasiões são ligados a verbos que designam ação. Para a TAR tudo que age e deixa rastros é um ator, ou seja, os objetos também são atores, ou actantes. As questões de fato não chegam aos pontos de uma controvérsia, já as questões de interesse são interessantes e podem mostrar grandes objetivos ocultos em sua origem, não podemos deixar que a segunda se torne igual a primeira. Por fim, ao escrevermos um relato, devemos estar conscientes das incertezas presentes, seja a que se refere a linguagem quando tentamos adaptar as intenções do ator ou descrever um acontecido. Além disso, os relatos são como o laboratório dos cientistas, é um

lugar onde existem possibilidades de erro, mas deve-se mesmo assim deixar que a verdade dite a escrita.

Estabilizando, mas não limitando estas incertezas, parte-se para o momento em que a paisagem a nossa frente necessita se tornar plana, para que vejamos tudo lado a lado, onde diferentemente da sociologia do social, evitaremos saltos tridimensionais entre estruturas globais e locais separadas, evitando abismos que “deixam passar” vários detalhes e associações importantes. Nessa planificação da topografia é importante a utilização de alguns movimentos. Ao percebermos que o global não pode existir de forma definitiva e por isso está contido em vários locais, essa ideia de uma estrutura que engloba tudo, pode ser deixada para trás. Quando notamos que os locais se expandem devido a movimentações e associações, em pouco tempo estão espalhados por todos os lados e já não sabemos como segui-los, nota-se que que local é um ponto de origem para outro local. Para dar sentido a tudo isso e “ligar” o macro e micro, são utilizados os conectores, que permitem romper os últimos obstáculos que separam a visão planificada dos estudos TAR, fazendo uma ponte das relações globais e locais.

Uma das diferenças ou contrastes mais relevantes entre TAR e Sociologia do social é que, o trabalho de resolver as controvérsias quanto ao mundo social não é papel dos cientistas e sim para os futuros participantes dessa controvérsia, pois como visto nas incertezas, o número de agentes que participa de uma controvérsia permanece aberto. A TAR tenta dar importância aos coletivos que foram postos de lado por décadas de estudos da sociologia tradicional, além de dar valor aos membros que formam esse coletivo e haviam sido deixados de lado pela natureza e sociedade (LATOUR, 2012).

Latour ensinou que inicialmente necessitamos entender o verdadeiro sentido do que significa “social”, pois o social é composto por associações e conexões, e não por uma força ou material que envolve tudo. Para reagregar o social, devemos seguir as cinco incertezas apontadas pelo autor, não necessariamente todas, mas algumas acabam sendo indispensáveis. Devemos nos preocupar tanto em estabilizá-las quanto mantê-las em aberto. Dentro de cada incerteza, devemos observar os detalhes e as listas elaboradas pelo autor, que muitas vezes permitem um redirecionamento da pesquisa. O relato gerado pela pesquisa deve conter a nova noção de social e, além disso, redefinir o sentido de global e local, transportando o primeiro para locais minúsculos, e a segunda permitindo perceber que os locais estão sempre se

expandindo e se relacionando com outros locais, sendo que essa expansão ocorre pela ação dos atores (e é distribuído conforme expande). Todo esse ferramental, elaborado e adaptado por Latour, permite que nosso foco não seja desconstruir o social, mas sim, reagregá-lo.

3.4 O CONCEITO DE “TRADUÇÃO”

A Teoria Ator-Rede inicialmente foi pensada com vários rótulos diferentes, dentre eles estava a denominação “sociologia da tradução”. A palavra tradução é muito importante dentro das obras de Latour, ela de certa forma é uma conexão que transporta transformações. Sobre o rastreamento do social, Latour destaca que “não existe sociedade, não existe domínio social nem existem vínculos sociais, *mas existem traduções entre mediadores que podem gerar associações rastreáveis*” (2012, p. 160). Isso permite compreendermos, retomando o conceito de mediador, que quando há alteração ou modificação de significados, ocorre uma tradução, a qual facilita a visualização das associações, quando estas ocorrem. Ainda, na escrita de relatos ou apresentações de ideias, ao invés de transportar efeitos ou significados sem modificá-los, o autor pode fazer com que cada ponto do texto se torne uma bifurcação, a origem de uma tradução. Nesse sentido, a palavra “rede” designa um fluxo de traduções (LATOURE, 2012).

Uma questão de fato geralmente é relacionada com ciência e a parte da natureza na divisão natureza/sociedade. Porém, um fato científico precisa de ambos os lados dessa moeda para se consolidar. As relações políticas e sociais garantem que o investimento para as pesquisas continue sendo fornecido, ao mesmo tempo que a ciência fornece informações para a sociedade. O fato é aquilo que permanece no tempo e já é considerado como algo “certo” (LATOURE, 2001), o que acaba por gerar uma certa estabilização desse conhecimento. Essa estabilização pode ser verificada diretamente na relação que existe nos artigos. Uma teoria que é mencionada sem a relação direta à sua referência primária (ou fonte primária) acaba se tornando uma caixa-preta, um conceito que é complexo de encontrarmos ou rastreamos sua origem. Dessa forma, o aumento no número de menções feitas a uma ideia, sem a referência de onde se originou, é um indício de que o conceito/ideia se estabilizou, virou um fato (LATOURE; WOOLGAR, 1997).

Em “A Esperança de Pandora” (2001) Latour explica o conceito de tradução por uma outra perspectiva. Nesse livro, ele dá exemplo do físico-químico Frédéric Joliot que teve que, ao mesmo tempo, lidar com diversas funções, dentre elas: fazer funcionar reator, despertar o interesse de políticos, militares e industriais, dar ao público uma imagem positiva de suas atividades e compreender o que se passa com os nêutrons. Em todas ocasiões Joliot não tentou modificar seus objetivos, apenas os apresentou de outra forma, seja adicionando elementos ou transformando os sentidos das palavras. Para os militares, o discurso de Joliot foi traduzido dos termos físico-químicos para um vocabulário que convencesse os militares a apoiarem suas ideias, dessa forma utilizou o estudo de processos nucleares como uma possível garantia de fortificar o poderio militar e discurso de independência nacional. Para as indústrias o objetivo foi traduzido de forma a garantir que a fissão nuclear controlada poderia fornecer uma autossuficiência energética. Essas duas traduções também foram utilizadas no convencimento do setor político. Ele precisou explicar o que faria ao público e aos seus colegas, de forma que ajudassem esse conhecimento a se tornar um fato científico, para isso realizando experimentos e obtendo resultados favoráveis, aumentando a credibilidade do que estava desenvolvendo.

Retomando o que foi dito nos parágrafos anteriores, os conceitos de fatos científicos, estabilização e tradução estão todos conectados. Quando um cientista decide escrever sobre um fato científico estabilizado ele acaba abordando o “conteúdo conceitual” (expressão que Latour prefere chamar de vínculos e nós na teoria), porém, de uma forma ou outra, incorpora a isso seus objetivos e opiniões pessoais. Essa transformação que o fato sofre com a mediação realizada pelos cientistas, é a tradução (LATOURE, 2001, 2012). Fazem parte do processo de tradução os elementos que se transformaram, os elementos que foram adicionados (buscando adequar a um novo contexto ou fortalecer o argumento/objetivo do autor) e os elementos que foram perdidos no decorrer do tempo (seja por esquecimento, conveniência ou abandono de parte da ideia).

3.5 ALGUMAS IMPLICAÇÕES DA TEORIA ATOR-REDE PARA A PESQUISA EM HISTÓRIA DA CIÊNCIA

Os tópicos anteriores forneceram informações sobre o que é a Teoria Ator-Rede de Bruno Latour, Historiografia e História da Ciência. É possível, agora, estabelecer uma relação e destacar algumas implicações da TAR para pesquisa em História da Ciência. A TAR de Latour (2012) permite compreender que cada processo ou episódio descrito pela História da Ciência é único, pois os actantes que constroem a teoria ou conceito são distintos em cada situação e, além disso, permite encontrarmos os actantes que se tornaram invisíveis ao longo das narrativas na História da Ciência (PERON, MORAES, 2021).

A teoria de Latour se preocupa com as associações e como as redes se formam a partir delas. Algumas implicações para a pesquisa em H.C. podem ser retiradas das cinco incertezas discutidas anteriormente, como o fato de não escolher ou selecionar grupos de antemão e tentar definir um ator de maior importância tendo a visão externa à rede estudada, compreender o papel dos mediadores e a representatividade do porta-voz em um determinado episódio, estudar os atores que agem (pois a ação é assumida, mas não é possível ter certeza da sua origem), levar em conta a participação dos não-humanos na construção de fatos, libertar as questões de fato à sua redução a natureza e as questões de interesse à sua redução da explicação pela sociedade, rompendo a separação imaginária entre sociedade e natureza.

Baseados na antropologia simétrica (1984) de Bruno Latour, a fim de estabelecer a relação entre abordagens históricas relacionadas à teoria do autor, Lima, Rosa e Bento (2020) discutem os desafios e potencialidades da abordagem denominada por eles de “História Simétrica”. Ao discutirem as abordagens da História da ciência ao longo do tempo, desde do seu início com o objetivo de contribuir para estabilização da ciência como tradição de busca pela verdade, passando pelo enfoque da mobilização de elementos da sociedade pelo Programa Forte da Sociologia até chegar na “História Desconstrutiva”, na qual natureza e sociedade são dissolvidas e passam a ser parte de jogos de linguagem e poder (Ibid.), permitem a compreensão da concepção de Latour.

Os autores (LIMA; ROSA; BENTO, 2020), ao realizarem algumas considerações metodológicas, destacam algumas possíveis características da História Simétrica:

- a) **A história caminha para a estabilização da natureza e da sociedade.** A História Simétrica revela como elementos da natureza e estruturas sociais foram articulados e estabilizados após uma polêmica. Podemos descrever a proveniência e o surgimento - que revelam as singularidades do evento. No entanto, devemos destacar o que torna a natureza e a sociedade estáveis.
- b) **Não-humanos têm agência:** em vez de contar uma história na qual humanos usam objetos para fazer história, a História Simétrica observa como humanos e não-humanos se articulam, mediam e traduzem uns aos outros. Claro, o cientista desempenha o papel de porta-voz, mas novamente sua vontade é afetada pela ação de não-humanos em algum ponto.
- c) **Os atores não existem de forma independente - eles são a articulação de outros atores.** Em vez de considerar a “realidade” uma propriedade binária, a História Simétrica reconhece a realidade como um espectro contínuo. Um atuante existe de acordo com o número e a estabilidade das associações de sua rede. Nesse sentido, a História Simétrica é não essencialista. Na História Simétrica, mostra-se o trabalho do cientista para mobilizar elementos para tornar real um novo ator.
- d) **Conhecimento e Crença são simétricos:** Todas as afirmações são válidas em uma rede específica, em um conjunto específico de proposições - o que Latour chama de envelope espaço-temporal (Latour 1999d).
- e) **É possível hierarquizar proposições:** Embora não haja nenhuma diferença essencial entre conhecimento e crença, em um determinado envelope do espaço-tempo, é possível comparar as redes mobilizadas por diferentes atores. Nesse sentido, é possível hierarquizar proposições. Existem proposições que existem mais do que outras e, como consequência, algumas afirmações são mais verdadeiras do que outras.
- f) **Interior e exterior da ciência são misturados:** em vez de separar o social do natural, a História Simétrica lida com coletivos de humanos e não humanos. Assim, não é possível separar o interior do exterior da ciência, a ontologia da epistemologia e a epistemologia da política (Latour, 1999d). Isso não significa que todos esses aspectos devam estar presentes o tempo todo, mas sim que podem estar (Latour 2005).
- g) **Os atores devem falar:** ao invés de projetar categorias a priori na história ou buscar a “história real”, deve-se focar em ouvir e relatar as próprias narrativas do ator. Nesse sentido, a história simétrica é sempre baseada em narrativas dos próprios protagonistas, com todas as subjetividades e controvérsias que isso pode acarretar. Não esperamos espelhar a “realidade histórica”, mas articular o que Latour (2005) chama de relato arriscado. Ao trazer mais pontos de vista para a conta, torna-se mais estável. (LIMA; ROSA; BENTO, 2020, p. 6)

As características citadas acima podem ser percebidas no livro de Latour (1988) “Pasteurização da França” e na síntese sobre a controvérsia entre Boyle e Hobbes que faz com base na obra de Shapin e Schaffer (1985), em “Jamais Fomos Modernos” (LATOUR, 1984). Situações que descrevem como questões sociais e de caráter político acabaram sendo construídas como questões “naturais”.

A Antropologia Simétrica estende a noção de existencialismo de Sartre aos não-humanos, os quais não têm uma essência preexistente, sendo estabilizadas ao longo do tempo e a partir de interações (LIMA; ROSA; BENTO, 2020). Dessa forma, a prática científica cria a natureza e a estabiliza com o tempo. Isso tem impacto direto na forma como a história é contada, pois não se deve buscar, em humanos e não-humanos, características preexistentes, mas sim as articulações entre esses atores, nas quais a essência não seja objetiva e imutável (Ibid, p. 6). A simetria generalizada e a livre associação (CALLON, 1984) refletem a característica de compartilhamento de agência durante as narrativas históricas, no que se refere à humanos e não-humanos. A articulação entre humanos e não-humanos geram situações que contêm o cientista como porta-voz, situações nas quais ocorre o processo de “tradução”, que é, de certa forma, a adaptação de uma informação do fato de acordo com o interesse dos actantes.

A compatibilidade da história da Ciência com a cosmovisão da teoria de Latour, permite que muitas das características da Antropologia Simétrica possam ser adotadas na pesquisa em História da Ciência, destacando uma “História Simétrica”. Tendo por objetivo “explicar como o coletivo de humanos e não-humanos passa a existir e como eles mudam com o tempo” sendo que “todos os atores (humanos e não-humanos) tem agência, eles transformam a realidade e impactam a agência de outros atores, bem como são transformados e têm sua agência impactada por outros atores” (LIMA; ROSA; BENTO, 2020, p. 5). Alguns aspectos destacados anteriormente a respeito das considerações metodológicas nem sempre podem ser observados em um contexto de física teórica, principalmente os acontecimentos originados em laboratório. Nesse caso, pode-se fazer algumas considerações a respeito dos “actantes matemáticos”, nos quais os símbolos matemáticos representam os instrumentos do laboratório e as manipulações matemáticas representariam os experimentos, sendo possível trabalhar a História Simétrica no desenvolvimento de teorias Físicas, como foi feito com o princípio de incerteza no já mencionado trabalho de Lima, Rosa e Bento (2020).

A História Simétrica apresenta a potencialidade de permitir que a física seja abordada em questões históricas sem dicotomias de abordagem internalista/externalista e a adoção de perspectivas absolutistas/relativistas (Ibid.), permitindo que a Física e o progresso de suas teorias, sejam compreendidos de acordo com a estabilidade de suas associações.

4 TRAJETÓRIA METODOLÓGICA

Após leituras de livros sobre a História da Teoria Quântica que mencionam a existência do periódico *Epistemological Letters* (FREIRE JR., 2015; WHITAKER, 2012), identificamos que ele seria um objeto de pesquisa importante e que permitiria compreender alguns aspectos mais específicos com os argumentos dos autores na época da controvérsia. O periódico, como apontado pelos autores, foi um meio necessário para a ocorrência de debates sobre os fundamentos da Teoria Quântica. Dentre os vários elementos importantes do periódico, inicialmente buscamos compreender o contexto de desenvolvimento das ideias e o que deu origem ao debate contido nele, assim como o que motivou o seu término. A revista permitiu também que relacionássemos todos os atores envolvidos e as controvérsias debatidas ao longo de sua duração, juntamente da rede sociotécnica mobilizada para sustentá-los. Buscamos também identificar a estabilização que o Teorema de Bell teve em meio às discussões apresentadas pelos autores nas 36 edições e como as discussões de Bell foram traduzidas, posteriormente, para periódicos oficiais.

Após a apropriação da Teoria Ator-Rede e a familiarização com a Historiografia, mais especificamente a História Cultural, os estudos relacionados ao periódico começaram. Inicialmente, sabíamos da existência da revista, porém não havíamos pesquisado de fato sobre suas contribuições e história. Conseguimos identificar, após uma busca na internet, a existência de 36 edições da revista. Uma busca aprofundada, permitiu encontrar um site que continha as 36 edições da *Epistemological Letters*. Prontamente foram realizados os *downloads* de todas as edições. Uma leitura inicial permitiu identificarmos alguns nomes relacionados a revista e os países correspondentes a cada um dos sobrenomes constados na lista de destinatários. Esse ponto acabou se mostrando mais complexo do que parecia, pois, a revista disponibilizava apenas o sobrenome dos participantes, dificultando a busca. Então, com as informações obtidas até o momento e somente os sobrenomes dos integrantes do periódico, dos mais de 200 leitores, foram levantadas as informações de aproximadamente 100 deles.

Em um segundo momento, foi realizada uma busca em cima de referenciais secundários, na tentativa de descobrirmos mais informações sobre a *Epistemological Letters*. As obras pesquisadas foram “*The new quantum age*” (WHITAKER, 2012), um artigo da revista Nature denominado “*Quantum Outsiders*” (GUSTERSON, 2012), os

livros “*The Quantum Dissidents: Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics*” (FREIRE JR., 2015), “*David Bohm*” (FREIRE JR., 2019) e o artigo “A Story Without an Ending: The Quantum Physics Controversy 1950–1970” (FREIRE JR., 2003), o livro “*Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais*” (FREIRE JR.; PESSOA JR.; BROMBERG, 2011), o livro “*Quantum Language and the Migration of Scientific concepts*” (BUERWELL, 2018), o livro “*Quantum [un]speakables*” (BERTLMANN; ZEILINGER, 2002) e por fim o livro “*How the Hippies saved Physics*” (KAISER, 2011). Dos livros citados anteriormente, somente citações e menções breves e sem muitos detalhes eram feitas, a respeito da *Epistemological Letters* (isso se deve ao fato dos livros não se proporem a fazer tal descrição). Geralmente os comentários se referiam a mensagem que estava escrita no verso de todas as edições, alegando que a revista tratava da temática da “subcultura” da Teoria Quântica. Além disso, dois dos livros anteriores não mencionavam o periódico nem faziam menção a ele.

O passo seguinte foi a realização de um mapeamento e uma localização do conteúdo da revista. Em uma visão geral das 36 edições da *Epistemological Letters*, feita previamente, foram elencadas cinco temáticas que formaram categorias nas quais os artigos seriam classificados. Muitos dos temas contidos na revista estavam relacionados aos novos aspectos da Teoria Quântica, como o teorema de Bell, a possibilidade de interpretações alternativas, como as Variáveis Ocultas, os possíveis desdobramentos para as questões de relatividade e consequências filosóficas dessas discussões. Os temas ou categorias iniciais foram: “Variáveis Ocultas”, “Teorema de Bell e Localidade de Bell”, “Conceitos e Formalismo da Teoria Quântica”, “Filosofia da Teoria Quântica” e “Relatividade e Paradoxo EPR”. A categorização foi realizada com base em uma leitura preliminar dos conteúdos de cada artigo. Caso um artigo contivesse mais de um tema ou não ficasse claro a qual categoria pertencesse, era feita uma leitura mais aprofundada. A categoria “Variáveis Ocultas” não foi colocada juntamente da categoria referente ao Teorema de Bell pois muitas das menções às Variáveis Ocultas não eram diretamente ligadas ao físico. Essas variáveis e as frequências dos valores, de publicações e autores, permitiram a construção de um mapa feito através de Análise de Correspondência (uma síntese do que é a análise de correspondência aparece na próxima seção).

Em muitos casos, era difícil o processo de dissociação entre as categorias dentro de um artigo, justamente por eles não terem rigor de limitação de temas. Então os artigos foram classificados de forma a encaixarem em uma ou mais categorias

apresentadas anteriormente. O tema das Variáveis Ocultas (VO) abordava essa nova possível interpretação da TQ (sejam locais ou não-locais), que foi impulsionada pelo Teorema de Bell. O tema discutia, de forma geral, sobre as ideias de David Bohm, mas se relacionava em alguns momentos ao nome de Bell e de Broglie. O tema referente ao Teorema de Bell e localidade de Bell (TB) abordavam de forma geral os resultados e a prova demonstrada pelo artigo de 1964 do autor e a Teoria dos Beables, além disso, destacam os experimentos mais recentes que buscavam corroborar para o teorema.

O tema de Conceitos e Formalismo da Mecânica Quântica (CF) englobava os artigos que discutiam os formalismo e conceitos da Teoria Quântica hegemônica na época, que era a interpretação da complementaridade. Esses artigos, discutiam e retomavam conceitos importantes da teoria buscando fortalecer o argumento de que a teoria era completa e relacionando os conceitos já conhecidos a outros temas que estavam em debate na época. A categoria Filosofia da Teoria Quântica (FQ) contemplava os debates filosóficos causados pelo surgimento dessas novas controvérsias da TQ, debatendo aspectos como localidade, realismo, consciência e argumentos filosóficos sobre experimentação. Por fim, a categoria que abordava as duas teorias que envolviam Einstein, a Relatividade e o Paradoxo E.P.R (RP), que destacavam a relação da TQ com a relatividade e também a crítica feita por Einstein, Podolsky e Rosen à TQ. Apesar da relatividade em si não ser um argumento contrário à Teoria Quântica, o paradoxo EPR claramente mostrava os conflitos entre as ideias e percepção dessa interpretação física, sendo que o Teorema de Bell, em certo ponto, foi uma resposta ao artigo de Einstein, Podolsky e Rosen de 1935. As relações entre autores, números de artigos, categorias de temas serão abordadas em uma seção posterior, indo do ponto geral de investigação sobre como os temas e discussões dos autores foram ajudando na estabilização do Teorema de Bell na revista *Epistemological Letters*.

Para a última etapa da discussão, no que diz respeito a possível estabilização e/ou tradução das ideias de Bell da *Epistemological Letters* para os periódicos oficiais, foi utilizada a busca através do “Scopus”. A busca foi realizada através do nome de Bell, sendo adicionados os filtros referentes a: artigos, com data posterior a 1973 (ano em que a primeira edição da *Epistemological Letters* foi publicada) e que fossem de autoria somente de Bell. A busca inicial filtrada somente pela data posterior a 1973 resultou em trinta e um artigos e após a delimitação de autoria de Bell o resultado de

artigos diminuiu para sete. Por fim, foi realizada a verificação de se existia alguma publicação com o mesmo nome ou semelhante a alguma da *Epistemological Letters* (o que não gerou resultados) e a leitura dos resumos dos artigos a fim de relacionar quais deles continham os mesmos temas que o periódico em questão. O passo seguinte foi a leitura e comparação dos artigos filtrados e os contidos na *Epistemological Letters*, dessa forma encontrando as traduções ocorridas na transição entre o periódico em questão e os veículos “oficiais” da ciência.

Por fim, no que se refere aos “cadernos” descritos por Latour na última incerteza (diário de pesquisa, caderno para anotações de cronologia das ações e itens pesquisados, caderno de esboços e caderno para registrar a transformação ocorrida para os envolvidos na rede desdobrada), houve uma adaptação. O diário de pesquisa foi realizado por meio de um arquivo de documento de texto no computador. A cronologia de uso dos arquivos ficou gravado nas pastas com a data de últimas modificações realizadas, o que permite identificar quando os arquivos foram utilizados. O caderno de esboços foi realizado na forma de comentários nos próprios trabalhos lidos ou em documentos com resumos das informações que surgia durante a leitura. O último caderno, sobre o registro das mudanças ocorridas pelos desdobramentos nas redes as quais os atores pertenciam, não foi utilizado na pesquisa.

4.1 ANÁLISE DE CORRESPONDÊNCIA

O objetivo da Análise de correspondência é verificar a relação entre objetos e um conjunto de atributos específicos, permitindo a criação de um mapa de dimensões reduzidas a respeito das variáveis (categóricas), facilitando a visualização das associações dos dados tabelados (HAIR *et al.*, 2009; NASCIMENTO *et al.*, 2019). Para facilitar o a relação entre as variáveis e as categorias selecionadas para a AC, pela relação matemática estabelecida entre cruzamento de linhas e colunas, todos os espaços da tabela contidora dos dados devem estar preenchidos, padronizando as contagens de frequência. De acordo com Hair (2009), existem três etapas/passos para chegarmos até os valores que permitem a plotagem do gráfico de relação entre as variáveis. As etapas serão exemplificadas através de uma situação hipotética, mas envolvida com o tema da *Epistemological Letters*, exibindo uma relação de semelhança entre os processos realizados mais adiante neste trabalho. São elas:

- Etapa 1: Calcular o valor esperado de cada célula, que se dá pela razão entre o produto da soma das linhas e colunas pelo valor total geral das variáveis. A Tabela 1 mostra os dados que seriam fornecidos pelo pesquisador e a Tabela 2 mostra o cálculo do valor esperado para cada célula (em vermelho)

Tabela 1: Exemplo⁴ de dados do número de artigos publicados sobre cada uma das categorias da *Epistemological Letters*.

	Teorema de Bell	Filosofia da Teoria Quântica	Relatividade e paradoxo EPR
J. S. Bell	5	2	0
A. Shimony	4	4	1
O.C. de Beauregard	2	1	10
B. d'Espagnat	5	7	2

Tabela 2: Valor esperado de cada célula (total de artigos = 43)

	Teorema de Bell	Filosofia da Teoria Quântica	Relatividade e paradoxo EPR
J. S. Bell	$\frac{7 \cdot 16}{43} = 2,6$	$\frac{7 \cdot 14}{43} = 2,28$	$\frac{7 \cdot 13}{43} = 2,12$
A. Shimony	$\frac{9 \cdot 16}{43} = 3,35$	$\frac{9 \cdot 14}{43} = 2,93$	$\frac{9 \cdot 13}{43} = 2,72$
O.C. de Beauregard	$\frac{13 \cdot 16}{43} = 4,84$	$\frac{13 \cdot 14}{43} = 4,23$	$\frac{13 \cdot 13}{43} = 3,93$
B. d'Espagnat	$\frac{14 \cdot 16}{43} = 5,21$	$\frac{14 \cdot 14}{43} = 4,56$	$\frac{14 \cdot 13}{43} = 4,23$

- Etapa 2: Cálculo da diferença entre frequências esperadas e reais, que podem ser obtidas das tabelas anteriores. Essa diferença é obtida pela frequência esperada diminuída da frequência real/observada, como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3: Diferenças entre frequências esperadas e reais

	Teorema de Bell	Filosofia da Teoria Quântica	Relatividade e paradoxo EPR
J. S. Bell	$2,6 - 5 = -2,4$	$2,28 - 2 = 0,28$	$2,12 - 0 = 2,12$
A. Shimony	$3,35 - 4 = -0,65$	$2,93 - 4 = -1,07$	$2,72 - 1 = 1,72$
O.C. de Beauregard	$4,84 - 2 = 2,84$	$4,23 - 1 = 3,23$	$3,93 - 10 = -6,07$
B. d'Espagnat	$5,21 - 5 = 0,21$	$4,56 - 7 = -2,44$	$4,23 - 2 = 2,23$

⁴ O exemplo serve somente para a compreensão de como os cálculos são realizados. Não são utilizados os mesmos valores da tabela original pois, além de ser mais extensa, necessitou de uma análise numérica devido à grande quantidade de informações a serem tratadas. A tabela original conta com mais categorias e mais autores, pois mais de uma categoria de temas pode aparecer em um artigo.

- Etapa 3: Cálculo do valor do qui-quadrado (χ^2), que é obtido através da razão do quadrado da diferença (calculada na tabela anterior) pela frequência observada. O cálculo do valor do qui-quadrado é exibido na Tabela 4.

Tabela 4: Valor do qui-quadrado para os dados obtidos nas tabelas anteriores

	Teorema de Bell	Filosofia da Teoria Quântica	Relatividade e paradoxo EPR
J. S. Bell	$\frac{(-2,4)^2}{2,6} = \mathbf{2,22}$	$\frac{(0,28)^2}{2,28} = \mathbf{0,03}$	$\frac{(2,12)^2}{2,12} = \mathbf{2,12}$
A. Shimony	$\frac{(-0,65)^2}{3,35} = \mathbf{0,13}$	$\frac{(-1,07)^2}{2,93} = \mathbf{0,39}$	$\frac{(1,72)^2}{2,72} = \mathbf{1,09}$
O.C. de Beauregard	$\frac{(2,84)^2}{4,84} = \mathbf{1,67}$	$\frac{(3,23)^2}{4,23} = \mathbf{2,47}$	$\frac{(-6,07)^2}{3,93} = \mathbf{9,38}$
B. d'Espagnat	$\frac{(0,21)^2}{5,21} = \mathbf{0,01}$	$\frac{(-2,44)^2}{4,56} = \mathbf{1,31}$	$\frac{(2,23)^2}{4,23} = \mathbf{1,18}$

- Etapa 4: Criação da medida de associação. O qui-quadrado torna todos os valores finais positivos, mas os sinais devem ser retomados, inversamente aos fornecidos no cálculo do qui-quadrado, para estabelecer uma relação mais intuitiva. Dessa forma, o valor representa a intensidade da relação e o sinal a correlação ou anticorrelação. Esse ajuste pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5: Medida de associação relacionada ao qui-quadrado (quanto maior o valor, maior a relação associação entre as categorias).

	Teorema de Bell	Filosofia da Teoria Quântica	Relatividade e paradoxo EPR
J. S. Bell	2,22	-0,03	-2,12
A. Shimony	0,13	0,39	-1,09
O.C. de Beauregard	-1,67	-2,47	9,38
B. d'Espagnat	-0,01	1,31	-1,18

É através desses valores que é possível calcular as coordenadas e plotar um mapa perceptual, criado através desses valores de similaridade (HAIR *et al.*, 2009). No caso da utilização de mais de duas variáveis, os cálculos e mapas ficam mais complexos, sendo necessário o uso de Análise de Correspondência Múltipla (ACM). Os dados iniciais (valores observados) colocados na tabela (para estabelecer relação de variáveis e frequências) são fundamentais para o desenvolvimento dos cálculos posteriores. Outro valor importante retirado das tabelas é o resíduo padronizado (NASCIMENTO *et al.*, 2019), que é a raiz quadrada do valor obtido no qui-quadrado,

pois permite observar quanto a variável observada se afastou da frequência observada.

O mapa resultante dos cálculos anteriores, para a Análise de Correspondência, apresenta uma distribuição das variáveis destacadas nas tabelas que passam pela análise. Pode-se imaginar uma reta ligando a origem e cada uma das variáveis, sendo que o quanto maior o cosseno entre os ângulos, maior é a associação entre os segmentos (NASCIMENTO *et al.*, 2019). Relembrando que o valor do cosseno aumenta quanto menor o ângulo entre as variáveis, sendo que: ângulo 0 significa correspondência máxima entre as variáveis, ângulos maiores que 90° significa antiassociação entre as variáveis e o ângulo de 180° representa oposição máxima. Por vezes, segmentos muito pequenos (pouca distância da origem) são gerados no gráfico. Estes segmentos curtos podem conter uma relativa quantidade de erro.

5 VISÃO GERAL SOBRE A EPISTEMOLOGICAL LETTERS

A escolha da *Epistemological Letters* foi baseada nos aspectos indicados no referencial sobre a TAR, o periódico foi escolhido após a identificação de uma controvérsia muito interessante a respeito da Teoria Quântica. A incerteza que Latour define como tendo relação com os grupos permitiu que nenhum grupo de análise fosse pré-estabelecido. Os autores mencionados surgiram somente após a análise feita a respeito do periódico e dos temas trabalhados. De acordo com a TAR, o período em que a *Epistemological Letters* surge é de desenvolvimento de uma controvérsia, pois a opinião de um porta-voz da Teoria Quântica ou da Física em si, como Bohr (nas críticas a complementaridade) ou Einstein (na crítica sobre a completude da TQ e a questão da realidade no mundo quântico), é criticada ou posta em análise novamente.

A *Epistemological Letters* foi um periódico criado no ano de 1973 e perseverou até o final dos anos 1984, contendo 36 edições distribuídas nesse período de tempo entre um pouco mais de 200 integrantes. A distribuição era limitada somente às pessoas que eram permitidas de acordo com os organizadores e editores da revista, François Bonsack e Abner Shimony. A revista, até 2019, tinha acesso limitado aos participantes do periódico e a pessoas que compraram ou adquiriram-nas dos antigos participantes. Além disso, era possível encontrar em alguns sites de busca de produtos (estrangeiros), algumas edições da revista para venda, por preços relativamente altos. Essa situação se modificou em 2019, quando Don Howard e Sebastian Murgueitio Ramírez disponibilizaram as 36 edições digitalizadas, no repositório da Universidade de Notre Dame (curate.nd.edu).

Em uma tarefa da Universidade, Sebastian Murgueitio tinha que encontrar um artigo “esquecido” para apresentar e discutir em uma aula de História da Ciência. Já sabendo da existência da *Epistemological Letters* porém, sem conseguir encontrar nenhuma edição, pediu ajuda ao professor de Filosofia Don Howard, que realizou seu doutorado na década de 1970 e estudou junto com Abner Shimony, na Universidade de Boston (Notre Dame University, 2019). E então passou a assinar o periódico desde a segunda edição. Então após a solicitação de ajuda, verificou que em uma estante do seu porão haviam 35 edições da revista, faltando somente a primeira edição. Um apelo a mídia foi feito em busca da primeira edição, o qual obteve resultado positivo, recebendo uma cópia de Howard Stein, amigo de Shimony. Então após um processo que durou cerca de 18 meses, Sebastian M. Ramírez conseguiu digitalizar, em seu

tempo livre, as 36 edições e as disponibilizou no CurateND, uma biblioteca virtual que preserva livro e matérias escritas. Após isso, as 36 edições (físicas) da revista foram doadas para a Universidade de Notre Dame, onde permanecem então em ambiente controlado, para que sejam conservadas.

O intuito da criação da *Epistemological Letters* não era o de se esconder e ser um periódico restrito, mas foi uma saída devido as discussões presentes na época. O momento em que a revista surgiu era crítico, pois a Teoria Quântica estava em pleno desenvolvimento de uma controvérsia, e opiniões adversas poderiam modificar o destino dos envolvidos. Muitas publicações em periódicos formais eram realizadas primeiramente na *Epistemological Letters*, local onde o espaço de debate permitia uma discussão sobre o tema, onde podiam ser dadas respostas e contra-argumentos à temática escolhida. O ponto de vista adotado pela teoria de Latour (1984, 2012) permitiu que analisássemos de forma igualitária os aspectos envolvidos na controvérsia pois, como poderá ser observado na sequência, consideramos aspectos naturais, sociais e a própria relação do discurso entre esses dois meios. Juntamente da lente da historiografia, a TAR possibilitou que verificássemos a importância da cultura material (uma relação com os não-humanos) para o desenvolvimento de uma controvérsia, retomando o argumento de Lightman (2016) de que para conhecermos o desenvolvimento da ciência em um período da história, precisamos estudar as atividades desenvolvidas de forma “marginal”.

O periódico permaneceu durante toda sua duração de maneira informal e como um meio “não oficial” de divulgação dos debates sobre os fundamentos da TQ, sendo o acesso restrito aos participantes, que em geral eram: Físicos, Filósofos, Matemáticos e estudiosos de áreas afins. Os temas envolvendo os fundamentos da Teoria Quântica não eram facilmente permitidos em periódicos da época, o próprio *Physical Review* não aceitava publicações relacionadas a essa temática.

5.1 TEOREMA DE BELL⁵

A introdução do artigo escrito por Bell permite identificarmos quais as noções iniciais do autor quanto ao contexto da Teoria Quântica na época, sendo que nessa breve introdução consta que

O paradoxo de Einstein, Podolsky e Rosen foi apresentado como um argumento de que a mecânica quântica não poderia ser uma teoria completa, mas deveria ser complementada por variáveis adicionais. Essas variáveis adicionais deveriam restaurar a teoria de causalidade e localidade. Nesta nota essa ideia será formulada matematicamente e se mostrará incompatível com as previsões estatísticas da mecânica quântica. É a exigência de localidade, ou mais precisamente que o resultado de uma medição em um sistema não seja afetado por operações em um sistema distante com o qual interagiu no passado, que cria a dificuldade essencial. Houve tentativas de mostrar que, mesmo sem tal exigência de separabilidade ou localidade, nenhuma interpretação de "variável oculta" da mecânica quântica é possível. Essas tentativas foram examinadas em outro lugar e consideradas insuficientes. Além disso, uma interpretação de variável oculta da teoria quântica elementar foi explicitamente construída. Essa interpretação particular tem, de fato, uma estrutura grosseiramente não-local. Isso é característico, de acordo com o resultado a ser provado aqui, de qualquer teoria que reproduza exatamente as previsões da mecânica quântica. (BELL, 1964, p. 195)

Tendo isto, é possível analisarmos a grande influência de Von Neumann (1932) na Teoria Quântica, pois seu argumento no livro "*Mathematische Grundlagen der Quanten-mechanik*", até então, era considerado como uma prova de impossibilidade de que novas variáveis fossem adicionadas a TQ. Além disso, Bell afirma ter percebido uma estrutura "grosseiramente" não-local já na Teoria de Variáveis Ocultas de David Bohm (1952b, 1952a), o que o motivou a escrita deste artigo. Elemento este (não-localidade) que é característico de qualquer teoria que reproduzisse as previsões da Mecânica Quântica. Bell ainda destaca que o grande problema de toda essa situação é que um sistema não possa interferir no outro, o que é descrito como "localidade". Toda essa questão envolvendo os fundamentos, apesar de muita importância para as discussões posteriores, acabou não tendo uma devida atenção na época de sua elaboração. Essa retomada de discussões sobre algo já "concluído" não era visto como um trabalho que envolvesse realmente física, chegando a ser considerado "metafísica" (FREIRE JR., 2015), o que inclusive fez com que muitos físicos envolvidos nesse debate tivessem dificuldade em suas vidas profissionais. Por isso o destaque à discussão que Bell iniciou com a demonstração de sua desigualdade, o que mostrou

⁵ Essa seção é um trecho retirado do artigo sobre o Teorema de Bell, que pode ser lido na íntegra no anexo B.

que não somente a interpretação, mas a forma como entendemos e estudamos a Teoria Quântica, poderia ser reconsiderada.

O experimento que John S. Bell descreve em seu artigo é feito com a suposição de uma medição realizada por aparatos Stern-Gerlach, no qual o estado utilizado é o singleto. Retomando o estado singleto, mais especificamente a equação que o define, ao medirmos o *spin* de uma das partículas correlacionadas, por consequência saberemos o resultado da outra. O estado sendo dado por

$$|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_2 - \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_2$$

se uma medição nos revela “*spin up*” para a partícula 1 (ou valor +1 no artigo de Bell), o estado acima se reduz para $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_2$, que por consequência fornece o resultado de “*spin down*” para a partícula 2 (ou, valor -1) e vice-versa. Para mostrar que o resultado obtido utilizando “variáveis ocultas” se difere do resultado esperado de acordo com a Teoria Quântica usual, Bell adiciona ao experimento as variáveis ocultas representadas por “ λ ”. De forma que as medições A e B dependam somente das direções \vec{a} e \vec{b} , respectivamente, e da suposta variável oculta λ .

Uma representação do esquema imaginado por Bell é dado na Figura 1.

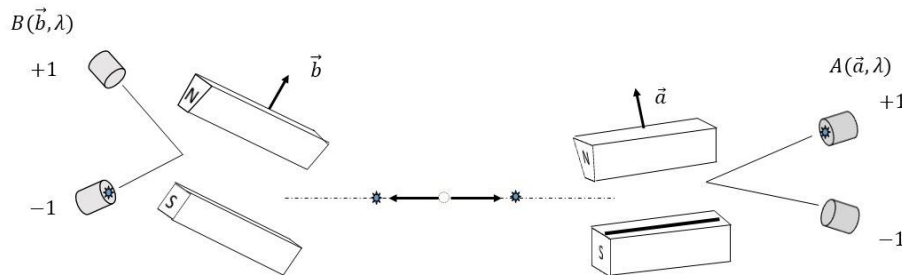


Figura 1: Experimento sugerido por Bell, no qual os aparatos Stern-Gerlach estão distantes um do outro a ponto de que a direção do campo magnético de um não interfira no outro. Um aparelho está apontando para uma direção \vec{a} e o outro para uma direção \vec{b} . Adaptado de Pessoa Jr (2004).

As medições realizadas em direções arbitrárias \vec{a} e \vec{b} são denotadas então pelos valores correspondentes a *spin up* e *spin down*, ou +1 e -1 respectivamente. A média dos produtos das medições nas duas direções é representada por $P(\vec{a}, \vec{b})$. Os aparelhos, em uma posição alinhada, vão sempre apresentar resultados opostos, que é a anticorrelação perfeita do estado singleto. Adicionando a suposta variável oculta ou conjunto de variáveis representadas por λ , descreve-se os resultados das duas medidas como $A(a, \lambda)$ e $B(b, \lambda)$. A crítica realizada no paradoxo EPR era em relação

ao caráter não-realista da teoria TQ, que aparece, segundo essa visão, no argumento de que $A(\vec{a}, \lambda)$ e $B(\vec{b}, \lambda)$ deveriam ter valores pré-definidos. O argumento que os autores do EPR utilizaram é o de que esse valor é desconhecido por que faltaria um complemento das informações necessárias da medição com a variável oculta λ , de caráter local, que restauraria o caráter causal da teoria. Algo que incomodava muitos físicos, como Einstein por exemplo, era a concepção probabilística do mundo quântico e a perspectiva de que as informações sobre um determinado aspecto da TQ só pudessem ser dadas no momento da medição (MERMING, 1985).

Ao final do artigo conhecido como paradoxo EPR, fica em aberto a possibilidade de existir uma descrição completa da realidade física na Mecânica Quântica. Em teoria, essa especificação ou descrição mais completa da Mecânica Quântica seria dada por possíveis variáveis ocultas λ . Sendo que λ pode representar uma única variável, um conjunto de variáveis ou, até mesmo, um conjunto de funções (essa variável pode ser discreta ou contínua), o que é indiferente para a representação que seguirá, porém Bell escolhe considerá-la um único parâmetro contínuo. Dessa forma, $\rho(\lambda)$ representa a distribuição de probabilidade, ou seja, os possíveis valores de λ e suas probabilidades de ocorrência.

Temos, do experimento imaginado por Bell, que o resultado obtido pela medida a partir de um observador A da medição $\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a}$ é determinada por \vec{a} e λ , assim como para B a medição de $\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{b}$ é determinada por \vec{b} e λ . Sendo λ a representação das variáveis ocultas, não previstas na Teoria Quântica. De forma que:

$$A(\vec{a}, \lambda) = \pm 1$$

$$B(\vec{b}, \lambda) = \pm 1$$

O resultado de B não depende de \vec{a} e nem A depende de \vec{b} . Se $\rho(\lambda)$ é a distribuição de probabilidade de (λ) , então o valor esperado do produto de dois componentes é:

$$P(\vec{a}, \vec{b}) = \int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{a}, \lambda) B(\vec{b}, \lambda)$$

Sendo $\rho(\lambda)$ a distribuição de probabilidade normalizada, tem-se

$$\int d\lambda \rho(\lambda) = 1$$

E, devido as relações em que as medidas de A e B podem ser ± 1 , a equação de $P(\vec{a}, \vec{b})$, acima, não pode admitir valores menores que -1 , mas sendo possível obter esse valor quando $\vec{a} = \vec{b}$. Se

$$A(\vec{a}, \lambda) = -B(\vec{a}, \lambda) \quad e \quad B(\vec{b}, \lambda) = -A(\vec{b}, \lambda)$$

Então, fazendo essa substituição na equação de $P(\vec{a}, \vec{b})$, tem-se que

$$P(\vec{a}, \vec{b}) = \int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{a}, \lambda) [-A(\vec{b}, \lambda)]$$

$$P(\vec{a}, \vec{b}) = -\int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda)$$

Incluindo agora um vetor unitário \vec{c} , representando a medida em uma outra direção arbitrária, com o mesmo procedimento usado para obter a relação acima, tem-se

$$P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c}) = -\int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) - (-\int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{c}, \lambda))$$

$$P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c}) = -\int d\lambda \rho(\lambda) [A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) - A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{c}, \lambda)]$$

Considerando que $[A(\vec{b}, \lambda)]^2 = 1$, podemos fazer a seguinte inserção:

$$P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c}) = -\int d\lambda \rho(\lambda) [A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) - A(\vec{a}, \lambda) (1) A(\vec{c}, \lambda)]$$

$$P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c}) = -\int d\lambda \rho(\lambda) [A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) - A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) A(\vec{c}, \lambda)]$$

Colocando $A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda)$ em evidência, obtêm-se:

$$P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c}) = -\int d\lambda \rho(\lambda) [1 - A(\vec{b}, \lambda) A(\vec{c}, \lambda)] A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda)$$

De acordo com as relações $A(\vec{a}, \lambda) = \pm 1$ e $B(\vec{b}, \lambda) = \pm 1$, a multiplicação do termo $A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda)$ só pode assumir valores -1 e $+1$, de forma que seus produtos tenham como resultado, ao estarem alinhados, -1 (para os vetores apontando em um mesmo sentido, já que são *spins* contrários) e $+1$ (para sentidos opostos) de forma que o módulo do produto dos dois seja $|A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda)| = 1$. Além disso, a distribuição de probabilidade da função de λ não pode assumir valores negativos, de forma que $\rho(\lambda) \geq 0$ e como o produto $A(\vec{b}, \lambda) A(\vec{c}, \lambda)$ é ± 1 , então o termo entre colchetes será 0 ou 2, para os extremos que podem ser atingidos. Sendo assim o termo fica $[1 - A(\vec{b}, \lambda) A(\vec{c}, \lambda)] \geq 0$. Da mesma maneira, se tomássemos o módulo dos dois lados $|P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c})| = |\int d\lambda \rho(\lambda) [1 - A(\vec{b}, \lambda) A(\vec{c}, \lambda)]|$, teríamos que “o valor absoluto de uma integração inteira deve ser menor ou igual ao valor integrado do valor absoluto

do integrando” (HOGLUND; JACOBSON, 2013, p. 12). De forma que, com as características que acabaram de ser descritas, podemos propor que a igualdade seja representada pela seguinte desigualdade:

$$|P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c})| \leq \int d\lambda \rho(\lambda) [1 - A(\vec{b}, \lambda)A(\vec{c}, \lambda)]$$

Sendo que $-\int d\lambda \rho(\lambda)A(\vec{b}, \lambda)A(\vec{c}, \lambda)$ é a probabilidade $P(\vec{b}, \vec{c})$, temos então

$$|P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c})| \leq 1 + P(\vec{b}, \vec{c})$$

A expressão acima é a famosa desigualdade de Bell, na mesma forma a qual foi apresentada em seu artigo de 1964. Dada essa desigualdade, é simples mostrar que a previsão da Teoria Quântica é incompatível (GRIFFTIHS, 2005), basta imaginarmos que os três vetores estejam em um mesmo plano e que \vec{c} faça um ângulo de 45° com \vec{a} e \vec{b} , tendo assim

$$P(\vec{a}, \vec{b}) = 0, \quad P(\vec{a}, \vec{c}) = P(\vec{b}, \vec{c}) = -0,707$$

de forma que a desigualdade assuma os valores

$$|-0,707| \leq 1 + (-0,707)$$

$$0,707 \leq 0,294$$

o que claramente viola a desigualdade de Bell.

5.2 CONTEXTO HISTÓRICO DE CRIAÇÃO DA EPISTEMOLOGICAL LETTERS

A *Epistemological Letters* foi criada durante um período de controvérsias em relação aos temas que envolviam os fundamentos da Teoria Quântica. Dentre os temas que geraram mais discussões, dentro e fora da revista, está o artigo de John S. Bell (1964), no qual desenvolve a desigualdade que levará seu nome, a desigualdade de Bell. Esse teorema permitiu identificar um aspecto da Teoria Quântica (não-localidade) e ao mesmo tempo fornecer uma resposta ao artigo de Einstein, Podolsky e Rosen, como será comentado ao longo dessa seção.

A adesão quase unanime dos físicos a chamada interpretação da Complementaridade, de Niels Bohr, após a conferência de Solvay em 1927, trouxe a estabilidade do pensamento na Teoria Quântica para alguns físicos ao mesmo tempo em que causou inquietação em outros. Para, de certa forma, reforçar ainda mais a hegemonia da teoria da interpretação da Complementaridade, Von Neumann (1932),

em seu livro denominado “*Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*”, no qual organizou uma visão axiomática da T.Q., estabeleceu uma “prova” que destacava a impossibilidade de inclusão de novas variáveis ocultas à Teoria Quântica. Esse fato, para muitos físicos, acabou elevando a hegemonia da interpretação da Complementaridade, ao ponto que dificultava a criação de teorias alternativas (FREIRE JR., 2003). Nessa época, as publicações e aceitações de trabalhos eram considerados aspectos que fortaleciam a consolidação de uma carreira científica (LIGHTMAN, 2016), o que por vezes podia intimidar alguns físicos, fazendo com que não crissem teorias que conflitassem com o que já estava estabelecido, para que suas carreiras não fossem prejudicadas.

Porém, como destacado anteriormente, alguns físicos ficaram insatisfeitos com algumas explicações ou considerações da Teoria Quântica estabelecida até então. Pode-se destacar isso com o exemplo de Schrödinger (1935), ao abordar alguns pontos que fariam parte da controvérsia alguns anos depois (problemas de medição e relação entre quântico e o clássico). Um outro exemplo, é o artigo publicado por Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen (1935)⁶, conhecido como paradoxo EPR, que questionava a visão, até então hegemônica, da interpretação da Complementaridade, concluindo que a Mecânica Quântica é, na verdade, incompleta. Dentre as críticas, está o questionamento feito à realização de uma medição em uma parte do sistema afetar outra parte, independente da distância entre as partículas, contrariando um dos princípios da relatividade especial, sendo necessária uma transmissão de informação supra luminal entre as partículas do sistema. Esse efeito foi chamado por Einstein, em uma correspondência com Born (BORN, 1971), de “ação fantasmagórica a distância” e foi um dos argumentos do autor quanto à consideração da Mecânica Quântica ser incompleta. O questionamento do paradoxo EPR foi direcionado à realidade e à localidade nas medições da Mecânica Quântica, possibilitando uma solução para esse paradoxo somente com adição de “Variáveis Ocultas”, apesar dessa possibilidade não ser defendida por Einstein.

Devido à força e adesão à interpretação da Complementaridade, todos os temas que retomavam discussões relacionadas aos fundamentos da Teoria Quântica eram tratados como metafísica, para que o *status* da Complementaridade fosse

⁶ Ao longo do mestrado, realizamos uma discussão mais aprofundada sobre o argumento EPR e uma reconstrução didática do artigo – o que resultou em um artigo publicado na Revista Enseñanza de la Física (WAGNER *et al.*, 2021), Apêndice A.

mantido. Após a Segunda Guerra Mundial, que ocasionou o crescimento da busca por cursos de Física, o pragmatismo e o lema adotado “cale a boca e calcule” (JOHANSSON *et al.*, 2018) fizeram com que os periódicos publicassem cada vez menos sobre os fundamentos da Teoria Quântica (RAMIREZ, 2022). Era difícil para um Físico, no contexto pós Segunda Guerra, trabalhar em questões dos fundamentos da Teoria Quântica em contextos mais formais das universidades e centros de estudo, mais especificamente as questões interpretativas. Kaiser (2011) exemplifica a afirmação anterior com o caso de Elizabeth Rauscher, Nick Herbert, George Weissmann e de John Clauser, que tiveram que recorrer à discussões em torno desse tema por meios informais. Por volta de 1950, Bell enfrentava todas essas barreiras, além de estar tomando um caminho diferente de David Bohm quanto à teoria das Variáveis Ocultas. Estudos relacionados aos fundamentos eram mal vistos e não incentivados pelos professores, que chegavam a criticar os alunos que buscavam explicações nesse meio, devido à fuga dos assuntos “realmente direcionados a Física”.

Latour (2012) explica que o objetivo de um Global é o de oportunizar que vários locais possam interagir, o que ele caracteriza como global mais. Porém, na época, os periódicos oficiais faziam o papel do que o autor chamou de global menos. Isso fez com que um "local" específico (como a complementaridade) acabasse criando uma hegemonia sobre outros locais, de certa forma dificultando o desenvolvimento deles. Dessa forma, destaca-se também a incerteza que Latour define como tendo relação com as ações (a ação é assumida). Essa hegemonia de um local que conseguiu se sobrepor aos outros provavelmente foi ocasionado por opiniões ou ações assumidas por físicos de grande influência. Fato que ocasionou a consolidação de uma rede de grande influência sobre a temática que envolvia os fundamentos da Teoria Quântica.

Os artigos de David Bohm (1952a, 1952b) sugerindo uma possível interpretação alternativa à ortodoxa, em termo de “Variáveis Ocultas”, pretendiam restaurar o determinismo da Teoria Quântica, com uma descrição de trajetória bem estabelecida para as partículas. A tese de Everett III (1957), criou um grande problema na interpretação da Complementaridade, tentando usar MQ para descrever todo universo, unificando-a à gravitação. Esse trabalho apontava para uma direção onde nem a complementaridade poderia ser aplicada, algo que deixou muito físicos adeptos a ela com desconfiança (FREIRE JR., 2003). Wheeler, orientador de Everett, endossava a doutrina de Bohr e, apesar de considerar as ideias Everett muito

interessantes, acabou, para obter a aprovação de Bohr, interferindo em alguns aspectos da tese, modificando alguns pontos contidos nela. O que gerou as versões longa e curta da tese de Everett.

Os artigos publicados por David Bohm em 1952 fizeram com que John S. Bell voltasse seus estudos para os fundamentos da Teoria Quântica, sendo o fator que o levou a construir a estrutura do seu teorema. Quando se aprofundou na teoria explicada por Bohm, Bell pediu ajuda à um colega alemão para compreender o que o artigo abordava, pois o artigo não estava em inglês (FREIRE JR., 2015). Em 1963, em uma licença do CERN, Bell trabalhou em seu teorema, buscando verificar os axiomas de Von Neumann. Antes disso, ficou aproximadamente 10 anos sem retomar os estudos sobre o tema das Variáveis Ocultas, sendo que seu último envolvimento com ela foi em uma palestra em Birmingham, sobre o pedido de Peierls (Ibid., 2015). Nessa licença do CERN, ele completou seu primeiro artigo sobre variáveis ocultas e enviou para o *Review of Modern Physics*, onde o artigo sumiu do escritório da revista (misteriosamente) e acabou atrasando a publicação de Bell em 2 anos (KAISER, 2011).

O artigo de Bell⁷ (1964), publicado na revista *Physics Physique Fizika*, não foi recebido com toda a glória esperada pelos editores e nem com a perspectiva que Bell tinha ao seu respeito. A desigualdade de Bell ou Teorema da impossibilidade de teorias de variáveis ocultas locais (TVO) (PESSOA JR., 2004) pôde fornecer uma resposta à crítica feita por Einstein, Podolsky e Rosen em 1935. A desigualdade foi construída com base nas premissas de localidade (impossibilidade de transmissão instantânea de informações) e realismo (regularidade em fenômenos observados são causados por alguma realidade física cuja existência é independente dos observadores humanos). O realismo aparece no argumento de Bell no momento em que adiciona as variáveis ocultas, pois insere a possibilidade de que existam variáveis desconhecidas, até então, que permitiriam prever o resultado de uma medição de forma determinada. Já a localidade é expressa quando Bell tira a dependência que os ímãs têm em relação aos aparelhos espacialmente separados, sendo que um determinado resultado A dependeria somente da direção do Stern-Gerlach próximo e da variável oculta, ficando $A(\vec{a}, \lambda)$ e não $A(\vec{a}, \vec{b}, \lambda)$. A desigualdade derivada por Bell

⁷ Uma discussão mais aprofundada sobre as ideias e conceitos envolvidos no Teorema de Bell podem ser vistos no artigo de autoria original no apêndice B, submetido em abril de 2022.

partindo dessas duas premissas deveria reproduzir o valor esperado para o estado singlete da Teoria Quântica, que é $\langle \sigma_1 \cdot \mathbf{a} \sigma_2 \cdot \mathbf{b} \rangle = -\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = -\cos\theta_{ab}$. Porém Bell mostrou que isso não é possível e que a Teoria Quântica prevê situações em que a desigualdade é violada. Dessa forma, se a desigualdade é violada pela TQ, então ela não pode ser explicada por Teorias realistas locais, mostrando o caráter não-local da Teoria Quântica. Deve-se então abandonar o realismo ou a localidade ou, ainda, os dois.

Com seu artigo denominado “*On the problem of hidden variables in quantum mechanics*”, Bell (1966) fez uma crítica às suposições de Von Neumann (experimentos mentais) sobre a impossibilidade da existência de variáveis ocultas na Mecânica Quântica. Apesar de fazer referência às variáveis ocultas já estudadas por Bohm, Vigier e de Broglie, Bell deu uma nova interpretação à teoria (FREIRE JR., 2003, 2015). Bell, além de contrariar os argumentos de Von Neumann, inserindo a possibilidade de adição de novas variáveis, estas sendo ocultas, à Mecânica Quântica, chamou atenção para o aspecto da não-localidade. Esse último detalhe complicava a teoria de Bell, pois a não-localidade ainda não tinha uma “prova”.

Apesar da hegemonia da interpretação da Complementaridade, obtida através do global, que nesse caso são os periódicos oficiais, haviam outros locais se desenvolvendo, buscando proporcionar novas possibilidades às interpretações da TQ, como Bohm, Everett III e Bell. Os trabalhos de Bell, como o artigo de 1964, conseguiram criar um desconforto na mente de vários físicos da época, justamente por retomar alguns aspectos de algo já "consolidado". Porém, Bell conseguiu mobilizar cada vez mais actantes, mobilizou aliados na *Epistemological Letters*, desenvolveu elementos matemáticos e argumentos físicos e filosóficos que permitiram que seu teorema fosse aumentando a rede sociotécnica. Isso pelo fato da terceira incerteza permitir a compreensão da possibilidade da interferência dos não-humanos nas relações de poder.

A não-localidade do teorema de Bell foi explicada de várias formas, para que no cotidiano essa ideia fosse compreendida. Um exemplo citado por Kaiser (2011) é o de dois irmãos que estão em bares separados por um oceano de distância, um deles em um bar localizado em Cambridge (Massachusetts) e o outro em um bar em Cambridge (Inglaterra). Os dois irmãos entram nos bares ao mesmo tempo, e quando o barman pede se desejam “Cerveja ou Whiskey?” Eles, mesmo tendo igual probabilidade de responderem um ou outro, sempre escolhem o oposto do outro,

mesmo que não exista nenhuma comunicação entre os dois, eles simplesmente sabem o que pedir. O fato de uma partícula medida em um local afetar a medida de outra em lugares totalmente diferentes afetou a forma com que as pessoas encarravam filosoficamente a realidade.

No final dos anos 1960, Bohm e Bub retomaram o tema das variáveis ocultas e estavam construindo um foco diferente do de Bell, no qual conseguiram, com a ajuda do teorema de Siegel e Wiener, estimar um tempo abaixo dos quais apareceriam conflitos com a Mecânica Quântica (FREIRE JR., 2015). Papaliolios ao testar esse tempo e intervalos menores, verificou que a estimativa de Bohm e Bub era insustentável. Nesse mesmo período Clauser encontrou o artigo de Bell, em uma biblioteca, e ficou muito interessado, porém ao questionar seu orientador sobre o assunto, foi logo rejeitado (KAISER, 2011), mas acabou não seguindo o conselho de evitar os fundamentos da Teoria Quântica.

No contexto dos EUA, em 1967, Ronald Reagan foi eleito governador da Califórnia, e como forma de obter alívio fiscal, decidiu cortar investimentos, afetando o emprego dos Físicos na época (KAISER, 2011). Isso fez com que muitos Físicos abandonassem as questões sobre os Fundamentos da Teoria Quântica, pois nenhum laboratório daria espaço para questões consideradas 'metafísicas' e que estivessem mais relacionadas com o caráter filosófico do que com a Física. Desde o ano de 1968, Clauser e Shimony trabalhavam no teorema de Bell, sem que tivessem conhecimento desse estudo simultâneo do tema. No verão de 1968 Shimony recebe ajuda de Michael Horne, que ainda estava na graduação em Física, para projetar um experimento do EPR da forma relacionada ao pensamento de Bohm (FREIRE JR., 2015). Em 1969 Clauser publicou um artigo sugerindo um experimento para o teorema de Bell. Shimony ao tomar conhecimento desse artigo, propôs um trabalho conjunto entre eles, já que ambos buscavam a mesma direção em relação ao teorema de Bell.

Essa situação evidencia o que Lightman (2016) explica sobre o desenvolvimento científico, a dependência de particularidades sobre circunstâncias locais, políticas e pessoais. Questões políticas, filosóficas, locais, pessoais e matemáticas, de forma geral questões sobre a natureza e o social, tornam-se indissociáveis, assim destacando a divisão artificial que Latour (2012) vê entre o natural e o social, a ciência e a política. Esses aspectos se misturam ao longo de todo o desenvolvimento do teorema de Bell e também nos outros episódios de desenvolvimento do conhecimento científico.

O artigo de Clauser, Horne, Shimony e Holt, publicado em 1969 permitiu que o teorema de Bell, com as devidas adaptações, fosse finalmente para os laboratórios (Ibid.), o que contribuiu para a aceitação das discussões sobre as questões relacionadas aos fundamentos da TQ, já que no contexto em questão, grande parte dos Físicos ainda adotavam ideais empírico-indutivistas. O artigo de Clauser, Horne, Shimony e Holt, publicado em 1969, logo chamou a atenção de vários Físicos, justamente por dar um caráter experimental ao teorema de Bell. Em 1970, Franco Selleri propôs uma escola de verão, em Varenna, para que fossem debatidos temas relacionados aos Fundamentos da Teoria Quântica, além de apresentar um programa de pesquisa para reformar esses fundamentos, no qual houvesse repartição igual entre Física, Filosofia e o Social. Então em 1970, d’Espagnat convidou Shimony para dar uma palestra sobre Teoria Quântica na escola de verão em Varenna, local onde vários Físicos que estudavam as questões interpretativas e relacionadas aos fundamentos da TQ puderam se conhecer e compartilhar expectativas, contando com 84 participantes (FREIRE JR., 2015). Abaixo, no Quadro 1, é possível observar as palestras e palestrantes que participaram do evento.

Quadro 1: Ciclo de palestras realizadas durante a escola de Varenna, em 1970, com os respectivos autores. Traduzido de “Quantum Dissidents: Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950-1990)” (FREIRE JR, 2015)

Palestrantes	Tema/palestra
E. Wigner	O assunto de nossas discussões
J. M. Jauch	Fundamentos da Mecânica Quântica
H. Stein e A. Shimony	Limitações nas medições
M. M. Yanase	Aparelho de medição ideal
B. d’Espagnat	Medição e não separabilidade (revisão resumida)
G. M. Proserpi	Física macroscópica e a medição na Mecânica Quântica
J. Kalckar	Problemas de mensurabilidade na Mecânica Quântica de Campos
J. S. Bell	Introdução à questão da Variável Oculta
A. Shimony	Teste experimental de Variáveis Ocultas Locais
L. Kasday	Teste experimental de previsões quântica para fótons largamente separados
B. S. De Witt	A interpretação de Muitos-Universos da Mecânica Quântica
H. D. Zeh	Sobre a irreversibilidade do tempo e da observação na Teoria Quântica

G. Ludwig	O processo de medição e uma base axiomática da Mecânica Quântica
F. Herbut e M. Vujicic	Um novo desenvolvimento na descrição de correlações entre dois sistemas quânticos
A. Frenkel	Regras de superseleção e simetrias internas
K. E. Hellwig	Processo de medição e leis de conservação de aditivos
L. de Broglie	A interpretação da Mecânica Ondulatória pela teoria da dupla solução
J. Andrade e Silva	Uma formulação causal da medição na Teoria Quântica
F. Selleri	Realismo e a função de onda na Mecânica Quântica
H. Neumann	Notas do seminário
D. Bohm	A Teoria Quântica como indicação de uma nova ordem na Física
A. Shimony	Comentários filosóficos sobre a Mecânica Quântica

Então, nesse período existiam alguns grupos estudando a teoria das variáveis ocultas. Eram grupos formados em torno de David Bohm, Vigier e de Broglie e, por fim, Franco Selleri (KAISER, 2011). Os membros desses grupos, agora, se conheciam e trocavam ideias sobre seus estudos e resultados obtidos no assunto. Em 1970, Edward Fry e seu aluno da graduação realizaram um experimento tentando demonstrar o teorema de Bell, utilizando mais tecnologia, e os resultados apontaram novamente para a violação da desigualdade de Bell (FREIRE JR., 2015). Clauser em uma carta à Bell, sugeriu um experimento com a correlação de polarização de fótons de uma cascata de decaimento atômico e em 1972 revelou seus resultados experimentais, que acabaram confirmando, também, as previsões da Mecânica Quântica.

Nessa época os aliados do tema das variáveis ocultas (locais) e das questões relacionadas aos fundamentos da TQ encontravam problemas, pois por volta de 1970 as revistas começaram a se mostrar menos dispostas a publicarem sobre os fundamentos da Teoria Quântica, sendo até mesmo uma ordem do editor da *Physical Review*, que não permitia que temas relacionados a esse assunto fossem aceitos na revista (KAISER, 2011). Muitos Físicos tentaram buscar então outros periódicos para publicarem seus trabalhos, como o “*Nuovo Cimento*” ou o “*Foundations of Physics*”, mas a maioria dos artigos importantes acabaram aderindo a meios mais informais, como o simpósio escrito, *Epistemological Letters*, que se iniciou em 1973.

Em 1971 Bell, tentando defender seu teorema, provou que ele não se restringia a teorias determinísticas, argumento desenvolvido mais ainda por Clauser e Horne em

1974. Horne e Clauser mostraram ainda que “os dados experimentais disponíveis também falsificavam teorias locais estocásticas” (FREIRE JR., 2015, p. 265, *tradução nossa*). Durante os anos de 1974 até 1978 ocorreu uma controvérsia em torno do tema das variáveis ocultas, sendo defendida de um lado por Bell e Shimony e atacada de outro por de Broglie e Lochak (FREIRE JR., 2015). Um debate que se estendeu até a *Epistemological Letters*. Alain Aspect, voltando de sua estadia em Camarões, foi contratado no ENSET, onde permitiram que trabalhasse com um tema do seu interesse. Ao entrar em contato com Christina Imbert, recebeu alguns documentos, dentre os quais estava o artigo de Bell, e propôs um experimento no qual os polarizadores girassem no ar (Ibid.).

Em 1975 Aspect viajou para o CERN em Genebra e ao se encontrar com Bell contou sobre o experimento que tentaria realizar, obtendo como resposta, de Bell, que esse experimento melhoraria os dados e estudos anteriores sobre o tema da desigualdade de Bell (BAGGOTT, 2011). No ano seguinte, Aspect publicou em detalhes, na *Physical Review* como era a proposta do seu experimento, o qual levou aproximadamente 5 anos para ser realizado na prática. Nesse mesmo ano, nos EUA, foi criado um grupo no qual ocorriam debates relacionados temas marginais às pesquisas acadêmicas na época, para a Física, o denominado *Fysics Group* (KAISER, 2011). Criado por Elizabeth Rauscher e George Weissmann e contando com a participação de Clauser, o *Fysics Group* reunia várias pessoas para debates sobre temas que não eram permitidos dentro das instituições as quais trabalhavam.

Em 1976 foi realizado um encontro em Erice, organizado por d’Espagnat e que conseguiu reunir 36 participantes de 25 laboratórios diferentes, todos debatendo sobre o teorema de Bell. E, finalmente, entre os anos de 1981 e 1982 os resultados tão esperados do experimento realizado por Alain Aspect saíram, o experimento se mostrou favorável à Teoria Quântica, violando a desigualdade de Bell. Esse experimento além de aumentar a reputação de Aspect, fez com que muitos estudiosos das questões relacionadas às implicações do Teorema de Bell tomassem o experimento como definitivo para a questão da não-localidade da TQ. Então em 1984, após discussões sobre o experimento de Aspect, o periódico *Epistemological Letters* acabou se encerrando. Desde a apresentação da desigualdade de Bell, muitos experimentos foram realizados e se mostraram favoráveis à T.Q e inconsistentes com as teorias realistas locais (ASPECT, A.; GRANGIER; ROGER, 1982; ASPECT, Alain; DALIBARD; ROGER, 1982; CLAUSER; SHIMONY, 1978; FREEDMAN; CLAUSER,

1972; FRY; THOMPSON, 1976; KWAIT *et al.*, 1995; OU; MANDEL, 1988; SHIH; ALLEY, 1988; TAPSTER; RARITY; OWENS, 1994; TITTEL *et al.*, 1998; WEIHS *et al.*, 1998).

5.3 AUSPÍCIOS E ORGANIZAÇÃO

A *Epistemological Letters*, devido aos fatores já citados anteriormente, assim como os possíveis autores que estudavam fundamentos da Teoria Quântica, tinha a possibilidade de não obter sucesso, devido às pressões que o tema sofria. Mas, felizmente, desde o início recebeu apoio do Institut de la Méthode, da Associação Ferdinand Gonseth. As 36 edições do periódico, também denominado simpósio escrito sobre variáveis ocultas e incerteza quântica, foram organizadas pelo secretário do Institut de la Méthode, François Bonsack, e também receberam auxílio do Físico e Filósofo Abner Shimony.

Ferdinand Gonseth era Matemático e Filósofo da Ciência, foi professor no ETH em Zurique e co-fundador da revista *Dialectica*, a qual organizava temas em torno da filosofia. Escolheu a matemática por uma questão física, sua visão, devido a miopia decidiu escolher, dentro da área da Ciência, uma área que não necessitasse uma boa visão, pois não poderia usar lupas nem microscópios ou outros aparatos com esse intuito. Gonseth sempre manifestou seu interesse por criar um centro de estudos onde pudesse ser aplicada a sua filosofia (RAMIREZ, 2022), mais aberta e que possibilitasse interações entre vários temas, desejo que logo foi atendido, sendo criada a Associação Ferdinand Gonseth. O objetivo da instituição privada era o de fortalecer o diálogo entre filosofia e ciência (Ibid.), algo que já vinha sendo influenciado por Gonseth.

A Associação, para as publicações da *Epistemological Letters*, teve contribuições de Bonsack e Shimony, sendo Shimony e seu ajudante da graduação M. Horne os autores da primeira edição do periódico, contextualizando teorias e acontecimentos precedentes e explicando as suas interpretações das variáveis ocultas e as relações com os fundamentos da Teoria Quântica. Tanto Bonsack quanto Shimony tinham doutorado em Filosofia, e Shimony ainda contava com um segundo doutorado, dessa vez em Física, o qual foi orientado por Wigner (FREIRE JR., 2015), então já tinha um forte contato com os fundamentos da Teoria Quântica. Um dos

possíveis sucessos e influência da Associação Ferdinand Gonseth se dava pela sua localização:

De acordo com algumas informações, no início dos anos 1970, o triângulo formado por Paris, Genebra e Zurique tinha a concentração mais densa do mundo em físicos trabalhando nos fundamentos da Física. Bienne e a Associação Ferdinand Gonseth estão no centro dessa região. (RAMIREZ, 2022, p. 765, tradução nossa)

A fundação que permanece com o legado do matemático e filósofo Ferdinand Gonseth deu auspícios para a *Epistemological Letters* até o final do periódico em 1984, e foi um dos eventos realizados pela instituição que mais deram trabalho, o próprio Gonseth se interessava pelos fundamentos da Teoria Quântica. Abner Shimony foi um dos responsáveis pelo grande sucesso do periódico, pois tendo Doutorado e Filosofia e Física, podia facilmente mediar os dois temas e organizar os debates internos, além da positiva reputação que tinha na época, o que provavelmente ajudou na busca por integrantes do periódico (RAMIREZ, 2022)

5.4 A ESTABILIZAÇÃO DO TEOREMA DE BELL NA *EPISTEMOLOGICAL LETTERS*

O contexto no qual a *Epistemological Letters* estava inserida mostra a relação descrita por Latour (2012) na quarta incerteza, sobre questões de fato e questões de interesse. Realmente é perceptível que não podemos reduzir questões de fato ao que é científico/natural e as questões de interesse ao que é político/social, pois esses dois aspectos têm dependência mútua. O emprego que depende dos ideais defendidos, a política que limitou orçamento, a dificuldade de publicação de artigos com temas considerados marginais, isso destaca a artificialidade da dicotomia de escolha entre esses dois elementos.

A *Epistemological Letters*, como já mencionado em situações anteriores, contou com um total de 36 edições, distribuídas entre novembro de 1973 e outubro de 1984. As 36 edições tiveram 199 títulos e artigos, sendo distribuídas para mais de 200 participantes, dos quais, somente 62 tiveram contribuições na forma de artigos ou comentários escritos. Entre os 62 autores, foram identificados os nomes e instituições

de 55 dos autores, o que permitiu termos uma noção de quantas localidades ou universidades influenciavam a pesquisa em torno do Teorema de Bell. Foram identificadas 36 instituições ou centros de pesquisa direcionados aos estudos dos fundamentos da Teoria Quântica, além de um dos integrantes que estava aposentado na época, Karl Popper. Dos 36 locais de pesquisa, os que continham maior concentração dos autores do periódico eram Universidade de Paris (4), Instituto Henri Poincaré (5), Universidade Nacional Autônoma do México (3), Universidade de Bari (3), Universidade de Reims (3). Além disso podemos destacar Bell, no C.E.R.N., local do qual tirou uma licença e produziu então o famoso teorema que carrega seu nome, Bonsack, que era secretário do Institut de la Méthode e professor na Universidade de Neuchâtel e Shimony, que trabalhava na Universidade de Boston.

No que se refere ao número de participações nas 36 edições, os maiores contribuintes foram: Bell (4 de 36), Bonsack (20 de 36), Charière (4 de 36), Costa de Beauregard (26 de 36), d'Espagnat (7 de 36), Destouches (5 de 36), Lochak (5 de 36), Moldauer (6 de 36), Mugur-Schachter (5 de 36), Shimony (9 de 36) e Vigier (6 de 36). As demais contribuições podem ser observadas na tabela 6.

Tabela 6: Número de participações de cada autor, em relação às edições do periódico.

AUTORES	PARTICIPAÇÕES NAS 36 EDIÇÕES
Avram	(1/36)
Avramesco	(1/36)
Bedford	(2/36)
Bell	(4/36)
Bonsack	(20/36)
Brody	(2/36)
Canals-Frau	(1/36)
Cantelaube	(1/36)
Cetto	(1/36)
Charrière	(4/36)
Clauser	(1/36)
Cochran	(1/36)
Conte	(2/36)
Cooke	(2/36)
Costa de Beauregard	(26/36)
D'Espagnat	(7/36)
de la Penã	(1/36)

Destouches	(5/36)
Dewney	(1/36)
Draganescu	(1/36)
Drieschner	(1/36)
Dumitru	(2/36)
Escudié	(1/36)
Evrard	(1/36)
Fraissé	(1/36)
Galles	(1/36)
Garuccio	(3/36)
Guggenheimer	(3/36)
Hadjisavvas	(2/36)
Hilgevoord	(2/36)
Hodgson	(1/36)
Hoffmann	(1/36)
Horne	(3/36)
Huguenin	(3/36)
Hussain	(1/36)
J. Andrade e Silva	(1/36)
Jochim	(1/36)
Kyprianidis	(1/36)
Lochak	(5/36)
M. Andrade e Silva	(1/36)
Malcor	(4/36)
Mattuck	(1/36)
Mayants	(1/36)
Michel	(3/36)
Moldauer	(6/36)
Mugur-Schachter	(5/36)
Muynck	(3/36)
Park	(1/36)
Paty	(1/36)
Pavicic	(1/36)
Piron	(1/36)
Popper	(1/36)
Robert	(1/36)
Scott	(1/36)
Selleri	(3/36)
Shimony	(9/36)

Stapp	(2/36)
Tarozzi	(2/36)
Treder	(3/36)
Vigier	(6/36)
Wang	(2/36)
Zeh	(3/36)

Seguindo o referencial metodológico de Latour (2012), nenhum grupo ou ator foi selecionado previamente, até porque o próprio autor afirma que os grupos contém laços frágeis e estão em constante mudança. Os autores que ganharam importância nesse contexto foram os que tiveram contribuições para a *Epistemological Letters*. Conforme a rede foi se desdobrando, foram aparecendo os temas, autores e as questões envolvidas nela.

Mas o número de participações não reflete totalmente o número de colaborações totais de cada autor, sendo que em alguns casos foram relativamente altas. Os autores que mais contribuíram, em número de artigos totais, contando as múltiplas publicações em uma mesma edição da revista foram geralmente os mais envolvidos com o teorema de Bell e as pesquisas das variáveis ocultas, além das contribuições filosóficas. Destacam-se, em ordem decrescente de maiores contribuições (sendo o mínimo 5) os autores: Costa de Beauregard (40 artigos), Bonsack (29 artigos), Shimony (10 artigos), d’Espagnat e Lochak (8 artigos), Moldauer (7 artigos), Vigier (6 artigos) e Bell, Destouches, Huguenin e Mugur-Schachter (com 5 artigos cada um). As demais contribuições totais estão sintetizadas na Tabela 7, onde os nomes em evidência destacam os autores os quais as informações como nome, cargo e instituição foram encontradas.

Tabela 7: Números de publicações totais de cada autor.

AUTOR	TOTAL DE PARTICIPAÇÕES
Avram	1
Avramesco	1
Bedford	2
Bell	5
Bonsack	29
Brody	2
Canals-Frau	1

Cantelaube	1
Cetto	1
Charrière	4
Clauser	1
Cochran	1
Conte	2
Cooke	2
Costa de Beauregard	40
D'Espagnat	8
de la Penã	1
Destouches	5
Dewney	1
Draganescu	1
Drieschner	1
Dumitru	2
Escudié	1
Evrard	1
Fraissé	1
Galles	1
Garuccio	3
Guggenheimer	3
Hadjisavvas	3
Hilgevoord	2
Hodgson	1
Hoffmann	1
Horne	3
Huguenin	5
Hussain	1
J. Andrade e Silva	1
Jochim	1
Kyprianidis	1
Lochak	8
M. Andrade e Silva	1
Malcor	4
Mattuck	1
Mayants	1
Michel	3
Moldauer	7
Mugur-Schachter	5

Muynck	4
Park	1
Paty	1
Pavicic	1
Piron	3
Popper	1
Robert	1
Scott	2
Selleri	3
Shimony	10
Stapp	3
Tarozzi	2
Treder	3
Vigier	6
Wang	2
Zeh	3

O processo de verificar quais autores tinham mais publicações, publicações mais significativas ou mais citações dentro da *Epistemological Letters*, permitiu identificar os grupos, opiniões defendidas e os porta-vozes que as representavam. As ações eram assumidas pelos autores, os porta-vozes delimitavam as características defendidas pelos grupos e os não-humanos integravam os discursos fortalecendo os argumentos.

As instituições ligadas aos autores que participaram mais ativamente das discussões foram retiradas tanto de algumas edições da *Epistemological Letters* quanto de buscas através da internet. Foi possível perceber, até mesmo por publicações conjuntas, as relações que alguns autores tinham de proximidade, seja por relacionamentos ou convívio nos locais de pesquisa. As publicações que envolviam mais de um autor da mesma instituição permitiam perceber a relação de troca de informações entre os Físicos e o envolvimento com o tema que, mesmo pouco influenciado na época, acabou alterando algumas concepções profundas dos fundamentos da Teoria Quântica. Uma das instituições que concentra um grande número de participações é o do Instituto Henri Poincaré, dos quais participavam Costa de Beauregard, Lochak, Vigier, Dewdney e Kyprianidis. No Quadro 2 pode-se observar as instituições e os autores relacionados, ou os que não foram identificados.

Quadro 2: Autores que participaram das publicações na *Epistemological Letters* e suas respectivas instituições ou vínculos em centros de pesquisa.

Identificação (autor)	Instituição ou vínculo
Cochran	Não Identificado
Constantin de Charrière	Não Identificado
Escudié	Não Identificado
Gino Tarozzi	Não Identificado
Jochim	Não Identificado
René Malcor	Não Identificado
Robert	Não Identificado
Nicolae M. Avram	Professor de Física da Universidade de Timisoara
Abdré Avramesco	Escola Superior Nacional de Mecânica e Microengenharia
Derek Wang	Departamento de Ciências de Construção da Universidade de Natal (Durban)
Donald Bedford	Universidade de Natal (Durban)
John S. Bell	C.E.R.N (Organização Européia para a Pesquisa Nuclear)
François Bonsack	Secretário no Institut de la Méthode & Docente na Universidade Neuchâtel
Philippe Huguenin	Universidade Neuchâtel
Ana María Cetto	Instituto de Física na Universidade Nacional Autônoma do México
Luís de la Penã	Instituto de Física na Universidade Nacional Autônoma do México
Thomas A. Brody	Professor e Pesquisador, no Instituto de Física na Universidade Nacional Autônoma do México
Carlos Delfino Galles	Universidade Pierre e Marie Curie (Paris)
Damien Canals-Frau	Universidade do Sul de Paris (Instituto de Óptica)
Jean Louis Destouches	Universidade de Paris
Yves Cantelaube	U.E.R. de Física na Universidade Paris VII
John Francis Clauser	Divisão de Fusão Magnética do Laboratório Nacional Lawrence Livermore
Augusto Garuccio	Instituto de Física da Universidade de Bari
Elio Conte	Universidade de Bari
Franco Selleri	Instituto de Física da Universidade de Bari
Jan Hilgevoord	Instituto de Física Teórica da Universidade de Amsterdã
Roger M. Cooke	Universidade de Amsterdã
Antonios Kyprianidis	Instituto Henri Poincaré (Laboratório de Física Teórica)
Christopher Dewdney	Instituto Henri Poincaré (Instituto de Física Teórica)
Georges Lochak	Instituto Henri Poincaré
Jean Pierre Vigié	Instituto Henri Poincaré (Laboratório de Física Teórica)
Olivier Costa de Beauregard	Instituto Henri Poincaré

Gheorghe Eugen Draganescu	Professor de Mecânica na Universidade Politécnica de T. Vuia
Henry Pierce Stapp	Instituto Max Planck
Michael Drieschner	Instituto Max Planck
Spiridon Dumitru	Universidade de Brasov (Departamento de Física)
Daniel Evrard	Laboratório de Mecânica Quântica da Universidade de Reims
Mioara Mugur-Schachter	Laboratório de Mecânica Quântica na Universidade de Reims
Nicolas Hadjisavvas	Laboratório de Mecânica Quântica da Universidade de Reims
Roland Fraissé	Departamento de Matemática da Universidade da Provence
Heinrich Guggenheimer	Instituto Politécnico de Nova York
Peter Hodgson	Colégio Corpus Christi (Oxford, Inglaterra)
Banesh Hoffmann	Departamento de Matemática do Colégio Queens na cidade universitária de Nova York
Michael Horne	Departamento de Física do Colégio Stonehill
Faheem Hussain	Departamento de Física da Universidade de Garyounis
João Luís Andrade e Silva	Laboratório de Física da Escola Politécnica de Lisboa
Maria Helena Andrade e Silva	Laboratório de Física da Escola Politécnica de Lisboa
Richard Mattuck	Laboratório de Física na Universidade de Copenhague
Lazar Mayants	Instituto de compostos Elemento-Orgânicos na Academia de Ciência da URSS
Aimé Michel	Colunista científico do France Catholique
Peter Arnold Moldauer	Laboratório Nacional Argonne
Willem Muynck	Departamento de Física Teórica na Universidade de Tecnologia (Eindhoven)
David Park	Williams College
Michael Paty	Centro de Pesquisas Nucleares (Universidade Louis Pasteur)
Mladen Pavicic	Departamento de Ciências de Construção da Universidade de Zagreb
Constantin Piron	Departamento de Física na Universidade de Genebra
Karl Popper	Aposentado
William T. Scott	Departamento de Física da Universidade de Nevada
Abner Shimony	Departamento de Filosofia e Física na Universidade de Boston
Hans-Jurgen Treder	Laboratório Einstein, Caputh (G. D. R.)
Heinz-Dieter Zeh	Instituto de Física Teórica na Universidade de Heidelberg
Bernard d'Espagnat	Laboratório de Física teórica e Partículas Elementares (Orsay)

A tabela na sequência (Tabela 8) permite identificar os autores, em ordem alfabética do sobrenome, com as respectivas edições ao qual publicaram e o número

de artigos gerais publicados durante as 36 edições, além da possibilidade de visualização do número de artigos publicados em uma mesma edição. Geralmente os autores que repetiam artigos em uma mesma edição utilizavam essa repetição como resposta a comentários desenvolvidos por outros autores, gerando uma espécie de diálogo com as argumentações.

Tabela 8: Autores e o número das edições em que apareceram.

Autores	Edições
Avram	35
Avramesco	36
Bedford	26, 33
Bell	7, 9, 15, 20-20
Bonsack	2, 4, 7, 8, 9, 10, 19-19-19, 20-20, 21, 22, 23-23, 24-24, 25-25-25-25, 26-26, 27, 28, 31, 32, 34, 35
Brody	12, 29
Canals-Frau	34
Cantelaube	35
Cetto	12
Charrière	20, 22, 24, 26
Clauser	13
Cochran	2
Conte	29, 31
Cooke	22, 24
Costa de Beauregard	2, 3, 9, 10, 14, 15, 16, 17-17, 18, 19, 20-20-20, 21-21-21-21, 22-22, 23-23-23, 24, 25, 26-26, 27, 28-28, 29, 30-30, 31, 32, 33, 34, 35-35-35
D'Espagnat	10, 11, 17, 18, 19, 22, 29-29
de la Penã	12
Destouches	3, 19, 21, 24, 26
Dewney	36
Draganescu	35
Drieschner	4
Dumitru	15, 18
Escudie	34
Evrard	27
Fraissé	27
Galles	25
Garuccio	24, 26, 30

Guggenheimer	4, 28, 31
Hadjisavvas	24, 35-35
Hilgevoord	22, 26
Hodgson	29
Hoffmann	9
Horne	1, 2, 13
Huguenin	4-4-4, 6, 26
Hussain	23
J. Andrade e Silva	29
Jochim	24
Kyprianidis	36
Lochak	6, 10, 19-19-19, 25-25, 26
M. Andrade e Silva	29
Malcor	3, 11, 12, 22
Mattuck	28
Mayants	16
Michel	30, 31, 33
Moldauer	2, 11, 12, 13, 14-14, 27
Mugur-Schachter	5, 9, 19, 25, 36
Muynck	28, 33-33, 35
Park	4
Paty	6
Pavicic	35
Piron	19-19-19
Popper	30
Robert	32
Scott	4-4
Selleri	21, 24, 27
Shimony	1, 2, 8-8, 13, 18, 19, 20, 25, 26
Stapp	19, 28-28
Tarozzi	21, 26
Treder	2, 34, 35
Vigier	26, 28, 30, 31, 33, 36
Wang	26, 33
Zeh	26, 30, 32

Os temas debatidos dentro da *Epistemological Letters* foram divididos em categorias, para facilitar uma categorização interna do tema. O periódico era praticamente todo direcionado às discussões sobre variáveis ocultas que giravam em

torno do Teorema de Bell e as adaptações da TQ às novas pistas sobre como a Física do “muito pequeno” funcionaria, assim como suas implicações filosóficas, experimentais e conflitantes com as teorias anteriores, como o paradoxo EPR, além de discussões sobre o formalismo nessa nova teoria.

Todos os dados das tabelas e quadros discutidos acima foram compilados em uma tabela do Excel. Essa tabela foi organizada de forma a descrever certas categorias de cada artigo escrito na *Epistemological Letters*. A tabela⁸ continha os dados referentes ao ano que cada artigo foi publicado, o número de artigos em cada edição, os autores de cada artigo, a instituição de cada autor, o tema ou temas (dentro das categorias que criamos) que cada artigo tratava. A tabela foi utilizada para a realização de uma análise de correspondência, gerando mapas perceptuais. Para que fosse realizada a análise de correspondência que gerou o mapa abaixo (Figura 2), selecionamos somente os autores que publicaram mais de cinco artigos no periódico, sendo estes representativos da quantidade total de artigos da revista. Após esse filtro, dos 62 autores, apenas 10 publicaram cinco ou mais artigos, sendo que esses 10 autores foram responsáveis por 120 dos 199 artigos da revista.

Em relação aos temas dos artigos, podemos observar a distribuição que tiveram no mapa perceptual e as suas associações ou antiassociações. É possível observar a antiassociação (que forma praticamente 180°, uma antiassociação quase perfeita) entre os temas referentes ao Teorema de Bell (TB) e Relatividade e Paradoxo EPR (RP) pois, como visto anteriormente, o TB foi de certa forma uma resposta ao artigo de Einstein, Podolsky e Rosen. Isso mostra que, mesmo na *Epistemological Letters*, os temas representavam pólos opostos de discussão. Apesar da categoria RP tratar também de questões de relatividade, pode-se compreender que o fator que mais colocou os dois temas em pontas opostas foi o a relação de conflito entre paradoxo EPR e Teorema de Bell. Em relação ao teorema de Bell, a relação com Variáveis Ocultas (VO) se mostrou um pouco menor que o esperado, mas isso se deve ao fato de, na revista, a relação de variáveis ocultas não ser estabelecida diretamente a Bell, mas sim a Bohm (deixando as relações com Bell, mesmo que poucas vezes, às TVO não-locais). Além disso, o Teorema de Bell trata de algo mais amplo que a relação das variáveis ocultas possivelmente complementarem a TQ, ele se baseia nas discussões sobre realismo e não-localidade da teoria. Em relação a associação

⁸ Posteriormente (como será visto e explicado mais adiante) foram adicionados os valores de citações e menções ao Teorema de Bell, em cada artigo.

relativamente forte entre RP e os Conceitos e Formalismo da Mecânica Quântica (CF), é possível entender que o que aproximou as duas foi o fato da tentativa de unificar a relatividade e a mecânica quântica. Essa unificação entre as duas teorias era algo recente (assim como as duas teorias em si) e o periódico, por permitir discussões variadas e emergentes, acabou sendo um local de debate para que essa relação se fortificasse. Por último, é interessante ressaltar a antiassociação entre Variáveis Ocultas (VO) e Conceitos e formalismo da Mecânica Quântica (CF). Sendo possível relacionar essa antiassociação ao caráter que era dado às variáveis ocultas, a qual se desviava da interpretação hegemônica da MQ. Isso pode explicar o distanciamento entre os dois temas no mapa perceptual.

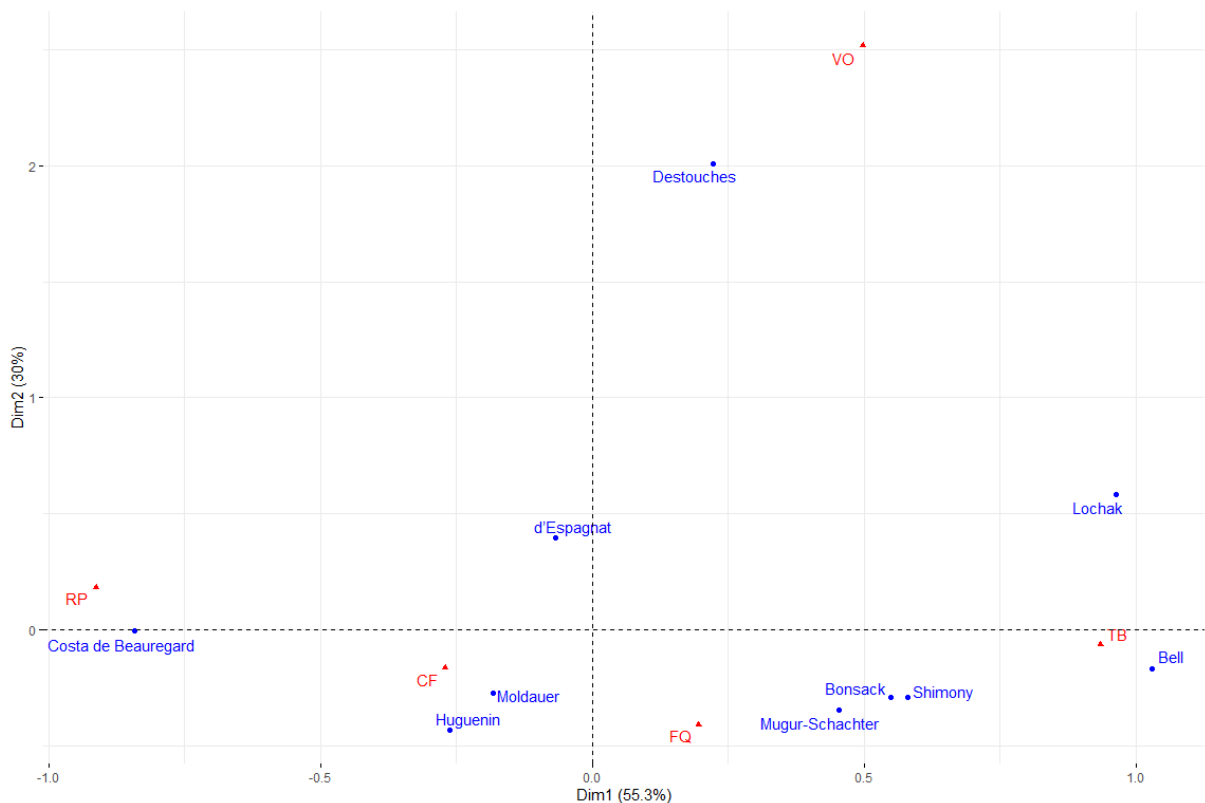


Figura 2: Mapa perceptual criado a partir da análise de correspondência entre os autores e temas da *Epistemological Letters*. Os temas se referem à: Teoria das Variáveis Ocultas (VO), Teorema de Bell e Localidade de Bell (TB), Conceitos e Formalismo da Teoria Quântica (CF), Filosofia da Teoria Quântica (FQ) e Relatividade e Paradoxo EPR (RP). O mapa e as respectivas associações e antiassociações não significam que determinado tema era visto com “rivalidade” em relação aos que estão antiassociados. Significa que determinado ator ou determinado tema falava menos sobre o tema ao qual está antiassociado, não indicando um conflito (apesar desse conflito ser possível), entre os temas.

Em relação aos autores selecionados e os temas observados no mapa, é possível estabelecer fortes conexões entre as variáveis. A mais forte associação, e talvez mais óbvia que podíamos esperar, é entre a categoria TB e John S. Bell, pois isso mostra que os artigos publicados por Bell estavam bem relacionados a proposta

do seu teorema, que foi publicado fora da *Epistemological Letters*. É possível observar, em relação a Bell, as associações com os temas de Filosofia da Teoria Quântica (FQ) e Variáveis Ocultas (VO), assim como a antiassociação (ângulos maiores de 90°) com os temas de Conceitos e Formalismo da Mecânica Quântica (CF) e Relatividade e Paradoxo EPR (RP). No lado esquerdo é possível perceber outra forte associação, desta vez entre Olivier Costa de Beauregard e o tema RP. Essa associação também pode ser considerada um bom indício da distribuição das associações no mapa perceptual, já que (assim como Bell e TB) Costa de Beauregard era um Físico Quântico especializado nas discussões envolvendo a relatividade e chegou a propor sua própria interpretação do paradoxo EPR, condizendo com as discussões internas à revista.

Relacionando ainda os autores e temas, Abner Shimony foi físico e filósofo, com PhD nas duas áreas. Shimony, assim como Clauser, Horne e Holt, defendia e estudava o teorema de Bell, sendo um dos Físicos que conseguiu adaptá-lo para testes em laboratório (experimental). As discussões de Shimony na *Epistemological Letters* se concentraram justamente nesses dois temas, sendo o autor alocado entre TB e a temática de FQ. É importante também verificar o caso de Bernard d’Espagnat, que era físico na área da TQ e filósofo da ciência. D’Espagnat não aparece, de certa forma, fortemente associado à nenhuma categoria em específico, mas apresenta uma antiassociação com Filosofia da Teoria Quântica, o que parece um pouco contraditória. Isso se deve ao fato de que muitos dos textos de d’Espagnat serem respostas à comentários de outros autores, respostas que não necessariamente envolviam filosofia. Essas respostas e comentários realizados em outros temas (apesar de artigos seus estarem classificados também na categoria de Filosofia da Teoria Quântica), acabaram colocando o autor nesse espaço do mapa. Na Figura 3, pode ser observado que, mesmo parecendo ter antiassociação com Filosofia da Teoria Quântica, o autor possui resíduos positivos no que diz respeito à associação desse tema.

As relações e associações obtidas através da análise de correspondência foram baseadas nos dados dos materiais retirados exclusivamente da *Epistemological Letters*, não sendo consideradas as publicações dos autores fora do periódico. As distâncias curtas em relação ao centro, possíveis de serem observadas na Figura 2, são menos precisas que as variáveis com uma maior distância. Apesar dos 10 autores representarem maioria da publicação encontrada no periódico, ainda podem ter

alguns desvios relacionados aos temas, mas abordados ou que foram abordados por mais autores, sendo o mapa uma representação parcial do total de dados obtidos no estudo da revista.

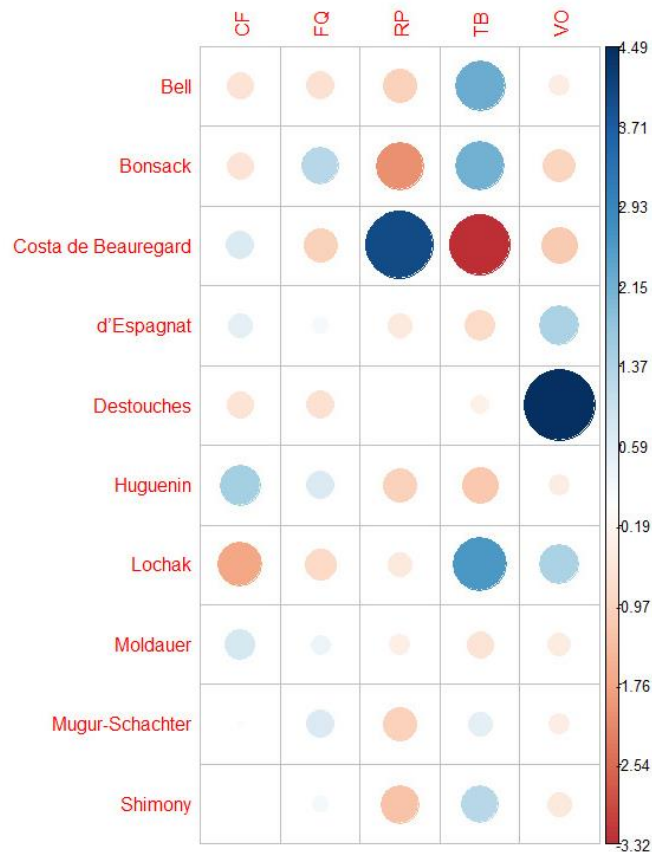


Figura 3: Relação de associação entre autores e temas, com a informação individual da relação entre cada autor e os temas. Quanto mais forte o tom de coloração e tamanho do círculo, maior a associação entre o autor e o tema, sendo que vermelho representa uma associação negativa (antiassociação) e azul uma associação positiva aos temas.

A visualização, seja na forma de tabelas ou mapas perceptuais, de que existem pólos dentro da *Epistemological Letters*, retoma a primeira incerteza de Latour, relacionada a possibilidade da existência de antigrupos. Os antigrupos podem ser relacionados justamente aos valores de anticorrelação dos temas, assim, cada grupo tenta fortalecer ou evidenciar suas ideias nas discussões da *Epistemological Letters*. Dessa forma os próprios periódicos, como não-humanos, agem para modificar as interações entre os grupos e movimentarem mais a controvérsia.

Na sequência, buscando verificar a credibilidade dos autores dentro do periódico e uma possível interpretação da hierarquia interna da rede formada pela revista, foi realizada uma contabilização do número de vezes que os autores são referenciados (1 anotação para cada artigo publicado nos artigos da *Epistemological*

Letters). A Tabela 9 mostra o resultado da busca, inicialmente em ordem alfabética pelo sobrenome dos autores, contendo o número de vezes que um artigo do autor foi colocado nas referências em cada artigo da revista, um número repetido dentro de uma linha referente à um autor significa que nessa edição da revista houve mais de uma referência à um artigo do respectivo autor.

A credibilidade na ciência, como mencionado anteriormente, está em grande parte associada ao número de publicações e referências dos autores. Retomado o referencial de Latour (2012), as ações (nesse caso as próprias opiniões dos autores) só existem no mundo da TAR se forem relatadas, se foram compartilhadas, se causarem mudanças. Por isso as publicações ganham muita importância na pesquisa, quanto mais uma ideia ou ação for incorporada pela rede, mais forte os elos se tornam, por isso a necessidade de extendê-los através dos periódicos, sejam oficiais ou não. Dito isso, Latour explica que quanto mais referências se tem a uma ideia, no caso os valores de referência para cada autor acima, mais indícios temos de que o tema está no centro da controvérsia e mais importante se torna.

Tabela 9: Contabilização do número de referências aos artigos dos autores destacados, que publicaram na *Epistemological Letters*, de acordo com o número de vezes que aparecem em cada edição da revista.

AUTOR	Número de artigos referenciados por edição	TOTAL
Avram		0
Avramesco		0
Bedford	26, 26, 28.	3
Bell	1, 1, 1, 2, 5, 6, 6, 6, 6, 6, 6, 7, 8, 9, 9, 9, 9, 9, 10, 10, 10, 10, 12, 12, 13, 15, 15, 16, 18, 18, 18, 19, 19, 19, 20, 20, 20, 21, 24, 25, 26, 26, 27, 27, 27, 30, 34, 35.	49
Bonsack	2, 22, 22, 23, 23, 26, 27, 28, 35, 36.	10
Brody		0
Canals-Frau	34, 34.	2
Cantelaube	35.	1
Cetto	31.	1
Charrière	23.	1
Clauser	1, 6, 6, 6, 7, 8, 9, 9, 10, 10, 13, 14, 15, 16, 16, 16, 16, 18, 19, 19, 20, 21, 21, 21, 21, 23, 23, 26, 26, 26.	30
Cochran	2.	1
Conte	29, 31.	2
Cooke		0
Costa de Beauregard	2, 2, 3, 10, 14, 16, 16, 16, 16, 17, 17, 17, 17, 17, 18, 20, 20, 20, 21, 21, 22, 23, 23, 23, 23, 24, 24, 24, 25, 25, 25, 26, 26, 26, 26, 26, 26, 26, 26, 26, 27, 28, 28, 28, 28, 28, 29, 29, 29, 29, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 31, 31, 32, 33, 35, 35, 35, 35.	65
D'Espagnat	2, 2, 6, 9, 9, 9, 10, 14, 14, 17, 17, 17, 18, 21, 22, 22, 23, 23, 25, 25, 25, 25, 26, 26, 26, 26, 27, 27, 28, 28, 29, 29, 31, 31, 33, 33, 35, 35, 36, 36.	40
de la Penã	7, 10, 15, 15, 18, 18, 31.	7
Destouches	7, 19, 21, 21, 22, 26, 26, 26.	8
Dewney	36, 36.	2
Draganescu	35	1
Drieschner		0
Dumitru	15, 15, 15, 15, 18.	5
Escudié	34.	1
Evrard	9, 25.	2
Fraissé	27	1
Galles		0
Garuccio	15, 21, 24, 24, 25, 25, 25, 26, 26, 26, 27, 27, 28, 28, 28, 30, 30, 30, 30, 30, 30, 31, 31, 31, 33, 33, 33, 33, 35, 35, 35, 35, 36.	34
Guggenheimer		0
Hadjisavvas	25, 27, 35.	3

A Tabela 10, que segue à explicada anteriormente, diz respeito aos autores mais referenciados, em números absolutos, valendo a pena ressaltar que auto-referências também foram contabilizadas.

Tabela 10: Ordenação do número de referências aos trabalhos dos autores, de acordo com o maior resultado até os resultados nulos. Os 10 mais referenciados da *Epistemological Letters* estão em itálico.

AUTOR	TOTAL
<i>Costa de Beauregard</i>	65
<i>Bell</i>	49
<i>Vigier</i>	46
<i>D’Espagnat</i>	40
<i>Garuccio</i>	34
<i>Clauser</i>	30
<i>Selleri</i>	24
<i>Shimony</i>	19
<i>Horne</i>	18
<i>Zeh</i>	17
Mugur-Schachter	15
Stapp	15
Muynck	12
Popper	11
Bonsack	10
Destouches	8
de la Penã	7
J. Andrade e Silva	6
Piron	6
Dumitru	5
Lochak	4
M. Andrade e Silva	4
Tarozzi	4
Bedford	3
Hadjisavvas	3
Mayants	3
Moldauer	3
Canals-Frau	2
Conte	2
Dewney	2
Evrard	2
Jochim	2
Kyprianidis	2
Treder	2
Cantelaube	1
Cetto	1
Charrière	1
Cochran	1
Draganescu	1
Escudié	1
Fraissé	1
Hilgevoord	1
Huguenin	1
Hussain	1
Pavicic	1
Scott	1
Wang	1

Avram	0
Avramesco	0
Brody	0
Cooke	0
Drieschner	0
Galles	0
Guggenheimer	0
Hodgson	0
Hoffmann	0
Malcor	0
Mattuck	0
Michel	0
Park	0
Paty	0
Robert	0

A fim de comparar os resultados dos quatro primeiros colocados na tabela acima, com os trabalhos referenciados igual ou mais de 40 vezes dentro da revista, o gráfico abaixo (Figura 4) permite verificarmos o número de artigos referenciados em cada edição e compararmos as possíveis publicações de grande importância de cada autor (dentro e fora da *Epistemological Letters*) com o número de referências destacadas.

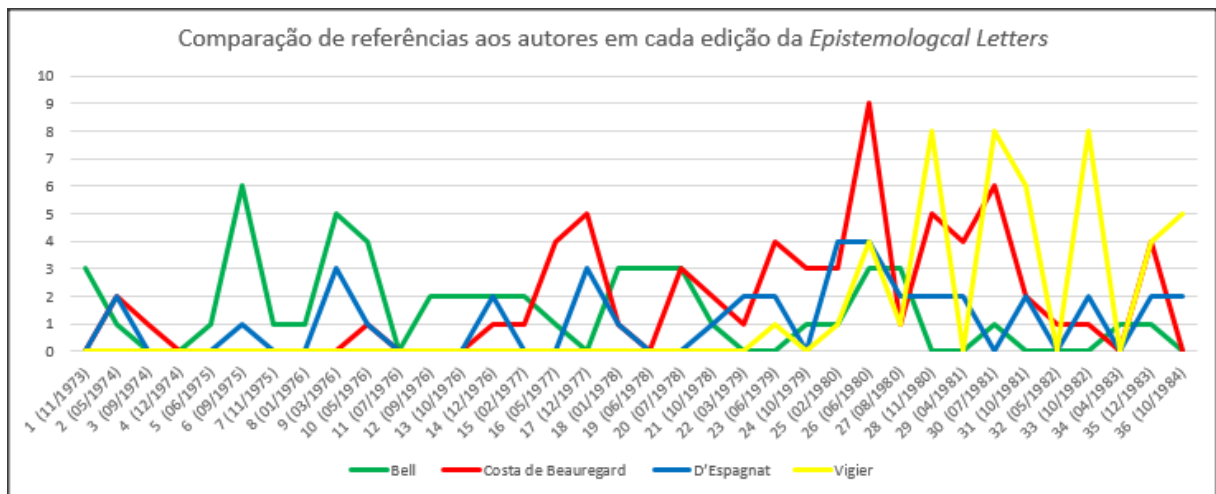


Figura 4: Gráfico de comparação entre artigos referenciados por edição, de Bell, Costa de Beauregard, d'Espagnat e Vigier.

Os temas discutidos na *Epistemological Letters* giravam em torno do Teorema de Bell ou questões relacionadas aos fundamentos. Buscando compreender como se dava a relação do trabalho de Bell, de 1964, com o desenvolvimento de outros temas dentro do periódico e como ocorreu sua estabilização ao longo das edições da revista, o primeiro passo foi identificar quais eram os trabalhos de Bell citados durante as publicações na revista. Contabilizamos onze publicações relacionadas (referenciadas) ao nome de Bell, sendo que quatro delas foram artigos publicados por Bell dentro da

Epistemological Letters. Estes onze trabalhos publicados ao longo das 36 edições estão na Tabela 11.

Tabela 11: Trabalho de John S. Bell referenciados na *Epistemological Letters* e as respectivas edições em que foram referenciadas e o número total de referências a cada trabalho.

Trabalho	Edições	Referências Totais
Capítulo escrito por Bell no livro “Foundation of Quantum Mechanics”, no qual estavam as palestras da escola de Varenna de 1970.	1, 6-6, 8, 9, 10, 13-13, 15, 18, 20, 27, 35.	13
On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics (1966)	1, 6-6, 10, 20.	5
On the Einstein Podolsky Rosen Paradox* (1964/1965)	1, 2, 5, 6-6, 9-9, 10-10-10, 12, 14, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 27-27, 30, 34.	21
On The Hypothesis that the Schrodinger Equation is exact (1971)	7.	1
Quantum Mechanical ideas (1972)	9.	1
Capítulo escrito por Bell no livro “The physicist’s conception of the Nature”	9.	1
Artigo de Bell na <i>Epistemological Letters</i> 7 (1975)	12.	1
Artigo de Bell na <i>Epistemological Letters</i> 9 (1976)	14, 15, 16, 18, 19.	5
Artigo de Bell na <i>Epistemological Letters</i> 15 (1977)	18, 19.	2
Apresentação oral no Colóquio de Genova	26.	1
Artigo de Bell na <i>Epistemological Letters</i> 37 (1978)	26.	1

Como esperado, o artigo no qual Bell desenvolveu seu teorema foi o mais referenciado dentre seus trabalhos. Esse trabalho aparece referenciado em 17 das 36 edições da revista. Durante esse procedimento foram selecionados os trechos onde estavam as referências aos trabalhos de Bell e foram traduzidos os trechos correspondentes, em uma tabela que continha a página, citação traduzida, autores que fizeram a referências e a qual dos onze trabalhos descritos acima o trecho se tratava. O passo seguinte foi a marcação de todos os trechos que tratavam do teorema de Bell ou tinham relação com ele em todas as edições da *Epistemological Letters*. Nesse caso, foram contabilizadas todas as menções ao Teorema/Desigualdade de Bell, pois anteriormente haviam sido contabilizadas somente as referências ao

trabalho de 1964. O resultado obtido a partir dessa contabilização pode ser observado na Tabela 12, abaixo:

Tabela 12: Menções ao Teorema/Desigualdade de Bell ao longo das 36 edições da *Epistemological Letters*.

TABELA: MENÇÕES À DESIGUALDADE DE BELL	
Edição da <i>Epistemological Letters</i>	Número de citações/menções à desigualdade/teorema de Bell
1	7
2	1
3	0
4	1
5	3
6	35
7	5
8	6
9	16
10	28
11	0
12	4
13	2
14	2
15	0
16	0
17	0
18	1
19	21
20	7
21	24
22	13
23	1
24	1
25	36
26	41
27	9
28	14
29	3
30	2
31	3
32	1
33	4
34	10
35	15
36	0

Após a contabilização de vezes que o artigo de Bell “On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*” foi referenciado e a contabilização de menções feitas ao Teorema de Bell (ou relacionados a ele), os dados foram colocados em uma tabela, gerando um gráfico que permite comparar a relação entre as duas coletas de dados. O gráfico da Figura 5, abaixo, é um gráfico normalizado, ou seja, os valores estão expressos pela razão entre total de menções ou referências e o número de artigos publicados

em cada edição, pois assim o resultado obtido não fica desproporcional devido às edições mais curtas do periódico.

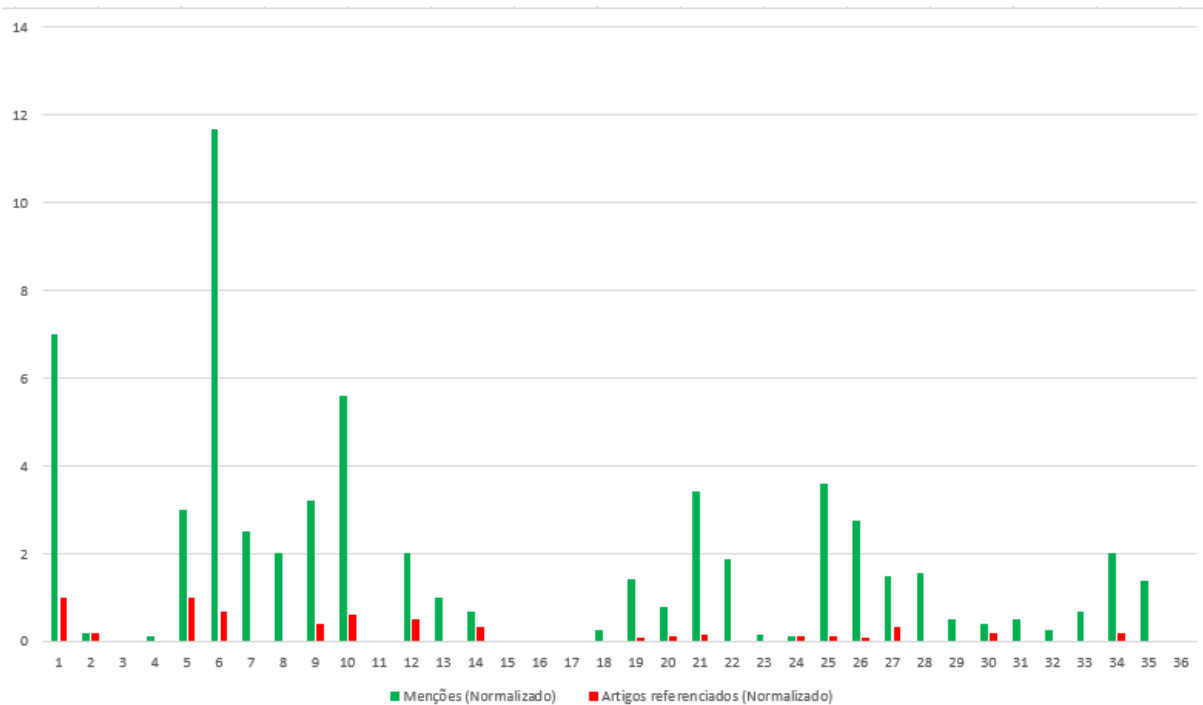


Figura 5: Gráfico normalizado de comparação entre referências (artigo de 1964) e menções (ao Teorema/Desigualdade de Bell).

É possível observar dessa forma, que o número de referências ao trabalho de Bell, no qual desenvolve sua desigualdade, diminui consideravelmente ao longo das últimas edições da *Epistemological Letters*, enquanto que o número de menções se mantém (com exceção de alguns picos ou edições curtas que não trabalharam o tema). Na Figura 6, é possível observar o gráfico acima com as marcações de vezes que o Teorema de Bell foi mencionado sem que houvesse referência ao artigo do autor:

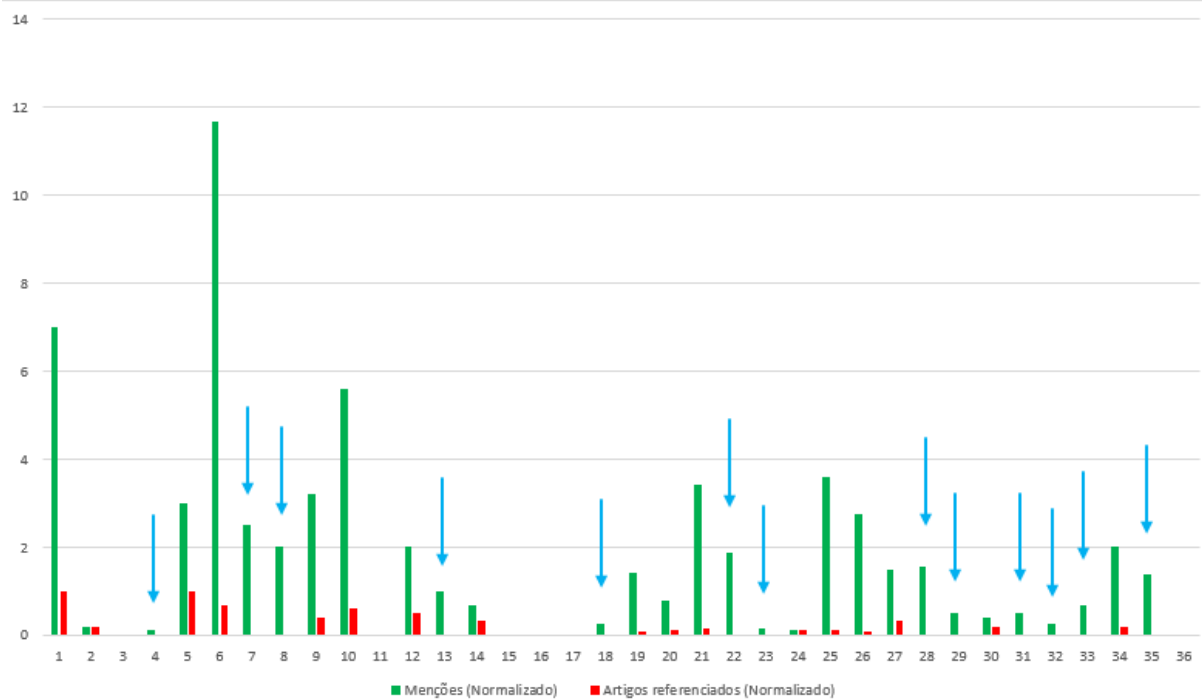


Figura 6: Indicações das edições nas quais o Teorema de Bell é mencionado, porém não ocorre a referência ao artigo no qual ele foi desenvolvido.

O resultado, principalmente o elevado número de indicações nas edições finais, de menções ao teorema de Bell sem as referências ao respectivo artigo, podem indicar o que Latour denomina de estabilização do actante, que no caso é o Teorema de Bell. Isso ocorre quando o conceito começa a se tornar uma caixa preta, e a relação entre o autor e o artigo original acaba se perdendo, apesar do teorema levar o nome de quem o criou.

De acordo com a quinta incerteza discutida na TAR (LATOUR, 2012), sobre a escrita dos relatos, podemos verificar que o próprio desdobramento da rede que proporcionou os limites da pesquisa e quais os caminhos a serem seguidos. A análise inicial de alguns livros sobre história e filosofia da ciência, e física mais especificamente, revelaram a *Epistemological Letters*. O periódico nos levou a discussão dos temas, dos quais se destacou o Teorema de Bell e a própria controvérsia em torno das variáveis ocultas. No passo seguinte, tendo os temas, verificamos os autores mais referenciados e com participações significativas nas publicações da *Epistemological Letters*, o que novamente mostrou o destaque no nome de John Bell. Esse destaque na temática e nas referências ao autor direcionaram a pesquisa para a verificação de como o teorema de Bell foi se estabilizando dentro do periódico. O número crescente de menções ao

teorema/desigualdade e a redução das respectivas referências ao artigo que originou tal discussão evidencia a estabilização do Teorema de Bell (no periódico em questão).

Dessa forma, o teorema de Bell, um local, conseguiu chegar até o global e, com a ajuda dos actantes envolvidos, fortaleceu sua rede integrando mais experimentos, relações sociais, contextos apropriados, autores com os quais associava suas ideias e outros os quais conflitava. A rede envolvida nessa controvérsia permitiu identificarmos que ocorreu a estabilização do Teorema de Bell na *Epistemological Letters*.

6 A TRADUÇÃO DOS TRABALHOS DE BELL PARA PERIÓDICOS OFICIAIS

Após a verificação da estabilização do Teorema de Bell nas discussões e artigos publicados por diversos autores na *Epistemological Letters*, a segunda etapa consistiu em verificar como os argumentos utilizados, especificamente por Bell, foram publicados em periódicos oficiais. Para isso, nos utilizamos do conceito de tradução, definido pela perspectiva de Latour, anteriormente. Essa tradução permite que possamos comparar dois ou mais argumentos do autor e as modificações ou estabilizações que sofreram quando foram rerepresentados/republicados em meios oficiais da ciência. Essa possibilidade de mudança nos argumentos pode ocorrer devido a aspectos pessoais, sociais ou políticos com os quais o autor se deparou com o passar do tempo. Isso permite verificar o argumento de Lightman (2016) sobre uma das principais formas de disseminação do conhecimento se dar de forma escrita, em artigos nesse caso em específico. A forma como o conhecimento é disseminado através da escrita permite conhecermos quem os escreve e os seus ideais, além da forma como o tema é debatido e a seriedade que é tratado.

Dessa forma, para realizar a verificação de traduções ou estabilizações, foram utilizadas as ideias, argumentos e comentários do autor em suas cinco publicações na revista, de forma a considerar a parte conceitual de suas ideias. As publicações de Bell foram as seguintes:

- Locality in Quantum Mechanics: Reply to Critics (7ª edição)
- The Theory of the Local Beables (Preprint no CERN [1975] e reprint na *Epistemological Letters* 9ª edição em 1976 e na *Dialectica* em 1985)
- Free Variables and Local Causality (15ª edição)
- On the Hypothesis that the Schrödinger Equation is Exact (Preprint no CERN [1971], 20ª edição da *Epistemological Letters* em 1978)
- Réponse à 17.8 (20ª edição, uma resposta de Bell ao comentário de F. Bonsack sobre o artigo da teoria dos Beables locais)

Sendo que, “The Theory of the Local Beables”, “Free Variables and Local Causality” e “Réponse à 17.8” são sequências de discussões ou artigos de resposta de Bell sobre o mesmo tema.

Em seu primeiro artigo, que pode ser traduzido como “Localidade na Mecânica Quântica: Resposta aos críticos”, Bell contra-argumenta três comentários feitos a respeito do seu artigo de 1964. Primeiramente, explica que a objeção de Louis de Broglie é com a função de correlação da Mecânica Quântica usual, e não com suas

ideias e o desenvolvimento de seu raciocínio. Já a resposta fornecida à Lochak (que utiliza a teoria dos parâmetros ocultos de Louis de Broglie) se refere ao fato de ilustrar uma situação onde “um” instrumento libera “uma partícula” e vincula o resultado como dependente dos ajustes \hat{a} desse instrumento. Bell concorda com a afirmação, mas diz que o contexto do teorema é desenvolvido com “dois” instrumentos e “duas partículas”, que se fosse desenvolvida por Lochak, ele perceberia que a teoria de de Broglie tem a dependência não-local. Por fim, responde ao artigo de de la Peña, Cetto e Brody, os quais tiveram uma interpretação errônea do desenvolvimento na demonstração do teorema. Os três autores compreenderam equivocadamente que $A(\hat{a}', \lambda)$ e $B(\hat{b}', \lambda)$ e depois $A(\hat{a}, \lambda)$ e $B(\hat{b}, \lambda)$ se referiam a quatro medições, porém Bell esclarece que são as mesmas funções só que com argumentos diferentes.

O segundo artigo, “A Teoria do Beables Locais” é o artigo no qual Bell tenta formular uma ideia sobre o que é “causalidade local”. Bell inicia o artigo definindo o que poderia ser um “Beable”, dando-lhe sentido de algo que realmente exista, que possa ser atribuída a alguma região do espaço-tempo, algo ‘físico’ e não aspectos que são conveniências matemáticas. No exemplo abaixo, retirado do artigo, a Figura 7 representa o que Bell chama de determinismo local:

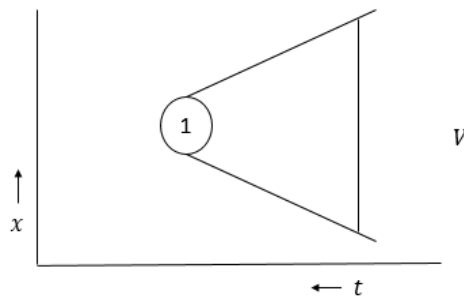


Figura 7: Como é possível observar pelas grandezas representadas na imagem (BELL, 1976), o tempo corre da direita para a esquerda, de forma que a medição ou o fenômeno que ocorrem em 1 acontecem após a área delimitada pelo cone. Nesse exemplo, V representa um campo em um determinado tempo t , no qual o cone é totalmente delimitado por esse V , no “passado”. Isso significa que V determina os campos que acontecem em 1.

Na seção seguinte, o autor define causalidade local em termos de probabilidade de valores para beables separados em regiões 1 e 2 distantes no espaço, como representado na Figura 8.

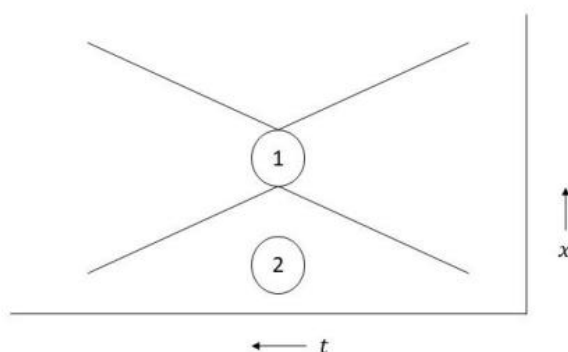


Figura 8: Representação da situação elaborada por Bell (1976), na qual é possível observar que os eventos ocorridos em 2 não devem ser causas em 1, pois observando as grandezas que acompanham o gráfico é possível perceber que 1 e 2 estão ocorrendo em um mesmo tempo, mas em espaços diferentes (o que não impede que hajam possíveis correlações devido a sobreposição dos cones na direita).

Na sequência, o autor apresenta uma imagem que contém uma sobreposição desses cones retroativos, o que pode indicar uma correlação em algum tempo passado. A Figura 9 define o que Bell chama de causalidade local:

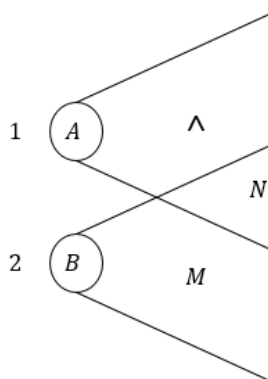


Figura 9: Representação da situação apresentada por Bell (1976), na qual existem dois Beables, A e B que em um “passado” contém um local onde há uma sobreposição de seus cones, representados por um Beable N , que contém a especificação de todos os Beables pertencentes a essa sobreposição.

Então Bell afirma que:

Seja N uma especificação de todos os beables, de alguma teoria, pertencente à sobreposição dos cones de luz retroativos das regiões separadas como espaciais 1 e 2. Seja \wedge uma especificação de alguns beables do restante do cone de luz retroativo de 1, e B de alguns beables na região 2. Então, em uma teoria localmente causal

$$\{A|\wedge, N, B\} = \{A|\wedge, N\}$$

sempre que ambas as probabilidades são dadas pela teoria. (BELL, 1976, p. 14, tradução nossa)

Pela igualdade mencionada acima, é possível perceber que se N é uma especificação de todos os beables, não fará diferença se B não aparecer entre chaves no lado direito, pois a informação é redundante, dada a característica de N . Na sequência Bell argumenta que a MQ comum não é localmente causal, mas pode ser fragmento de uma teoria que é complementada por beables “ocultos” λ , que restaurariam a causalidade local. Por exemplo, considerando a Figura 9, se partículas correlacionadas partissem de N até regiões espacialmente separadas (A e B), ao colocarmos um ímã de Stern-Gerlach na parte do espaço correspondente a M , após a sobreposição do cone, teríamos um efeito em B que modificaria a medição que seria obtida em A . Dessa forma, as informações de B não seriam redundantes para A , e sim complementarizariam a informação, apontando uma não-localidade.

Ao final do artigo Bell desenvolve uma desigualdade (desenvolvimento e notação diferentes do artigo de 1964), dessa vez utilizando os conceitos de beables e causalidade local desenvolvidos anteriormente. Através dessa desigualdade, retoma o argumento de não localidade da MQ, dizendo que esta tem correlações que não obedecem à desigualdade desenvolvida. Para isso usa o exemplo de um pión que decai em dois fótons em uma região 3, de tal forma que esses fótons vão para as regiões 1 e 2, passando por contadores com ângulos especificados. Assim, Bell desenvolve o exemplo e mostra que para certos ângulos a desigualdade é violada, de forma que a MQ não pode ser inserida em uma teoria localmente causal. Em uma das seções finais, o autor faz comentários sobre a situação dos experimentos para os testes da MQ, afirmando que ainda estão longes do ideal (mudança de configurações dos instrumentos de medição durante o voo) e por vezes são feitas extrapolações *ad hoc* que permitem conectar resultados da prática com experimentos ideais. Por fim, Bell mostra que mesmo supondo a não-localidade e correlações mantidas a longo prazo, não é possível que sejam enviadas mensagens mais rápidas que a velocidade da luz, explicando que nesse caso a MQ relativística seria localmente causal.

O artigo denominado “Variáveis livres e causalidade local” é uma resposta de Bell ao artigo de Clauser, Horne e Shimony (CHS) a respeito da teoria dos Beables locais. Nesse artigo, Bell resolve explicar alguns mal-entendidos em um dos seus comentários finais do artigo onde expôs a teoria (beables), mais especificamente sobre as variáveis livres, dividindo o artigo em quatro seções. Primeiramente o autor explica que as variáveis livres têm implicações apenas nos valores futuros dos cones de luz, não sendo registros nem informações sobre o que aconteceu antes. Além

disso, explica o que são as variáveis que descreveu nas equações, mostrando um mal-entendido de CHS a respeito da probabilidade mencionada no artigo.

Na segunda seção, Bell comenta sobre o livre arbítrio dos experimentadores, argumentando que CHS não permitem que o autor (Bell) justifique as variáveis livres por uma posição “metafísica”. Então defende-se afirmando que

Uma respeitável classe de teorias, incluindo a teoria quântica contemporânea como é praticada, tem variáveis "externas" "livres" além daquelas internas e condicionadas pela teoria. Essas variáveis são normalmente campos ou fontes externas. Eles são invocados para representar condições experimentais. Eles também fornecem um ponto de apoio para "experimentadores de livre arbítrio", se a referência a tais entidades metafísicas hipotéticas for permitida. Estou inclinado a prestar atenção especial a teorias desse tipo, que me parecem mais simplesmente relacionadas à nossa maneira cotidiana de ver o mundo. (BELL, 1977, p. 81, tradução nossa)

Porém existe uma ambiguidade no que pode ser considerado um elemento livre, por exemplo, os ímãs de Stern-Gerlach podem ser considerados externos ou, ainda, incluídos no sistema quântico.

Na terceira parte Bell assume ter formulado uma frase de forma inadequada, explicando

“... ou pelo menos não determinado na sobreposição dos cones de luz para trás ...”

Aqui, devo admitir imediatamente que a hipótese se torna bastante inadequada quando enfraquecida dessa maneira. O teorema não segue mais. Eu estava errado.

Neste ponto tinha em mente a possibilidade de explorar a liberdade, nas teorias físicas convencionais, das condições iniciais. Agora estou constrangido não apenas pela inadequação desta frase particular na hipótese, mas também pela necessidade de prestar atenção em tal estudo à criação do mundo.

Em vez disso, vou enfraquecer a hipótese de uma maneira diferente e mais prática. (BELL, 1977, p. 81, tradução nossa)

Por fim, o autor considera que podem ter variáveis suficientemente livres para determinados propósitos. Exemplifica com uma situação na qual um aparelho de números aleatórios tem sua saída dependente de um número alto de fatores, que formam uma cadeia complexa. Então Bell supõe que duas saídas a e a' dependam da milionésima casa decimal ser par ou ímpar, apesar dessa dependência existir, provavelmente não seja vital, podendo (a variável) ser considerada suficientemente livre para o propósito em questão. Afirma então que argumentos desse tipo são utilizados por CHS para provar a suposição de Clauser e Horne, não devendo ser consideradas menos relevantes na situação em questão.

No artigo “Na hipótese de que a equação de Schrödinger é exata” Bell apresenta a teoria da onda-piloto de de Broglie e uma versão reformulada da teoria de Everett, comparando-as com a MQ ortodoxa. Essas duas teorias seriam alternativas à representação da equação de Schrödinger linear, já que ela não é válida para descrever os momentos de “medição” (nos quais entra a questão da redução de estado, o postulado de projeção de Von Neumann) e a função de onda já não é considerada mais como fornecendo uma descrição completa da realidade. Bell então apresenta uma situação comum na MQ (a trilha formada nas placas fotográficas pelas partículas α), para na sequência destacar o problema que abordará no artigo.

Essa situação é apresentada de duas formas: 1) somente a partícula fazendo parte do sistema mecânico quântico e 2) as partículas e as placas fotográficas fazendo parte do sistema. Nessas duas apresentações, o autor fala sobre duas características comuns, as quais ele considera relevantes destacar: 1) consistência mútua de diferentes registros do mesmo fenômeno (que podem ser gravados e acessados através da memória do computador) e 2) quando a pilha de placas fotográficas é tratada como um único sistema mecânico quântico, cada trilha da partícula α é um único resultado experimental. Mas, independente das duas formas serem diferentes, na MQ comum, a situação não mudaria, pois ela não fala de eventos no sistema, apenas os resultados das observações.

Finalmente, Bell destaca o problema ao qual queria chegar com o exemplo, evidenciando

O problema é o seguinte: a mecânica quântica trata fundamentalmente de "observações". Ela necessariamente divide o mundo em duas partes, uma parte que é observada e uma parte que faz a observação. Os resultados dependem em detalhes de como essa divisão é feita, mas nenhuma prescrição definitiva é dada. Tudo o que temos é uma receita que, devido às limitações humanas práticas, é suficientemente inequívoca para fins práticos. (BELL, 1978, p. 9, tradução nossa)

Bell argumenta que a Mecânica Clássica consegue conciliar o observador a uma teoria do universo como um todo, mas na TQ o observador é essencial e externo a situação. Em contraponto, explica que a Mecânica Clássica também tem suas limitações

A mecânica clássica tem, no entanto, o grave defeito, conforme aplicada na escala atômica, de não dar conta dos dados. Por esse bom motivo, foi abandonado nessa escala. No entanto, os conceitos clássicos não foram expulsos da física. Pelo contrário, eles permanecem essenciais na escala "macroscópica" [...], a teoria contemporânea emprega funções de onda quântica ψ e variáveis clássicas. (BELL, 1978, p. 11, tradução nossa)

Então entram as teorias de de Broglie e Everett, que conseguiriam, na opinião de Bell, conciliar esses dois mundos (quântico e clássico). Para isso, devem respeitar duas características: 1) serem formuladas em sistemas pequenos (sem apelar a conceitos dos “grandes números”) e não tratar a nível fundamental conceitos como “medição”, “experimento” e “observação”. Ao entrar na teoria de de Broglie, é afirmado que a função de onda deve ser considerada real e objetiva. Os observáveis são então construídos a partir dos x 's e não de ψ , sendo então estes x 's pensado como “variáveis expostas” e ψ como “variável oculta”. Com essa formulação, Bell compara, a partir do exemplo das partículas α , a trajetória da MQ tradicional (surge apenas em níveis macroscópicos e são consequências de sucessivas reduções do pacote de onda) e a da onda-piloto (trajetória macro é consequência da trajetória micro). Em seguida Bell faz mais cálculos comparando trajetórias, porém dessa vez com duas partículas correlacionadas de spin $\frac{1}{2}$, concluindo que o comportamento da trajetória dependerá não somente dos instrumentos locais, mas também daqueles remotos (relatando uma dinâmica não-local).

Quando entra em questão a teoria de Everett, Bell a descreve como sendo a teoria da onda-piloto, sem trajetória. Nela, a configuração dos x 's deve existir e devem ser distribuídas na classe de comparação dos possíveis “mundos”, com probabilidade $|\psi|^2$. Na sequência o autor justifica as adaptações que fez, para os leitores de Everett e De Witt não compreenderem essa formulação, concluindo que

Assim, em nossa interpretação da teoria de Everett, não há associação do presente particular com nenhum passado particular. E a afirmação essencial é que isso não importa de forma alguma. Pois não temos acesso ao passado. Temos apenas nossas "memórias" e "registros". Mas essas memórias e registros são de fato fenômenos presentes. A configuração instantânea dos x 's pode incluir clusters que estão marcando em cadernos, ou em memórias de computador, ou em memórias humanas. Essas memórias podem ser das condições iniciais em experimentos, entre outras coisas, e dos resultados desses experimentos. A teoria deve dar conta das atuais correlações entre esses fenômenos presentes. E, a esse respeito, vimos que ela concorda com a mecânica quântica comum, na medida em que esta não é ambígua. (BELL, 1978, p. 25, tradução nossa)

Por fim, Bell faz a colocação de que a teoria de Everett pode ser um local para aqueles que não gostam de como a trajetória é tratada na teoria da onda-piloto mas consideram a equação de Schrödinger exata.

A quinta e última contribuição de Bell na Epistemological Letters leva o título de “Resposta à 17.8”. Esse curto artigo de Bell é uma resposta ao artigo anterior de

Bonsack sobre a Teoria do Beables Locais. Nele Bell destaca três pontos sobre a explicação de Bonsack sobre o teorema. O primeiro é de que formular uma noção de "impossibilidade de interação" também levaria aos cones de luz e relatividade. A segunda é que a hipótese de determinismo não é necessária, pois Bell formulou a noção de localidade de forma independente da de determinismo, sendo ele uma consequência da localidade e idealização das medidas. Por fim, Bell afirma não lembrar de ninguém afirmando que a localidade poderia ser restaurada pela invocação de números complexos.

A comparação para verificação das possíveis traduções, de acordo com o conceito de Latour, a respeito das ideias nos artigos de Bell publicados na *Epistemological Letters* será feita a partir de artigos de periódicos oficiais. Para isso, como mencionado na trajetória metodológica, foi utilizada a base de dados do "Scopus", na qual o nome de Bell foi inserido na busca, sendo filtrados detalhes como ano de publicação (para que fossem a partir da data de início da *Epistemological Letters*), tipo de documento (artigo, nesse caso), tema (semelhantes aos discutidos na *Epistemological Letters*) e que fossem de autoria somente de Bell (para que não houvesse inserção de ideias de outros autores). Esses filtros resultaram em quatro artigos, que serão discutidos na sequência. O conceito de tradução nos direcionou para a busca dos detalhes necessários nos artigos filtrados no *Scopus*, sendo elementos transformados, adicionados ou perdidos através dessas novas exposições sobre as ideias de Bell. Por coincidência, os artigos de Bell publicados na *Epistemological Letters* foram até o ano de 1978 e os quatro artigos selecionados foram publicados a partir de 1980. Então todos os artigos dos periódicos oficiais foram publicados após os artigos de Bell na *Epistemological Letters*, sendo um detalhe interessante para verificar o processo de tradução.

No primeiro artigo, "de Broglie-Bohm, Delayed-Choice, Double-Slit Experiment, and Density Matrix" (BELL, 1980) publicado no *International Journal of Quantum Chemistry*, é apresentada a versão de Louis de Broglie e David Bohm da Mecânica Quântica não relativística aplicada ao experimento da dupla fenda e escolha demorada. Bell afirma que a teoria de de Broglie-Bohm é equivalente à versão usual, porém não divide o mundo em "sistema" e "aparelho" ou "medição" e "não-medição", pois é aplicada ao mundo como um todo e não somente a processos laboratoriais. Nesse contexto (experimento da fenda dupla com escolha demorada), Bell apresenta um elemento adicional, uma possível tradução para o contexto do experimento ao qual

está explicando. Ele afirma que no experimento da fenda dupla com escolha demorada a onda passa por ambas as fendas (natureza de onda) e a partícula passa por apenas uma (natureza das partículas), porém a partícula é guiada em direção aos lugares onde $|\psi|^2$ é grande, dessa forma nenhum dos movimentos (da onda ou da partícula) é afetado pela inserção posterior da placa. O que claramente é um elemento adicional quando comparado aos artigos da *Epistemological Letters* e, também, mais um argumento favorável à teoria da onda-piloto quando comparada à explicação da MQ ortodoxa (redução do pacote de onda).

Posteriormente nesse artigo Bell diz que ao adicionarmos contadores atrás das fendas 1 e 2, eles devem ser considerados como parte do sistema, isso implica que (após mostrar as equações no artigo) na equação abaixo (que representa o movimento de muitos corpos)

$$\Psi(t) = \Psi_1(t) + \Psi_2(t)$$

$$\Psi_1(t) = \psi_1(t, \mathbf{r}) D_1^1(t, \mathbf{r}_1, \dots) D_2^0(t, \mathbf{r}_2, \dots)$$

$$\Psi_2(t) = \psi_2(t, \mathbf{r}) D_1^0(t, \mathbf{r}_1, \dots) D_2^1(t, \mathbf{r}_2, \dots)$$

apenas Ψ_1 "ou" Ψ_2 é significativamente diferente de zero, permitindo Bell destacar que

Essa redução de Ψ_1 e Ψ_2 para Ψ_1 ou Ψ_2 , na especificação parcial (macroscópica) da configuração a ser considerada, ilustra a "redução da função de onda" no quadro de Broglie-Bohm. É uma operação puramente teórica e não é preciso perguntar apenas quando acontece e quanto tempo leva. O teórico faz isso quando acha conveniente.

A redução adicional de Ψ_1 ou Ψ_2 para ψ_1 ou ψ_2 é uma redução de muitas partículas para poucas (uma neste caso). Ele ilustra como, com uma especificação parcial do mundo em geral, torna-se possível na prática lidar com um pequeno sistema quântico - embora, em princípio, a aplicação correta da teoria seja para o mundo como um todo. (BELL, 1980, p. 158, tradução nossa)

A exposição anterior destaca um argumento adicional às ideias de Bell na *Epistemological Letters*, que é essencial para compreendermos o comportamento da onda-piloto frente a esse experimento, sendo que de forma indireta o conceito de "mundo" é envolvido nesse sistema e uma explicação desse contexto é comparada (como alternativa) ao que os físicos tradicionais chamam de redução da função de onda, que é criticada por Bell. Essa adição, ou possível transformação, dos elementos às ideias essenciais de Bell representam uma tradução (mesmo que sutil) ocorrida ao longo do tempo, nas ideias iniciais do autor em periódicos oficiais.

Além disso, nesse artigo, Bell faz a junção de elementos de dois temas aos quais não havia relacionado antes na *Epistemological Letters* (1976, 1977, 1978), as

exposições sobre a teoria dos Beables locais e a explicação da teoria da onda-piloto. Essa transformação dos elementos de duas ideias de Bell aparece quando ele enfatiza que para que a teoria da onda-piloto seja aplicada ao mundo, é necessário que qualquer “observador” possa ser incluído no sistema mecânico quântico, desde que não sejam concebidos como não essencialmente diferentes de computadores, dessa forma tudo seria pré-determinado (inclusive o exemplo da escolha atrasada). Porém, ao incluirmos criaturas de livre arbítrio (o que poderia ter relação com variáveis livres) exigiria um desenvolvimento a mais da teoria de de Broglie-Bohm, a qual seria diferente da abordagem usual.

No segundo artigo, “On the Impossible Pilot Wave” (1982) publicado no *Foundations of Physics*, Bell relembra algumas provas de impossibilidade na Mecânica Quântica, e desenvolve um raciocínio a respeito da teoria da onda-piloto de de Broglie-Bohm, destacando como ela supera cada uma das três provas de impossibilidade as quais apresenta (dentre as quais está a de Von Neumann). Mas Bell tem um outro motivo por detrás deste artigo, que é o de divulgar a teoria da onda-piloto, chegando a se questionar, em certo momento, no início de sua exposição, sobre o porquê a teoria é ignorada em livros texto. Bell utiliza o argumento na prova Von Neumann para mais uma vez destacar alguns pontos que o incomodam na Teoria Quântica ortodoxa, na medida em que as conclusões de Von Neumann afirmam que nenhuma teoria poderia ser suplementada por variáveis ocultas e nenhuma teoria indeterminista poderia se tornar determinista. Dessa forma, uma futura Teoria Quântica, para restaurar o determinismo, não pode simplesmente ser uma modificação da teoria atual, mas deve ter uma formulação essencialmente diferente.

Dentre as possíveis traduções que dizem respeito a esse artigo, pode-se verificar que o discurso de Bell, apesar de continuar complexo, tentou adotar um ar de divulgação de uma teoria ou um tom mais “didático”, na medida em que tenta aproximar o público do que o fez adotar determinado ponto de vista. Essa mudança sutil no público-alvo fica mais evidente quando o artigo é comparado a suas exposições na *Epistemological Letters* (mais especificamente no artigo “Na hipótese da equação de Schrödinger ser exata”), o qual os argumentos são bem mais complexos e voltados à físicos “profissionais”. Uma outra transformação que pode ser percebida, na mesma direção da anterior, é a mudança na representação do formalismo utilizado no desenvolvimento das equações do artigo, as quais Bell parece

tentar aproximar do formato como é apresentado nos livros didáticos durante a graduação.

Isso novamente mostra a transformação que o conteúdo sofreu entre as exposições do autor com o passar do tempo, facilitando mais ainda o propósito de Bell em difundir a teoria da onda-piloto. Dessa forma alcançando o público alvo que estava iniciando os estudos de MQ, pois é nesse início de curso que os alunos se apegam mais à uma ou outra teoria para interpretarem os fenômenos quânticos. Dessa forma, o tom de defesa e complexidade do artigo de Bell na *Epistemological Letters* parece dar lugar à um diálogo um pouco mais simplificado e buscando conquistar novos adeptos à teoria.

Dentre os elementos perdidos, principalmente em comparação com o artigo da *Epistemological Letters* no qual comenta sobre a onda-piloto (BELL, 1978), Bell não estabelece mais a relação entre a teoria da onda-piloto e a teoria de Everett, nem sequer mencionando-o nesse artigo. Isso talvez possa ser uma modificação buscando descomplicar um pouco a leitura introdutória à onda-piloto, deixando-a dessa forma mais “digerível”, em primeiro momento. Esse elemento, apesar de ser considerado importante por Bell na *Epistemological Letters*, poderia complicar os argumentos do autor em algum momento. Mas, além dos elementos que foram transformados e dos elementos que foram perdidos, é possível observar elementos que foram adicionados nos argumentos de Bell.

Os elementos adicionados por Bell nesse artigo foram, geralmente, utilizados para fortalecer algumas de suas colocações. O autor repete o argumento já discutido em outro artigo, no qual relembra que na teoria da onda-piloto o Ψ é que seria considerado uma “variável oculta” ou “escondida”, adicionando que

Embora Ψ seja um campo real, ele não aparece imediatamente no resultado de uma única medição, mas apenas nas estatísticas de muitos desses resultados. É a variável X de de Broglie-Bohm que aparece imediatamente a cada vez. Que X em vez de Ψ é historicamente chamado de variável “oculta” é uma tolice histórica. (BELL, 1982, p. 993, tradução nossa)

Além disso, para mostrar aos leitores o “poder” que a teoria da onda-piloto tem em comparação com a interpretação ortodoxa da Teoria Quântica, Bell apresenta três provas de impossibilidade, que considera 1) a dita mais incontestável, 2) a mais instrutiva e 3) a mais recente (conhecida por ele até a data de publicação do artigo) e mostra como o que expôs sobre a teoria da onda-piloto consegue superar essas provas de impossibilidade. Daí o motivo pelo qual Bell, provavelmente, escolheu o

nome do artigo. Além disso, Bell adiciona argumentos na crítica ao que chama de mau uso do conceito de “medição” (que havia estabelecido relações em artigos da *Epistemological Letters*), chegando a sugerir uma substituição de termo:

Uma moral final diz respeito à terminologia. Por que pessoas tão sérias levam tão a sério axiomas que agora parecem tão arbitrários? Suspeito que eles foram enganados pelo mau uso pernicioso da palavra "medição" na teoria contemporânea. Esta palavra sugere fortemente a verificação de alguma propriedade preexistente de alguma coisa, qualquer instrumento envolvido desempenhando um papel puramente passivo. Experimentos quânticos não são assim, como aprendemos especialmente com Bohr. Os resultados devem ser considerados como o produto conjunto de "sistema" e "aparelho", a configuração experimental completa. Mas o mau uso da palavra "medição" torna fácil esquecer isso e depois esperar que os "resultados da medição" obedeçam a alguma lógica simples na qual o aparelho não é mencionado. As dificuldades resultantes logo mostram que tal lógica não é lógica comum. Tenho a impressão de que todo o vasto assunto da "Lógica Quântica" surgiu dessa maneira, do mau uso de uma palavra. Estou convencido de que a palavra "medição" foi agora tão abusada que o campo avançaria significativamente com a proibição total de seu uso, em favor, por exemplo, da palavra "experiência". (BELL, 1982, p. 997, tradução nossa)

Mas, como Latour explica em seu conceito de tradução, ela não modifica o essencial do que o autor (no caso Bell) quer expressar. Isso pode ser observado por argumentos (além dos que já foram mencionados acima) que Bell manteve praticamente iguais aos expressos na *Epistemological Letters*. Apesar da transformação e tentativa de simplificação de Bell, seu desenvolvimento matemático é muito próximo ao apresentado no artigo "Na hipótese de que a equação de Schrödinger é exata", em que a equação que determinaria a evolução temporal da posição das partículas pela teoria da onda-piloto é a mesma (e obviamente deveria ser) em ambos os artigos. Também através dos cálculos, Bell mostra a consistência que a teoria da onda-piloto tem com a MQ convencional, pois o resultado final observado é o mesmo em ambas teorias, e o que mudaria é a interpretação do “evento” em si.

No terceiro artigo selecionado, “EPR Correlations and EPW Distributions” (1986) publicado no *The New York Academy of Sciences*, Bell tenta relacionar a não-localidade de Teoria Quântica ao fato das funções de onda terem distribuições de Wigner negativas. Inicia o artigo afirmando que a não-localidade da Mecânica Quântica não pode ser removida com a introdução de variáveis ocultas, utilizando para isso dois exemplos de funções de onda: a que denominou original da ideia EPR e uma função de onda inicial, da forma como aparecem na TQ. O elemento adicional nessa

tradução é o uso de uma nova teoria para corroborar seu argumento, as distribuições no espaço de fase de Wigner (Bell mostra que o argumento EPR tem distribuição não negativa, mas uma função de onda que tenha distribuição negativa, em teoria, violaria a causalidade local). Além disso, para esse exemplo, Bell utiliza uma situação mais restrita, de duas partículas sem spin que não interagem no espaço livre. Bell afirma que a maneira mais simples de “medirmos” os momentos das partículas é esperando um longo tempo para “medirmos” suas posições. A mesma densidade de probabilidade da MQ comum (para a situação apresentada) pode ser encontrada pela correspondente distribuição de Wigner bitemporal. Dessa forma, aplicando a distribuição na equação, denominada por Bell como função de onda original EPR (a equação abaixo),

$$\delta \left[\left(q_1 + \frac{1}{2} q_0 \right) - \left(q_2 - \frac{1}{2} q_0 \right) \right]$$

ela não é negativa em nenhum lugar. Assim, as correlações EPR são aquelas entre duas partículas clássicas em movimento livre independente. Então a função de onda acima não apresenta problemas de não-localidade, quando assumida a incompletude da descrição dada pela função de onda.

Porém, quando se pensa em outras funções de onda, como a que representa uma função de onda inicial

$$(q^2 - 2a^2)e^{-\frac{q^2}{2a^2}}$$

a distribuição de Wigner é negativa em algumas regiões, não fornecendo então um modelo clássico explicitamente local de correlações (BELL, 1986). Ocorrendo então uma violação da desigualdade de CHSH (Clauser, Horne, Shimony e Holt). Bell conclui então que há um problema real de não-localidade com a função de onda da MQ. Esse contexto é uma tradução das ideias de Bell referente ao artigo da Teoria dos Beables Locais, na qual é assumida a suposição de que as duas partículas não devem interferir uma na medição da outra, no caso de localidade. Além disso, a especificação completa da sobreposição dos cones de luz por um Beable permite que a probabilidade dos valores dos beables referentes à uma das partículas não seja alterada ao sabermos uma informação da outra partícula separada espacialmente. Em suma, nesse processo de tradução, Bell acrescentou o argumento de que possivelmente uma distribuição de Wigner negativa teria relação com a não-localidade.

O quarto artigo de Bell selecionado é “Six Possible Worlds of Quantum Mechanics” (1992) publicado no *Foundations of Physics*, no qual introduz o argumento de que as leis físicas conseguem dizer algo sobre como o sistema se desenvolve, mas não consegue explicar como ele deveria começar e ao futuro são atribuídas várias possibilidades que dependeriam de probabilidades. Essa falta de determinismo e uso de probabilidade diferenciam a Mecânica Quântica da Mecânica Clássica. Dessa forma, surgiram muitas visões de sobre como os fenômenos visíveis poderiam ser incorporados em um quadro teórico que fosse coerente. Antes de Bell declarar as seis possíveis interpretações da MQ, ele retoma o experimento da dupla fenda e enfatiza então as discussões e problemas que surgem com ele, principalmente o fato de a descrição desse experimento ser feita (pela MQ comum) em termos ondulatórios (novamente destacando a crítica de Bell à divisão clássica x quântica do mundo). Pois nessa perspectiva, o movimento ondulatório, de alguma forma, controla o movimento do elétron no experimento. É esse argumento que Bell afirma adicionar o indeterminismo a essa teoria, relacionar partícula e onda.

Essa situação do experimento descrito anteriormente fez com que surgissem diferentes visões, que tentavam explicar a interpretação do fenômeno. Essas visões são: pragmática (a divisão entre o mundo clássico e quântico não importa na prática), complementaridade de Bohr (aplicação da teoria para que não tivessem contradições a nível prático), equação de Schrödinger não-linear (aceita, de certa forma, a divisão clássica x quântica, mas não concorda que ela seja bem definida nem constante, o que poderia ser alcançado com uma equação de Schrödinger não-linear), teoria da mente (a divisão entre o “muito grande” e o “muito pequeno” existem, mas está na mente do ser humano, termos clássico e matemática não-linear estão em nossa mente, ela afeta a realidade), teoria da onda piloto de de Broglie-Bohm (partícula é guiada por uma onda que dita as probabilidades, sendo uma teoria determinista, já que a configuração inicial do sistema de partículas de ondas combinadas fixa completamente o desenvolvimento subsequente) e, por fim, a teoria dos muitos mundos (cada possível resultado do experimento existe de fato, mas eles ocorrem em diferentes mundos).

Nesse artigo, assim como na *Epistemological Letters*, Bell segue com as críticas que costuma fazer à descrição ortodoxa da Teoria Quântica, referentes à divisão entre observador e observado e a separação não suficientemente formulada entre quântico e clássico. Porém, quando essa temática da discussão foi inserida por

Bell nesse artigo, trouxe um elemento adicional, criticando um conceito de Bohr e incorporando objetivos próprios que cumpriram o que era proposto no artigo (o que se encaixa no conceito de tradução). A crítica adicional foi em relação ao conceito de complementaridade, que na visão de Bell representa o oposto do que Bohr queria representar, ou seja, ao invés de representar complementos em relação aos conceitos, acabou representando uma contradição (de forma a não ser possível conciliar ou “somar” dois elementos considerados opostos, pois “ou” temos uma coisa “ou” outra). Essa transformação e adição de elementos na ideia original de Bell ocorreu para conectar melhor o argumento da *Epistemological Letters* e o artigo em questão.

Alguns outros argumentos e elementos aparecem de forma semelhante nesse artigo quando comparado à *Epistemological Letters*, além desse impasse da divisão entre o macro e o micro não ser bem definida. A falta de explicações a respeito do que acontece durante o fenômeno também é algo que se mantém, sendo que a MQ explica o antes (canhão de elétrons jogando eles pelas fendas) e o que foi observado (padrão de interferência), mas não explica de fato o que ocorreu nesse meio tempo. Os fenômenos explicados obviamente transcendem à mecânica clássica, porém as explicações se utilizam de conceitos que vem dessa teoria, sem uma prescrição de como podemos compreender a “conversão” dessas interpretações. As explicações de Bell na *Epistemological Letters* geralmente utilizavam exemplos de pares de partículas que estavam de certa forma conectadas, mas no caso desse artigo, Bell acabou transportando significado de forma a modificá-lo, direcionando o interesse para outro exemplo clássico da MQ, o experimento da fenda dupla. Essa tradução ocorreu de forma que o autor precisou transformar suas opiniões anteriores para que coubessem no contexto do experimento, com a relação de onda ou partícula. Essa modificação ocorre quando dá sua interpretação de como a Teoria de de Broglie-Bohm e Everett explicariam esse fenômeno.

Bell ainda reforça que vê relações entre a teoria da onda-piloto e a de muitos mundos de Everett, apesar dele achar que a de de Broglie-Bohm está mais próxima de explicar os fenômenos quânticos de forma clara e determinista. Além disso, adiciona mais um elemento para fortalecer suas ideias quanto à crítica da MQ usual, afirmando que a teoria de Everett adiciona algo a mais, em sua opinião, na função de onda. Ela adiciona a “falta de classificação das probabilidades”, pois a função de onda não dá indícios de que a realidade vivida seja uma cintilação (pois o que poderia estar

acontecendo era um brilho prolongado no aparato que se divide entre os muitos mundos possíveis, dando a impressão de algo pontual).

A Teoria dos Beables Locais não teve muitas discussões na época da publicação de Bell, as discussões mais aprofundadas sobre esse artigo se deram na própria *Epistemological Letters*, onde Bell recebeu algumas críticas e/ou pôde solucioná-las e respondê-las. A publicação posterior ao periódico em questão ocorreu na revista “*Dialectica*”, sendo esta na forma de uma coletânea dos artigos da *Epistemological Letters* que discutiram a questão dos Beables, sendo esse detalhe uma importante verificação de que posteriormente os assuntos discutidos na revista foram difundidos a partir de outros periódicos, dessa vez, oficiais.

A partir do século XIX, retomando o referencial da seção 3.2, a comunicação científica passou a ser base para aceitação de teorias e discussões, sendo que essa comunicação ocorria, dentre outras formas, através dos periódicos. Com o passar do tempo, a revisão por pares foi estabelecendo padrões para a escrita de artigos e tornando a aceitação para publicação uma aceitação, também, da teoria proposta, para a comunidade de cientistas. Porém, no período em que a *Epistemological Letters* surgiu, alguns assuntos eram vistos com certas reticências pela comunidade científica, dentre eles os assuntos que discutissem os fundamentos da Teoria Quântica. Dessa forma, os periódicos oficiais que tinham o objetivo de estabelecer uma segurança e rigor às publicações, começaram a ter um caráter inibidor, principalmente com aspectos que “escapassem” dos paradigmas vigentes na época.

Os assuntos discutidos na *Epistemological Letters* eram considerados temas de subcultura quântica, por vezes também “questões metafísicas”. Foi justamente o caráter inibidor que os periódicos oficiais (que deveriam, na verdade, encorajar publicações de teorias emergentes) tinham, que criaram a necessidade de locais informais para que essas discussões pudessem ocorrer. O papel dos periódicos não-oficiais passou a ser veicular teorias que não pudessem circular em periódicos oficiais devido às restrições criadas. Esse fato não tornava os periódicos não-oficiais “menos confiáveis”, só permitia que temas específicos pudessem ser debatidos com mais liberdade antes que fossem publicados em outros locais. A partir do momento em que um paradigma ou teoria hegemônica começa a limitar a comunicação, limita também, por consequência, as teorias que têm maior possibilidade de aceitação pela comunidade científica. Pelo menos até que ocorra um ponto de revolução.

A comparação entre os artigos de Bell na *Epistemological Letters* como os argumentos que foram expostos em seus trabalhos futuros nos periódicos oficiais, permitiu verificarmos as traduções que ocorreram ao longo do tempo. Na maioria das vezes as traduções ocorreram de forma a adicionar argumentos às ideias de Bell sem, obviamente, mudar a essência do que o autor acreditava. Todos esses argumentos e elementos adicionais foram para fortalecer o que já havia dito na *Epistemological Letters*, por vezes modificando o teor das relações as quais estabelecia e por vezes adaptando ao público que seria contemplado pelo trabalho. Apesar de Bell considerar alguns elementos da TQ ortodoxa “mal explicados” (como a questão do observador ou a divisão entre clássico e quântico dado pela equação de Schrödinger), seu Teorema acabou corroborando para a confirmação das previsões da TQ, através da não-localidade e a adaptação que sua desigualdade teve para testes em laboratório.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo desenvolvido em torno da *Epistemological Letters* permitiu compreendermos e rastreamos as redes em torno de um dos temas mais importantes da Teoria Quântica e, mais especificamente, das contribuições de um dos Físicos que permitiu que os Fundamentos da TQ fossem trazidos novamente para o primeiro plano. Os próprios artigos de Bell, apesar de dois deles terem sido publicados anteriormente à publicação na E. L., receberam críticas no periódico, permitindo que o autor fortalecesse seus argumentos e pudesse interagir com outros físicos que compartilhavam (ou não) da sua opinião. Ao longo das edições é possível verificar as relações que Bell criou e as associações que permitiram que o teorema se tornasse um fato estabilizado. Conforme visto no tópico 5.3, as publicações referentes ao teorema de Bell e a não-localidade foram cada vez mais se tornando uma questão de fato, na qual a estabilização pôde ser identificada pela relação de menções e referências. Na medida em que a primeira aparecia, a segunda cada vez menos era relacionada ao Teorema de Bell, de forma que ele se tornou, nesse estudo da *Epistemological Letters*, um conceito/actante estabilizado. Além disso, o Teorema de Bell geralmente aparece com explicações desconexas do contexto da época e as críticas as quais o trabalho de Bell recebeu, sendo estas prejudiciais até mesmo à sua carreira.

A estabilização do Teorema de Bell tornou cada vez mais evidente, até mesmo por experimentos realizados posteriormente ao ano de 1964 e o considerado a prova final (ASPECT; DALIBARD; ROGER, 1982), a impossibilidade da existência de variáveis ocultas locais que complementassem a TQ usual, mostrando que esta era de fato não-local, corroborando para as previsões que a Teoria Quântica já tinha. Essa impossibilidade de existência de Variáveis Ocultas Locais possibilitou o surgimento de uma teoria de Variáveis Ocultas com caráter Não-Local. A violação do Teorema de Bell modificou, para muitos, a forma como a realidade é vista, já que não podemos considerar nada como pré-estabelecido na Teoria Quântica (na questão dos resultados de medições), o que era justamente a crítica realizada por Einstein, Podolsky e Rosen. Sendo necessário abandonar o Realismo ou aceitar a não-localidade ou, ainda, os dois.

A Teoria Ator-Rede foi de grande utilidade para as considerações e metodologias ao longo do desenvolvimento do trabalho. Porém, em contrapartida, foi

possível observar limitações em seu uso. A TAR necessita de aprofundamento nos tópicos e situações da controvérsia trabalhada, o que acabou, por questão de tempo, fazendo com que tivéssemos que afunilar e focar nossa pesquisa a respeito do objeto de estudo (*Epistemological Letters*) em somente um dos autores e os temas aos quais ele debatia. Dessa forma, outros referenciais possibilitariam uma visão mais geral do periódico e até, talvez, um debate sobre todos os temas e autores envolvidos na revista. Isso permitiria estabelecermos uma relação mais geral, porém não tão completa, de todas as discussões da *Epistemological Letters* e suas possíveis implicações no desenvolvimento da Teoria Quântica.

Esta pesquisa considerou diversos fatores além do contexto histórico e os atores envolvidos na controvérsia, permitindo que fossem evidenciados aspectos como a importância do próprio periódico, a estabilização e evolução do teorema de Bell na *Epistemological Letters*, os temas debatidos e a própria importância dada à simbologia do formalismo da Teoria Quântica. Esses fatores identificados anteriormente demonstram a igual importância que foi empregada tanto aos atores humanos quanto não-humanos, da teoria de Bruno Latour, seguindo a Antropologia Simétrica do autor. Além disso, a Física e a Filosofia foram conectadas, sem que houvesse uma divisão entre os limites da Teoria Quântica os aspectos filosóficos que a envolviam. Retomando o tema, pelos diversos porta-vozes (seja da Teoria Quântica ou em relação ao paradoxo EPR) que tomavam a frente dos debates, foi perceptível a compreensão de que o tema discutido no periódico se tratava de uma controvérsia.

A Leitura de alguns livros, utilizados como fonte secundária, durante a leitura sobre o contexto da Teoria Quântica revelaram a possível importância e o tema que as *Epistemological Letters* poderiam fornecer. Dessa forma, o “grupo”⁹ ao qual a pesquisa se desenvolveu não havia sido pré-definido. Somente após nos inteirarmos rapidamente sobre o contexto e termos acesso às 36 edições do periódico, que conseguimos verificar quais os grupos que estavam se formando ou modificando sua dinâmica após os debates. Após a leitura e organização das informações, verificamos quais atores tendiam a cada determinado tema ou aspecto debatido. O fato de não termos decidido de antemão quais os atores que estudaríamos permitiu que déssemos mais importância aos debates, o que posteriormente direcionou a pesquisa para o Teorema de Bell.

⁹ Esse aspecto ressalta o que Latour especificou quando apresentou a incerteza quanto a formação de grupos.

As opiniões dos atores que participaram de forma mais ativa do periódico geralmente eram bem definidas, seja em relação ao tema de variáveis ocultas, Teorema de Bell ou os problemas da Teoria Quântica. Porém, essas “ações” e argumentos utilizados se baseavam em questões que haviam estudado ou que estavam pesquisando no momento. Essa rede que permitia a conexão de diversas opiniões sobre as teorias da Mecânica Quântica geralmente se dava por meio dos periódicos, que disseminavam as opiniões dos físicos a respeito das teorias vigentes. Isso permitia que os atores se influenciassem mutuamente, de forma que as ações que eles tomavam não tinham suas origens facilmente rastreadas. Assim, a consideração do aspecto que Latour denomina de “as ações são assumidas” permitiu que fossem observados os elementos direcionados às ações ou ideias envolvidas na *Epistemological Letters*. A questão de as ações serem “responsáveis por um feito” permitiu que identificássemos quais as questões externas que influenciavam nos debates internos do periódico, isso devido ao fato de Latour evidenciar que para que algo seja debatido, é necessário que isso esteja de certa forma alimentando a controvérsia. O item que diz respeito à ação ser humana e não-humano também permitiu que déssemos importância tanto para a relação entre os debates dos autores quanto para as relações dos experimentos, formulações matemáticas e a própria contribuição da *Epistemological Letters* para o desenvolvimento do Teorema de Bell.

As ações e atitudes, que se relacionavam com as opiniões dos autores sobre os temas debatidos e quais perspectivas eram defendidas, acabavam sendo incorporadas por não-humanos, que permitiam a fortificação de um argumento em relação a outro. Por exemplo, as previsões da Teoria Quântica sobre a definição de um resultado somente no momento da medição ou a existência de variáveis ocultas locais foram primeiramente incorporadas através de relações matemáticas que permitiram teorizar isso e posteriormente experimentos que corroboraram para esses fatores. As expressões matemáticas, mais especificamente a desigualdade de Bell, e os experimentos sobre elas, interferiram nas relações de poder a respeito dos argumentos sobre a TQ ser incompleta. Dentre os aspectos que Latour lista para destacar as situações que trazem os “objetos” de volta à cena, o Teorema de Bell e suas consequências estariam relacionados a “rupturas” (de ideias) e o estudo das *Epistemological Letters* estariam relacionados ao “fornecimento de informações importantes sobre relatos históricos”. Isso tudo se refere a terceira incerteza destacada por Latour, sobre os objetos terem agência.

A quarta incerteza, na qual Latour explicitava o conflito entre questões de fato (exatidão) e questões de interesse (parte social) e destacava que essa divisão deveria ser abandonada, também foi incorporada durante a pesquisa. As questões discutidas não distinguiram os elementos naturais e sociais da Teoria Quântica, a visão da situação foi como um todo. Os estudos de John Bell e seus aliados (Clauser, Shimony e etc.) e essa nova discussão sobre os fundamentos da TQ tiveram consequências diretas nas relações sociais que tinham com a comunidade científica e em como suas carreiras seguiriam dali por diante. Além disso, o prestígio devido às publicações dos autores sobre o tema também afetou a questão social, já que alguns periódicos tinham receio de dar espaço para esse tipo de debate. A descoberta de Bell foi muito além da ajuda na área da física, pois possibilitou o avanço em outras áreas, como a informação. Essa relação intrínseca entre as questões de fato e de interesse (parte social e natural) ressaltam o que Latour quer dizer com uma divisão criada artificialmente para diferenciá-las.

O momento de trazer o relato em si, para o primeiro plano (quinta incerteza), diz respeito a escolha de quais atores (humanos e não-humanos) decidimos “seguir” durante a pesquisa e o momento a qual a pesquisa se delimitaria. A escolha, como mencionado anteriormente, foi o estudo da estabilização e tradução do teorema de Bell na *Epistemological Letters*, indo do início do periódico até o período do último artigo filtrado no site “Scopus” (na verificação das possíveis traduções). Além disso, o relato evidenciou uma rede (pessoas envolvidas, experimentos, teorias e relações sociais) que ajudou na compreensão da estabilização do Teorema de Bell. O conceito de associações aparece a todo momento, estabelecendo relações entre os atores humanos, entre atores humanos e não-humanos e as relações específicas entre não-humano e não-humano (a título de exemplo: desigualdade de Bell e os experimentos).

A relação entre Local e Global aparece no contexto geral de desenvolvimento do estudo da *Epistemological Letters*. A redistribuição do Local se deu de forma que cada pequena descoberta ou experimento realizado por um cientista fosse comunicada cada vez a um número maior de outros cientistas, de forma que essas pequenas fronteiras fossem se modificando. Por exemplo, o Teorema de Bell iniciou com os estudos do autor em seus momentos livres, que posteriormente foi sendo explicada à físicos próximos a ele e, em um momento de maior redistribuição desse “local”, o teorema foi para um periódico oficial, no qual vários físicos puderam ter o

conhecimento dessa ideia. Assim da mesma forma foi, provavelmente, anteriormente com o paradoxo EPR e muitas outras teorias na física.

O “Local” diz respeito a culturas específicas de determinados espaços que deveriam ter um espaço conjunto e igualitário em um “Global”. Esses espaços onde os vários “Locais” poderiam se expressar, em nosso caso, pode ser representado (dentre as várias possibilidades) pelos periódicos oficiais. Porém, esse “Global” acabou, ao invés de possibilitar a discussão entre vários Locais, disseminando a ideia de um Local específico (hegemônico) para os outros Locais. Os periódicos deveriam permitir a globalização dos temas, mas acabaram delimitando-os, utilizaram o espaço comum para manter o paradigma vigente. O que permitiu a conexão entre o Local e o Global (que na teoria de Latour leva o nome de conector) foi justamente a *Epistemological Letters*. Pois ao mesmo tempo que trazia teorias hegemônicas, permitia que teorias emergentes fossem discutidas e adotadas por outros físicos, como foi o caso do Teorema de Bell. Isso mostra o quão importante os espaços dos periódicos não-oficiais foram para o desenvolvimento de teorias emergentes.

A Historiografia (mais especificamente, a história cultural) permitiu que além do desenvolvimento do conteúdo conceitual e matemático em torno de Bell, fosse observado o periódico que tornou tudo isso mais evidente e talvez, até mesmo, tenha acelerado a estabilização do teorema de Bell. Além disso, ajudou a compreender o objetivo e a natureza do pensamento científico em questão, o contexto em que Bell formulou sua teoria e quais propósitos queria alcançar. Todo esse contexto mostrou a importância que os periódicos têm no papel de tornar uma ideia um “fato científico” e difundir a ciência entre os vários especialistas da área. Mais especificamente, mostrou como um periódico não oficial contribuiu para o desenvolvimento da ciência, pois foi nele que Bell ganhou voz e pôde debater sobre seu teorema e suas ideias, sem que houvessem restrições às formulações que poderiam aparecer. Os periódicos não-oficiais tiveram um grande papel nesse período em que os físicos, e cientistas no geral, podiam publicar somente o que as teorias hegemônicas consideravam válidas. Isso oportuniza um questionamento muito interessante: “quantas ideias mais não se perderam em meio às barreiras que foram estabelecidas em periódicos oficiais? ”.

Em termos de reflexão educacional, o estudo do teorema de Bell a partir das *Epistemological Letters* pode proporcionar subsídios não tão internalistas da Física, trazendo aspectos políticos, filosóficos, históricos, dentre outros. Esses aspectos, quando relacionados podem contextualizar melhor o desenvolvimento do tema

quando for apresentado em contexto educacional. Além disso, é interessante, ao falar sobre os temas desenvolvidos pela Teoria Quântica, colocá-los em perspectiva histórica, dessa forma entendendo (no caso estudado) quem estava envolvido na controvérsia, quais os elementos mais importantes para seu desenvolvimento, por que e o que realmente foi proposto pelos autores em suas ideias iniciais, como isso se encaixou/afetou a teoria vigente e a comunidade Física e quais as consequências obtidas.

Esse episódio também pode ser utilizado em contexto educacional para mostrar como uma teoria evoluiu conforme a rede de atores envolvidos se expandiu, fazendo com que o teorema de Bell fosse derivado por outros físicos, permitindo a elaboração de experimentos em laboratório que ajudaram a mostrar uma característica até então não revelada da TQ, a não-localidade. Além disso, permite acompanhar como um tema considerado “metafísico”, conseguiu adentrar em laboratórios e posteriormente ser considerado essencial para o desenvolvimento e compreensão de vários aspectos da Teoria Quântica. Isso revela uma outra característica das teorias científicas, que elas podem ser adaptadas e aperfeiçoadas, não são aceitas logo em suas formulações iniciais.

O tema e os conceitos podem ser levados para o contexto pedagógico, mostrando como a relação entre pessoas, objetos (experimentos) e relações matemáticas (desigualdade) podem interferir em outras áreas e como esses elementos se inter-relacionam. A explicação do que originou e do que estava envolvido no desenvolvimento da TQ pode contribuir para seu melhor entendimento. Pode revelar, também, elementos do cotidiano dos cientistas, como a possibilidade de erro, adaptação de suas ideias originais, que elas evoluem e são complementadas e por vezes são rejeitadas e inibidas, mostra que até mesmo físicos com contribuições significativas enfrentaram problemas com seus ideais. Além disso, permite verificar a importância dos meios de comunicação, no caso os periódicos, e como eles têm papel fundamental no desenvolvimento de uma teoria e sua aceitação perante a comunidade científica. Nem sempre a única informação que chega até nós é a verdadeira, existem relações políticas, sociais e hierárquicas que interferem nas teorias as quais temos acesso, delimitando o que pode ser considerado “ciência de verdade”. Como era a questão de debates sobre os fundamentos na época de circulação da *Epistemological Letters*.

Esse estudo em torno da *Epistemological Letters* gerou resultados importantes, dos quais muitos deles foram pontuados em seções anteriores. Além disso, é possível destacar a elaboração de dois artigos (um já publicado), um deles referente à uma reconstrução didática do paradoxo EPR, discutindo as noções necessárias para compreendê-lo e a implicações para o contexto de sala de aula e outro sobre as ideias relacionadas ao teorema de Bell, que segue na mesma linha de tentar simplificar a teoria para que facilite sua entrada nas aulas de graduação. As conclusões obtidas a respeito desse estudo, além de responderem a diversas perguntas, geraram novas questões, as quais podem ser esclarecidas em trabalhos futuros. Dentre elas:

- Como o Teorema de Bell foi traduzido para periódicos oficiais, porém, dessa vez, pela perspectiva de outros autores que fizeram parte da *Epistemological Letters*, como: Shimony, d'Espagnat, Clauser, Costa de Beauregard e Lochak.
- Ainda no contexto da *Epistemological Letters*, seria interessante verificar que outros elementos foram estabilizados pelas discussões ocorridas no periódico.
- Seria interessante verificar também que outros periódicos não oficiais contribuíram para o desenvolvimento da ciência e quais temas eram debatidos neles.
- Por fim, verificar o contexto dos artigos da *Epistemological Letters* pela perspectiva de outros teóricos, para que novos elementos de destaque fossem identificados.

REFERÊNCIAS

ANNA, J. S. Comunicação Científica e o Papel dos Periódicos Científicos no Desenvolvimento das Ciências. **Biblionline**, João Pessoa, v. 15, n. 1, p. 3–18, 2019.

ASPECT, A.; GRANGIER, P.; ROGER, G. Experimental realization of EinsteinPodolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: a new violation of Bell's inequalities. **Physical Review Letters**, [s. l.], v. 49, p. 91–94, 1982.

ASPECT, Alain; DALIBARD, J.; ROGER, G. Experimental test of bell's inequalities using time- varying analyzers. **Physical Review Letters**, [s. l.], v. 49, p. 1804, 1982.

BAGGOTT, J. The quantum story: a history in 40 moments. **Oxford University Press**, Oxford, 2011.

BELL, J. S. de Broglie-Bohm, Delayed-Choice, Double-Slit Experiment, and Density Matrix. **International Journal of Quantum Chemistry: Quantum Chemistry Symposium**, [s. l.], v. 14, p. 155–159, 1980.

BELL, J. S. EPR Correlations and EPW Distributions. **The New York Academy of Sciences**, [s. l.], v. 480, n. 1, p. 263–266, 1986.

BELL, J. S. Free Variables and Local Causality. **Epistemological Letters**, Bienne, n. 15, p. 79–84, 1977.

BELL, J. S. On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*. **Physics Physique Fizika**, [s. l.], v. 1, p. 195–200, 1964.

BELL, J. S. On the Hypothesis that the Schrödinger Equation is Exact. **Epistemological Letters**, [s. l.], n. 20, p. 1–28, 1978.

BELL, J. S. On the Impossible Pilot Wave. **Foundations of Physics**, [s. l.], v. 12, n. 10, p. 989–999, 1982.

BELL, J. S. On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics. **Reviews of Modern Physics**, [s. l.], v. 38, p. 447, 1966.

BELL, J. S. Six Possible Worlds of Quantum Mechanics. **Foundations of Physics**, [s. l.], v. 22, n. 10, p. 1201–1215, 1992.

BELL, J. S. The Theory of the Local Beables. **Epistemological Letters**, Bienne, n. 9, p. 11–24, 1976.

BERTLMANN, R. A.; ZEILINGER, A. **Quantum (Un)speakables: From Bell to Quantum Information**. 1. ed. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002.

BOHM, D. A suggested interpretation of the Quantum Theory in terms of “hidden” variables. **Physical Review**, [s. l.], v. 85, n. 2, p. 166–179, 1952a.

BOHM, D. A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of “Hidden” Variables. II. **Physical Review**, [s. l.], v. 85, n. 2, p. 180–193, 1952b.

BORN, G. V. R. **The Born-Einstein Letters**. London: The Macmillan Press Ltd, 1971.

BUERWELL, J. **Quantum Language and the Migration of Scientific Concepts**. London: The MIT Press, 2018.

CALLON, M. Some elements of a sociology of translation: Domestication of the scallops and the fishermen of Saint-Brieuc Bay. **The Sociological Review**, [s. l.], v. 32, p. 196–233, 1984.

CHRISTIE, J. The development of the historiography of science. *In*: Companion to The History of Modern Science. Londres: Rutledge, 1990.

CLAUSER, J. F.; SHIMONY, A. Bell’s theorem: Experimental tests and implications. **Reports of Progress in Physics**, [s. l.], v. 41, n. 12, p. 1881–1927, 1978.

CRUZ, J. A. da; LIMA, N. W. **Princípio da Complementaridade em Livros Didáticos**

do Ensino Superior: Uma Discussão à Luz da Sociologia Simétrica da Educação em Ciências. Florianópolis: XVIII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, 2020.

D'ASSUNÇÃO, J. B. História Cultural: um panorama teórico e historiográfico. **Textos de História. Revista do Programa de Pós-graduação em História da UnB.**, [s. l.], v. 11, p. 145–171, 2003.

EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B.; ROSEN, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? **Physical Review**, [s. l.], v. 47, n. 10, p. 777–780, 1935.

EVERETT III, H. "Relative State" formulation of Quantum Mechanics. **Reviews of Modern Physics**, [s.l.], v. 29, n. 3, p. 452–462, 1957. [On the Foundations of Quantum Mechanics, Tese, Doutorado em Física, Princeton, 1957]

FREEDMAN, S. J.; CLAUSER, J. F. Experimental test of local hidden-variable theories. **Physical Review Letters**, [s. l.], v. 28, p. 938–941, 1972.

FREIRE JR., O. A story without an ending: The quantum physics Controversy 1950–1970*. **Science & Education**, [s. l.], n. 12, p. 573–586, 2003.

FREIRE JR., O. **David Bohm: a life dedicated to understanding the quantum world**. 1. ed. New York: Springer, 2019.

FREIRE JR., O. **The quantum dissidents: Rebuilding the foundations of quantum mechanics (1950-1990)**. New York: Springer, 2015.

FREIRE JR., O.; PESSOA JR., O.; BROMBERG, J. L. **Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais**. São Paulo: EDUEPB, 2011.

FRY, E. S.; THOMPSON, R. C. Experimental test of local hidden-variable theories. **Physical Review Letters**, [s. l.], v. 37, p. 465–468, 1976.

GOMATAM, R. Niels Bohr's interpretation and the Copenhagen interpretation - Are the two incompatible? **Philosophy of Science**, [s. l.], v. 74, n. 5, p. 736–748, 2007.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma proposta para o ensino de mecânica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 444-457, 2001.

GRIFFITHS, D. J. **Introduction to Quantum Mechanics**, 2ª ed. London: Pearson, 2005.

GUSTERSON, H. Quantum Outsiders. **Nature**, [s. l.], v. 476, p. 4, 2012.

HAIR, J. F. *et al.* Escalonamento Multidimensional e Análise de Correspondência. *In*: ANÁLISE MULTIVARIADA DE DADOS. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HOGLUND, N.; JACOBSON, O. “Bells Theorem and Inequalities, with Experimental Considerations”, Royal Institute of Technology (KTH), 2013.

HOLANDA, A. F. da C. **Jornalismo no Tablet: os primeiros anos analisados pela Teoria Ator-Rede**. Curitiba: Appris, 2018.

HOWARD, D. Who invented the “Copenhagen interpretation”? A study in mythology. **Philosophy of Science**, [s. l.], v. 71, n. 5, p. 669–682, 2004.

HOWARD, D.; RAMIREZ, S. M. **Introduction to the Epistemological Letters**. [S. l.: s. n.], 2019. Available at: <https://curate.nd.edu/show/nz805x2535c>

JOHANSSON, A. *et al.* “Shut up and calculate”: the available discursive positions in quantum physics courses. **Cultural Studies of Science Education**, [s. l.], v. 13, p. 205–226, 2018.

KAISER, D. **How the hippies saved physics: science, counterculture, and the quantum revival**. New York: W. W. Norton Company, 2011.

KRAGH, H. **An Introduction to the Historiography of Science**. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

KUHN, T. S. **A Tensão Essencial**. 1. ed. São Paulo: Editora Unesp, 2011.

KUHN, T. S. **The Structure of Scientific Revolutions**. 3. ed. Chicago: University of Chicago Press, 1966.

KWAIT, P. G. *et al.* New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs. **Physical Review Letters**, [s. l.], v. 75, p. 4337–4341, 1995.

LATOUR, B. **A Esperança de Pandora: Ensaio sobre a realidade dos estudos científicos**. Bauru: EDUSC, 2001.

LATOUR, B. **Jamais fomos modernos**. Rio de Janeiro: Editora 34, 1984.

LATOUR, B. **Onde aterrar? Como se orientar politicamente no Antropoceno**. 1. ed. Rio de Janeiro: Bazar do tempo, 2020.

LATOUR, B. **Reagregando o Social: Uma introdução à Teoria Ator-Rede**. Bahia: EDUFBA, 2012.

LATOUR, B. **The pasteurization of France**. Massachusetts: Harvard University Press, 1988.

LATOUR, B.; WOOLGAR, S. **Vida de Laboratório: A produção de Fatos Científicos**. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 1997.

LAW, J. On power and its tactics: a view from the sociology of science. **The Sociological Review**, v. 34, n. 1, p. 1-38, 1986.

LIGHTMAN, B. **A Companion to the History of Science**. 1. ed. Massachusetts: Blackwell Companions to History, 2016.

LIMA, N. W. *et al.* Educação em Ciências nos Tempos de Pós-Verdade: Reflexões Metafísicas a partir dos Estudos das Ciências de Bruno Latour. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 19, p. 155-189, 2019.

LIMA, N. W.; NASCIMENTO, M. M. Not Only Why but Also How to Trust Science: Reshaping Science Education Based on Science Studies for a Better Post-pandemic World. **Science & Education**, 2022.

LIMA, N. W.; NASCIMENTO, M. M.; MOURA, C. B. Epistemic and Political Confrontations Around the Public Policies to Fight COVID-19 Pandemic. **Science & Education**, [s. l.], v. 30, p. 501–525, 2021.

LIMA, N. W.; OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. de H. A não-modernidade de Bruno Latour e suas implicações para a Educação em Ciências. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 367-388, 2018.

LIMA, N. W.; OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. de H. Física Quântica no ensino médio: uma análise bakhtiniana de enunciados em livros didáticos de Física aprovados no PNLDEM2015. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 435-459, 2017.

LIMA, N. W.; ROSA, G. G.; BENTO, M. R. Translations, Betrayals and Controversies in the Articulation of The Uncertainty Principle: Potentialities and Challenges of a Symmetrical History of Physics. **Transversal: International Journal for the Historiography of Science**, [s. l.], v. 9, p. 1–19, 2020.

MERMIN, N. D. Is the moon there when nobody looks? Reality and the Quantum Theory. **Physics Today**. v. 9, n. 4, p. 38-47, 1985.

MOURA, C. B. *et al.* Articulando narrativas contra-hegemônicas sobre a ciência : uma proposta de aproximação entre a História Cultural da Ciência e a Sociologia Simétrica. **XII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**, Natal, p. 1–7, 2019.

NASCIMENTO, M. M. *et al.* Métodos Quantitativos Interpretativos na Educação em Ciências: Abordagens para Análise Multivariada de Dados. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, [s. l.], v. 19, p. 775–800, 2019.

NEUMANN, J. Von. **Mathematical Foundations of Quantum Mechanics**. 1. ed. Berlin: Julius Springer, 1932.

OU, Z. Y.; MANDEL, L. Violation of Bell's inequality and classical probability in a two-photon correlation experiment. **Physical Review Letters**, [s. l.], v. 61, p. 50–53, 1988.

PÉREZ, D. G. *et al.* Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação (Bauru)**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 125–153, 2001.

PERON, T. da S.; MORAES, A. G. de. A História Cultural da Ciência, Cinema e o Ensino das Leis de Newton. **X Congresso Internacional Sobre Investigación en didáctica de las Ciencias**, [s. l.], p. 3809–3813, 2017.

PERON, T. S.; MORAES, A. G. de. Construindo a Caixa-Preta da Dualidade Onda-Partícula de Louis de Broglie em Sala de Aula. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, [s. l.], v. 21, p. 1–30, 2021.

PESSOA JR., O. Consequências filosóficas da desigualdade de Bell. *In*: CHEDIK K., VIDEIRA A. A. P. **Temas de Filosofia da Natureza**. Rio de Janeiro: UERJ, 2004. p. 93.

RAMIREZ, S. M. On how Epistemological Letters changed the foundations of quantum mechanics. *In*: FREIRE JR, O. **The Oxford Handbook of the History of Quantum Interpretations**. Oxford: Oxford University Press, 2022. p. 755–776.

SCHRÖDINGER, E. Discussion of Probability Relations between Separated Systems. **Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 555–563, 1935.

SHAPIN, S.; SCHAFFER, S. **Leviathan and the Air-Pump**. Princeton: Princeton University Press, 1985.

SHIH, Y. H.; ALLEY, C. O. New type of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm experiment using pairs of light quanta produced by optical parametric down conversion. **Physical Review Letters**, [s. l.], v. 61, p. 2921–2924, 1988.

TAPSTER, P. R.; RARITY, J. G.; OWENS, P. C. M. Violation of Bell's inequality over 4 km of optical fiber. **Physical Review Letters**, [s. l.], v. 7, p. 1923–1926, 1994.

TENOPIR, C.; KING, D. W. A importância dos periódicos para o trabalho científico. **Revista de Biblioteconomia de Brasília**, Brasília, v.25, n. 1, p. 15-26, 2001.

TITTEL, W. *et al.* Violation of Bell inequalities by photons more than 10 km apart. **Physical Review Letters**, [s. l.], v. 81, p. 3563–3566, 1998.

UNIVERSITY, N. D. **Quantum Interest.**, 2019. Available at: <https://www.nd.edu/stories/quantum-interest/>.

VENTURINI, T. Diving in magma: How to explore controversies with actor-network theory. **Public Understanding of Science**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 258–273, 2010.

VIDEIRA, A. A. P. Historiografia e História da Ciência. **Revista da Fundação casa Rui Barbosa**, [s. l.], n. 1, p. 111–158, 2007.

WAGNER, R. *et al.* O que é o paradoxo EPR? Uma reconstrução didática do artigo de Einstein, Podolsky e Rosen. **Revista de Enseñanza de la Física**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 167–182, 2021.

WEIHS, G. *et al.* Violation of Bell's inequality under strict Einstein locality conditions. **Physical Review Letters**, [s. l.], v. 81, p. 5039–5043, 1998.

WHITAKER, A. **The New Quantum Age**. New York: Oxford University Press, 2012.

WIGNER, E. P. The Problem of Measurement. **American Journal of Physics**, [s. l.], v.31, n. 1, p.6-15, 1963.

ANEXO A – O QUE É O PARADOXO EPR? UMA RECONSTRUÇÃO DIDÁTICA DO ARTIGO DE EINSTEIN, PODOLSKY E ROSEN (ARTIGO ORIGINAL)



VOLUMEN 33, NÚMERO 3 | JULIO-DICIEMBRE 2021 | PP. 167-182

ISSN: 2250-6101



O que é o paradoxo EPR? Uma reconstrução didática do artigo de Einstein, Podolsky e Rosen

What is the EPR paradox? A didactic reconstruction of the article by Einstein, Podolsky and Rosen

Ramon Wagner^{1*}, Alfonso Werner da Rosa², Nathan Willig Lima¹, Matheus Monteiro Nascimento¹

¹Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 9500 - Caixa Postal 15051 - CEP 91501-970 - Porto Alegre, RS, Brasil.

²Faculdade de Educação, Universidade de Passo Fundo, BR 285, São José – CEP 99052-900 – Passo Fundo, RS, Brasil.

*E-mail: ramonwagner1934@hotmail.com

Recibido el 16 de julio de 2021 | Aceptado el 18 de noviembre de 2021

Resumo

O objetivo deste trabalho é proporcionar uma reconstrução didática do artigo de Einstein, Podolsky e Rosen, introduzindo os aspectos teóricos necessários para a compreensão do trabalho (os quais usualmente são apresentados nas fases iniciais dos cursos de Mecânica Quântica), discutindo a estrutura do argumento original e explicando o paradoxo a partir das próprias colocações retiradas do artigo. A partir da apresentação que estamos propondo, o paradoxo EPR pode ser apresentado em disciplinas introdutórias de Mecânica Quântica da graduação (para bacharelado e licenciatura), viabilizando a compreensão da discussão sobre a completude da teoria quântica proposta por Einstein, Podolsky e Rosen e o entendimento da gênese do conceito que, posteriormente, ficaria conhecido como emaranhamento quântico.

Palavras-chave: EPR; Teoria quântica; História e filosofia; Fontes primárias; Emaranhamento.

Abstract

The objective of this work is to provide a didactic reconstruction of the article by Einstein, Podolsky e Rosen, introducing the theoretical aspects necessary for the understanding of the work (which are usually presented in the initial phases of Quantum Mechanics courses), discussing the structure of the original argument and explaining the paradox from the very statements taken from the article. Based on the presentation we are proposing, the EPR paradox can be presented in introductory undergraduate courses in Quantum Mechanics (for bachelors and licentiate degrees) enabling the understanding of the discussion on the completeness of quantum theory proposed by Einstein, Podolsky and Rosen and by the genesis of the concept that would later become known as quantum entanglement.

Keywords: EPR; Quantum theory; History and philosophy; Primary sources; Entanglement.

www.revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF

REVISTA DE ENSEÑANZA DE LA FÍSICA, Vol. 33, no. 3 (2021)

167

I. INTRODUÇÃO

No início do século XX, diferentes estudos sobre a natureza da radiação e da matéria culminaram no que hoje denominamos Teoria Quântica (TQ). Entende-se, de uma forma geral, que a primeira formulação axiomática¹ da TQ tenha sido proposta por von Neumann (1932) e, até hoje, no contexto didático, são apresentadas reformulações dessa abordagem postulacional (Cohen-Tannoudji, Diu e Laloë, 1977; Freire Jr., 2011; Ostermann, Pereira, Cavalcanti e Pessoa Jr, 2012). A interpretação desse formalismo matemático, entretanto, foi alvo de disputa não somente na gênese da Teoria (Jammer, 1974) bem como vem suscitando confrontos na comunidade de físicos ao longo de toda história da TQ (Freire, 2015).

Um episódio importante nessa história foi a conferência de Solvay, em 1927, na qual foi protagonizado um grande debate entre Einstein e Bohr sobre a interpretação da Teoria². Embora se considere que Bohr tenha saído vitorioso, dando origem ao que ficou conhecido posteriormente como Interpretação da Complementaridade³ (Cushing, 1994; Howard, 2004), Einstein seguiu descontente não somente com a descrição indeterminista da realidade; mas, sobretudo, com o que – posteriormente – ele explicitou como um afastamento da visão de mundo realista⁴.

Um dos principais argumentos de Einstein contra a interpretação da Complementaridade e a favor de uma interpretação realista da TQ foi apresentado em seu artigo intitulado “*A descrição da realidade física fornecida pela mecânica quântica pode ser considerada completa?*”, escrito em 1935 juntamente com Boris Podolsky e Nathan Rosen (1935). As discussões trazidas nesse trabalho ficaram conhecidas, posteriormente, como o paradoxo EPR.

Alguns livros didáticos tradicionais de TQ abordam o paradoxo EPR (Auletta, Fortunato e Parisi, 2009; Gottfried e Yan, 2003; Griffiths, 2011), adotando, entretanto, um formalismo matemático diferente ou analisando situações diferentes com relação ao que foi apresentado no trabalho original – usualmente em partes mais avançadas dos cursos. Por isso, muitas vezes o paradoxo EPR não é tratado em disciplinas de graduação, principalmente na licenciatura em Física, apesar de sua importância histórica. Ademais, na área de Ensino de Física, alguns trabalhos também discutem o paradoxo EPR (Griffiths, 1987; Reisler, 1971) – mas não apresentam uma reconstrução didática do trabalho original.

Nesse sentido, buscando contribuir para o ensino de TQ, nosso objetivo, no presente trabalho, é apresentar uma reconstrução didática do artigo de Einstein, Podolsky e Rosen, explicitando quais são seus pressupostos e qual é a estrutura do argumento; valendo-se do exemplo e do formalismo do próprio trabalho. Reproduzindo, assim, de forma didática a discussão original. Discutimos, também, as consequências que o paradoxo EPR trouxe no desenvolvimento da TQ.

Conforme argumentamos, tal abordagem permite que o paradoxo EPR seja tratado em fases mais iniciais da formação de físicos (bacharéis e licenciados). Ademais, o presente trabalho se alinha com a perspectiva de que trazer fontes históricas primárias pode contribuir para enriquecer o ensino da TQ, permitindo que os alunos de graduação tenham contato com as ideias dos autores, suas argumentações, objetivos e preocupações (Karam, 2020; Lima, Cavalcanti e Ostermann, 2021; Lima e Karam, 2021).

Para fazer tal apresentação, na seção II, apresentamos fundamentos da TQ, passando pelo formalismo necessário para a compreensão dos principais elementos abordados no artigo EPR. Ao fazer isso, pretendemos conectar a discussão subsequente, sobre o artigo EPR, com tópicos vistos nos cursos e livros tradicionais de TQ. Na seção III, abordamos o paradoxo EPR em si, abrangendo a estrutura do argumento utilizado no artigo original, o experimento mental que foi proposto pelos autores, a descrição do problema e, por fim, as conclusões que Einstein, Podolsky e Rosen chegaram. Na seção IV, é apresentada uma discussão acerca do argumento utilizado no artigo EPR e suas implicações no desenvolvimento da TQ. Por fim, na seção V, fazemos nossas considerações finais apresentando algumas sugestões para o uso dessa discussão nos cursos de TQ em nível de graduação, tanto para bacharelado quanto para licenciatura em Física.

¹ A formulação axiomática se refere à organização da teoria em uma sequência de postulados, os quais não necessitam de demonstração para que sejam aceitos. É um trabalho que busca elaborar e sintetizar a Teoria Quântica (Bunge, 2007)

² Parte da discussão entre Einstein e Bohr pode ser encontrada no livro “Teoria atômica e descrição da Natureza” (Niels Bohr, 1934)

³ Existe na literatura uma distinção entre Interpretação da Complementaridade de Bohr e a Interpretação de Copenhague (Gomatam, 2007). No presente artigo vamos nos referir ao termo Interpretação da Complementaridade. A Interpretação da Complementaridade possui três diferentes proposições (Jammer, 1966) complementaridade onda-partícula (natureza dual da radiação e matéria), a complementaridade paralela (duas grandezas de um mesmo modelo físico não podem ser medidas com precisão absoluta) e complementaridade circular (complementaridade entre a descrição dada pela equação de Schrödinger e a realizada por uma medição experimental).

⁴ Para uma visão realista, o ente real existe “em si”, independente do nosso conhecimento (Bunge, 1973). A visão de mundo realista de Einstein, mais especificamente, trata da capacidade de predizermos com 100% de probabilidade o valor de uma quantidade Física, independente da forma como é realizada a medição.

II. FUNDAMENTOS DA TEORIA QUÂNTICA

Nessa seção, apresentamos alguns elementos fundamentais para compreensão da discussão do paradoxo EPR. Para tanto, referimo-nos a alguns conceitos usualmente apresentados em cursos de TQ. Primeiramente, apresentamos os conceitos (subseção A) e, na sequência, apresentamos a descrição de uma partícula livre (subseção B).

A. Principais elementos usados por Einstein, Podolsky e Rosen

Para compreender o argumento presente no artigo escrito por Einstein, Podolsky e Rosen, mapeamos seis conceitos fundamentais de TQ, os quais apresentamos na sequência, em diálogo com textos didáticos contemporâneos.

A.1. Estados e função de onda

Em diferentes teorias físicas, existem representações matemáticas específicas nas quais podem-se encontrar as informações sobre o sistema físico. Por exemplo, na Mecânica Clássica, ao conhecer a lagrangeana ou a hamiltoniana é possível descrever a evolução mecânica do sistema. Na termodinâmica, ao conhecer a função entropia ou a energia interna que descreve o sistema (ou qualquer potencial termodinâmico), podemos obter todas as informações sobre o sistema.

Na TQ, o conceito fundamental é o de *estado quântico*, representado por uma *função⁵ de onda*. Ao conhecer a função de onda, podemos obter todas as informações possíveis sobre um sistema. Einstein, Podolsky e Rosen falam sobre *estado* da seguinte forma:

Para ilustrar as ideias envolvidas, vamos considerar a descrição mecânico-quântica do comportamento de uma partícula com um único grau de liberdade. O conceito fundamental da teoria é o conceito de estado, que deveria ser completamente caracterizado pela função de onda ψ , que é uma função das variáveis escolhidas para descrever o comportamento da partícula. (Einstein et al., 1935, p. 778)

Se estamos descrevendo a função de onda na representação da posição, temos uma função $\Psi(x, t)$ para descrever o sistema. Como veremos na sequência, essa função pode ser obtida a partir da solução da Equação de Schrödinger juntamente com condições iniciais e de contorno. A $\Psi(x, t)$ tem natureza complexa de forma que para conectar a descrição matemática com os resultados empíricos também será necessário usar a função complexo-conjugada $\Psi^*(x, t)$.

A.2. Interpretação probabilística da função de onda

De acordo com a interpretação estatística de Born, assumimos que a probabilidade de encontrarmos uma partícula, em um problema unidimensional, entre dois pontos a e b é apresentada no artigo da seguinte forma:

De acordo com a mecânica quântica, podemos dizer que a probabilidade relativa de que uma medição da coordenada terá resultado situado entre a e b é:

$$P(a, b) = \int_a^b \bar{\psi}\psi dx = \int_a^b dx = b - a$$

Como essa probabilidade é independente de a , mas depende apenas da diferença $b - a$, vemos que todos os valores de coordenada são possíveis. (Einstein et al., 1935, p. 778)

Se integramos essa função entre os limites de $-\infty$ e $+\infty$ a probabilidade de a partícula estar nesse intervalo é de 100%:

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(x, t)|^2 dx = 1 \quad (1)$$

⁵ A descrição dos sistemas físicos na Teoria Quântica é dada por meio de um objeto matemático denominado vetor de estado, conceito que substitui as posições e velocidades na Mecânica Clássica (Laloë, 2001). O vetor de estado não é uma propriedade de um sistema físico, mas um procedimento experimental para testar e/ou preparar sistemas físicos.

A.3. Observáveis e operadores

Na TQ, existem algumas propriedades do sistema que podem ser determinadas a partir de uma sequência de operações físicas ou medições, “correspondendo a cada quantidade fisicamente observável A existe um operador, que pode ser designado pela mesma letra” (Einstein *et al.*, 1935, p. 778). Essas propriedades podem ser representadas por letras maiúsculas (exemplo: A, B, X Y) ou letras com acento circunflexo (exemplo: \hat{p} , \hat{q} , \hat{E}) e levam o nome de “observáveis”. Os operadores que representam grandezas físicas observáveis podem atuar sobre as funções de onda. Alguns exemplos de operadores que representam os observáveis posição, momento, energia mecânica e energia cinética são respectivamente (Griffiths, 2011):

$$\hat{q} = x \quad (2)$$

$$\hat{p} = \frac{\hbar}{2\pi i} \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$\hat{E} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \quad (4)$$

$$\hat{K} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \quad (5)$$

Para que um operador possa representar uma grandeza observável ele precisa ser, necessariamente, um operador auto-adjunto (hermitiano)⁶. Na TQ matricial, em que os operadores são representados por matrizes, a matriz que representa um operador hermitiano é igual à sua transposta conjugada. Tal condição garante que os autovalores associados à medição (o que será discutido no próximo item) sejam números reais. O valor esperado (valor médio) de um observável $Q(p, x)$ pode ser expresso da seguinte forma (Griffiths, 2011)

$$\langle Q \rangle = \int \Psi^* Q \Psi dx \quad (6)$$

A.4. Decomposição espectral e medidas

As autofunções de um operador hermitiano se dividem em duas categorias, dependendo se o espectro do operador é discreto ou contínuo. No primeiro caso, quando os autovalores formam um conjunto discreto, as autofunções estão no espaço de Hilbert e constituem estados realizáveis fisicamente (são quadrado-normalizáveis). No segundo caso, quando os autovalores estão distribuídos em um intervalo contínuo, as autofunções não são quadrado-normalizáveis (no entanto, é possível formar pacotes de onda que sejam normalizáveis) e, portanto, não representam funções de onda possíveis.

Ademais, os espectros discretos têm duas propriedades importantes, seus autovalores são reais e as autofunções pertencentes a autovalores distintos são ortogonais.

Adicionando a condição de ortogonalidade mais a condição de normalização (ortonormalidade) é possível expressar

$$\int \psi_m^*(x) \psi_n(x) dx = \delta_{mn} \quad (7)$$

Para os espectros contínuos, embora as funções não sejam ortogonais no sentido usual, obtém-se uma outra forma de ortonormalidade, denominada ortonormalidade de Dirac (Cohen-Tannoudji *et al.*, 1977):

$$\int \psi_x^* \psi_{x'} dx = \delta(x - x') \quad (8)$$

Como pode ser observado na equação acima, diferentemente da representação da ortonormalidade do espectro discreto, o espectro contínuo tem a sua ortonormalidade expressa na forma de uma delta de Dirac [$\delta(x - x_0)$].

A função delta de Dirac $\delta(x - x_0)$ representa uma distribuição infinitamente alta e infinitesimalmente estreita em x_0 , cuja área é 1.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x - x_0) dx = 1 \quad (9)$$

⁶ Essa afirmação é a mais tradicionalmente difundida. Porém, existem formulações menos restritivas, em que mesmo os operadores não-adjuntos têm autovalores reais (Bender *et al.*, 2003; Mostafazadeh, 2001)

O que é o paradoxo EPR?

Ao multiplicarmos uma função $f(x)$ por $\delta(x - a)$, obtemos o mesmo resultado que seria encontrado ao multiplicar $f(a)$ pela função $\delta(x - a)$, pois o produto será sempre zero (Butkov, 1988), a não ser pelo ponto $f(a)$:

$$f(x)\delta(x - a) = f(a)\delta(x - a) \quad (10)$$

De forma que

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\delta(x - a)dx = f(a) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x - a)dx = f(a) \quad (11)$$

o que é conhecido como propriedade de filtragem da função delta de Dirac. Existem diferentes formas de representar a delta de Dirac. Uma possível forma pode ser obtida por sua representação como uma transformada de Fourier. Lembrando que uma função pode ser expressa pelo par Fourier, dado por

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k)e^{ikx}dk \quad (12)$$

e

$$F(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-ikx}dx \quad (13)$$

Escolhendo então $f(x) = \delta(x)$ em (12):

$$\delta(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k)e^{ikx}dk \quad (14)$$

Então,

$$F(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x)e^{-ikx}dx \quad (15)$$

Utilizando a propriedade de filtragem (11) teremos que $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x)e^{ikx}dx = e^{ik0} = 1$, dessa forma

$$F(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \quad (16)$$

substituindo (16) em (14) tem-se:

$$\delta(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikx}dk \quad (17)$$

resultando na forma integral da função delta de Dirac, a qual é chamada de representação de Fourier da função delta. Quando deslocada da origem, assume a forma

$$\delta(x - a) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ik(x-a)}dk \quad (18)$$

No formalismo da TQ, um sistema físico isolado pode se encontrar em um estado formado pela sobreposição dos autoestados de um determinado operador:

$$\psi(x, t) = c_1\psi_1(x, t) + c_2\psi_2(x, t) + \dots + c_n\psi_n(x, t) \quad (19)$$

em que $\psi_1(x, t)$, $\psi_2(x, t)$ e $c_n\psi_n(x, t)$ são autoestados de um observável. Segundo o postulado de projeção de Von Neumann, quando uma medida de tal observável é realizada, o estado do sistema "colapsa" para um dos possíveis autoestados. A probabilidade da medida resultar no autovalor correspondente ao autoestado ψ_i é dada por $|c_i|^2$ (Sakurai e Napolitano, 2013). Tal fenômeno de passagem de um estado sobreposto para um único autoestado é o que foi denominado colapso da função de onda.

Conforme já mencionamos, a decomposição espectral depende da característica do espectro (discreto ou contínuo), sendo que a função ψ pode ser escrita como uma somatória (espectro discreto) ou uma integral (espectro contínuo) dos autoestados de um observável ou ainda, ter características mistas. A forma mais geral de representação de uma função de onda como combinação linear dos autoestados de um operador pode ser expressa da seguinte forma (Landau e Lifshitz, 1977):

$$\Psi(q) = \sum_n a_n \Psi_n(q) + \int a_f \Psi_f(q) df \quad (20)$$

O que é o paradoxo EPR?

Para o entendimento do artigo EPR, é importante reconhecermos os autoestados do operador posição e momento. Com operador posição dado pela expressão (2), tem-se que seus autoestados podem ser representados por uma delta de Dirac, pois:

$$\hat{q}\psi = \hat{q}\delta(x - a) = a\delta(x - a) = a\psi \tag{21}$$

Por outro lado, com o operador momento dado pela expressão (3), pode-se mostrar que seus autoestados têm a forma de uma exponencial complexa:

$$\hat{p}\psi = \hat{p}e^{ikx} = \hat{p}e^{i(\frac{2\pi p}{h})x} = \frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial x} e^{i(\frac{2\pi p}{h})x} = pe^{i(\frac{2\pi p}{h})x} = p\psi \tag{22}$$

em que foi usada a relação de de Broglie, na qual $k = \frac{p}{\hbar} = \frac{2\pi p}{h}$.

Uma síntese das representações e descrições (Griffiths, 2011), com alguns complementos, dos espectros discreto e contínuo podem ser observados na tabela abaixo

Quadro I. Comparação da descrição matemática e diferenças entre os espectros discreto e contínuo.

ESPECTRO DISCRETO	ESPECTRO CONTÍNUO
Ortonormalização x Ortonormalidade de Dirac	
$\int \psi_i^* \psi_j dx = \delta_{ij}$	$\int \psi_p^* \psi_{p'} dp = \delta(p - p')$
Expansão da função de onda	
$\psi(x) = \sum_{s=1}^{\infty} c_s \vartheta_s(x)$	$\psi(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} c_p u_p(x) dp$
Quadrado da norma	
$\sum c_i \psi^* c_i \psi = \sum c_i ^2$	$\int c(p) \psi^* c(p) \psi dp = \int dp c(p) ^2$

A.5. Evolução temporal para um sistema fechado: equação de Schrödinger

Enquanto o colapso da função de onda se refere à evolução de um sistema mediante o processo de medida. Quando um sistema está isolado, a evolução temporal da função de onda se dá de forma determinista e pode ser obtida com a solução da equação de Schrödinger⁷, que pode ser expressa da seguinte forma para o caso unidimensional:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x)\psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} \tag{23}$$

Uma forma de resolver a Equação de Schrödinger é buscando soluções que podem ser expressas por separação de variáveis, isto é,

$$\Psi(x,t) = \psi(x)\varphi(t) \tag{24}$$

aplicando (24) em (23), podemos obter⁸

$$\frac{\partial \varphi(t)}{\partial t} = -\frac{iE}{\hbar} \varphi(t) \tag{25}$$

e

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x) + V\psi(x) = E\psi(x) \tag{26}$$

A equação (26) é conhecida como equação de Schrödinger independente do tempo. A solução de (24) é simplesmente:

$$\varphi(t) = e^{-\frac{iE}{\hbar}t} \tag{27}$$

⁷ Para uma discussão sobre a derivação da função de onda, ver Lima e Karam (2021)

⁸ Para mais detalhes ver (D. J. Griffiths, 2011)

O que é o paradoxo EPR?

A solução de (26) depende do potencial V do sistema sendo estudado. De uma forma geral, a solução da equação de Schrödinger é dada por:

$$\Psi_n(x, t) = \psi_n(x) e^{-\frac{iE_n t}{\hbar}} \quad (28)$$

Ademais, a solução geral da equação de Schrödinger pode ser expressa como uma combinação linear de soluções separáveis⁹

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \psi_n(x) e^{-\frac{iE_n t}{\hbar}} = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \psi_n(x, t) \quad (29)$$

A.6. Princípio da incerteza

Podemos expressar o Princípio da Incerteza Matematicamente da seguinte forma:

$$\sigma_x \sigma_p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (30)$$

As variáveis σ_x e σ_p representam o desvio padrão da posição e do momento respectivamente¹⁰. Pode-se entender o princípio da incerteza da seguinte forma: podemos preparar um grande número de sistemas físicos idênticos. Se medirmos a posição de uma partícula em cada sistema, teremos uma distribuição de valores de posição. Podemos também medir o momento da partícula em cada um dos sistemas. Quanto mais bem localizada for essa partícula, isto é, quanto menor for o desvio padrão sobre as medidas de posição obtidas para os sistemas idênticos, maior será o desvio padrão da medida de momentum obtido para o mesmo conjunto de sistemas, e vice-versa (Griffiths, 2011). É possível mostrar, matematicamente, que essa relação de Incerteza é consequência do fato de os operadores posição e momento não comutarem. De uma forma geral, para dois operadores que não comutam, pode-se obter uma relação entre suas incertezas:

$$\sigma_A^2 \sigma_B^2 \geq \left(\frac{1}{2i} \langle [\hat{A}, \hat{B}] \rangle \right)^2 \quad (31)$$

onde $[\hat{A}, \hat{B}] \equiv \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$ é o comutador de dois operadores (Griffiths, 2011, p. 110). No artigo de Einstein, Podolsky e Rosen, a discussão sobre a incerteza é apresentada da seguinte forma:

De forma mais geral, é mostrado na mecânica quântica que, se os operadores correspondentes a duas grandezas físicas, digamos A e B, não comutam, isto é, se $AB \neq BA$, então o conhecimento preciso de um deles impede o conhecimento do outro. Além disso, qualquer tentativa de determinar o último experimentalmente alterará o estado do sistema de modo a destruir o conhecimento do primeiro. (Einstein et al., 1935, p. 778)

Para o caso específico do artigo EPR, a relação de comutação¹¹ entre posição e momento pode ser expressa como

$$[Q, P_x] = \frac{\hbar}{2\pi i} \quad (32)$$

B. Exemplo: partícula livre

Para a partícula livre, a equação de Schrödinger independente do tempo tem a seguinte solução

$$\psi(x) = A e^{ikx} + B e^{-ikx} = A e^{\left(\frac{2\pi i}{\hbar}\right)px} + B e^{-\left(\frac{2\pi i}{\hbar}\right)px} \quad (33)$$

⁹ Estamos escrevendo a solução geral como um somatório por simplicidade. Deve-se notar, entretanto, que isso só é adequado para sistemas confinados. Para um sistema não confinado, o espectro do operador hamiltoniano é contínuo e a solução geral é dada por uma integral.

¹⁰ A representação pode ser escrita como $\sigma_x = \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}$ e $\sigma_p = \sqrt{\langle p^2 \rangle - \langle p \rangle^2}$. Sendo que $\langle x \rangle$ e $\langle p \rangle$ são os valores esperados de x e p , da mesma forma que $\langle x^2 \rangle$ e $\langle p^2 \rangle$ são os valores esperados dos observáveis ao quadrado.

¹¹ A relação de comutação entre posição e momento pode ser escrita da seguinte forma (Sakurai & Napolitano, 2013):

$$[q_i, p_j] = \frac{i\hbar}{2\pi} \delta_{ij}$$

Essa relação implica que q e p_x são observáveis incompatíveis, sendo impossível encontrar autoestados simultâneos de q e p_x .

O que é o paradoxo EPR?

incluindo a parte dependente do tempo $e^{(-iEt/\hbar)}$, então

$$\Psi(x, t) = Ae^{ik(x - \frac{\hbar k t}{2m})} + Be^{-ik(x + \frac{\hbar k t}{2m})} \quad (34)$$

Nesse caso, o primeiro termo se refere a partícula se movendo para a direita e o segundo termo para a partícula se movendo em sentido negativo, para a esquerda. A função de onda não é normalizável, pois

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_k^* \Psi_k dx = |A|^2 \int_{-\infty}^{+\infty} dx = |A|^2 (\infty) \quad (35)$$

A solução da equação de Schrödinger dependente do tempo pode ser escrita como uma combinação linear de soluções separáveis, conforme discutido na seção anterior

$$\Psi(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(k) e^{i(kx - \frac{\hbar k^2 t}{2m})} dk \quad (36)$$

essa função pode ser normalizada para um $\phi(k)$ apropriado. Porém, carrega um intervalo de k e, portanto, um intervalo de energias e velocidades. É possível determinar $\phi(k)$ para que coincida com a função de onda inicial:

$$\Psi(x, 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(k) e^{ikx} dk \quad (37)$$

A solução do problema, genérico, para a partícula livre é (36), em que

$$\phi(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x, 0) e^{-ikx} dx \quad (38)$$

III. O ARGUMENTO EPR

Para Einstein, Podolsky e Rosen, em uma teoria completa, deve haver um elemento teórico correspondente a cada elemento de realidade, de forma que um critério para a realidade de uma quantidade física é a possibilidade de realizar previsões sem alterar o sistema (Einstein *et al.*, 1935). Mais especificamente, as teorias físicas devem levar em consideração uma distinção entre os elementos da realidade objetiva e os conceitos físicos operados pela teoria.

A partir disso, para que possamos julgar a pertinência de uma teoria física, os autores formulam duas perguntas que devem ser feitas frente a ela: 1) a teoria é correta? 2) a descrição dada pela teoria é completa? Para que uma teoria seja considerada completa é necessário que cada elemento da realidade seja relacionado a um elemento teórico, ou: “*cada elemento da realidade física deve ter uma contrapartida na teoria física*” (Einstein *et al.*, 1935, p. 777). Os autores chamam essa imposição de *condição de completude*.

A TQ, na forma concebida por Bohr, Heisenberg, e a Interpretação da Complementaridade, assume que a função de onda, ψ , nos fornece a descrição completa para um sistema. Essa função de onda é expressa como a sobreposição de autoestados de um operador que representa uma grandeza física observável. Ao fazer uma medida, não temos como saber previamente qual autovalor a medida fornecerá, apenas a probabilidade de se obter aquele autovalor. Ademais, pelo princípio da incerteza, ao fazermos a medida de um observável A, o sistema se encontrará em um autoestado do operador A. Nesse momento, o sistema não estará em um autoestado de um operador B (que não comuta com A) mas em uma sobreposição de autoestados de B. Ou seja, nunca é possível ter o sistema simultaneamente no autoestado de dois operadores que não comutam e isso significa que o sistema não tem os valores de A e B definidos simultaneamente.

Segundo os autores, a conclusão usual da TQ para isso é afirmar que “*quando o momento de uma partícula é conhecido, suas coordenadas não possuem realidade física*” (p. 778). Assim, os autores elencam duas consequências para esse problema: “(1) *A descrição da TQ para a realidade dada pela função de onda é incompleta ou (2) quando os operadores correspondentes a duas quantidades físicas não comutam, as duas quantidades não podem ter realidade simultânea*” (p. 778).

Como a TQ, em sua forma usual, assume que a função de onda nos fornece uma descrição completa da realidade física de um sistema, Einstein, Podolsky e Rosen apresentam um experimento mental que tem por objetivo provar por absurdo a incompletude da TQ. Basicamente, os autores partem do pressuposto que a TQ está completa e, com a análise do experimento mental, mostram que, obrigatoriamente, tal premissa conduz à noção de que as grandezas posição e momento devem ser reais simultaneamente – o que contradiz a interpretação usual. Logo, a conclusão é que a TQ está incompleta. A estrutura do argumento está representada na Figura 1.

O que é o paradoxo EPR?

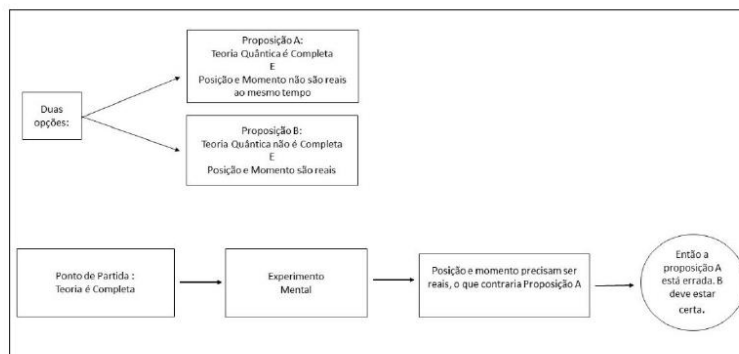


FIGURA 1. A imagem representa a estrutura do argumento EPR, contendo as duas principais proposições relacionadas ao fato de a TQ ser completa ou incompleta, com base na realidade simultânea atribuída à posição e ao momento. Através do experimento mental, Einstein, Podolsky e Rosen mostram que p e x têm realidade simultânea, o que descartaria o argumento de que a Teoria Quântica é incompleta.

A. O experimento mental proposto

Com o que foi apresentado na seção II, podemos discutir o experimento mental proposto por Einstein, Podolsky e Rosen:

Para este propósito, vamos supor que temos dois sistemas, I e II, que permitimos interagir do tempo $t = 0$ até $t = T$, após o qual supomos que não há mais nenhuma interação entre as duas partes. Supomos ainda que os estados dos dois sistemas antes de $t = 0$ eram conhecidos. Podemos, então, calcular com a ajuda da equação de Schrödinger, o estado do sistema combinado I + II em qualquer momento subsequente; em particular, para qualquer $t > T$. Vamos designar a função de onda correspondente por Ψ . Não podemos, no entanto, calcular o estado em que qualquer um dos dois sistemas é deixado após a interação. Isso, de acordo com a mecânica quântica, pode ser feito apenas com a ajuda de outras medições, por um processo conhecido como a redução do pacote de onda. Vamos considerar o essencial deste processo. (Einstein et al., 1935, p. 779)

Fizemos um esquema simples (Figura 2) para representar o que é proposto pelos autores. Dois sistemas podem interagir em uma certa região do espaço, pela qual passam de $t = 0$ até $t = T$. Para $t > T$, as partículas não interagem mais. Se conhecemos o estado inicial do sistema, podemos descrever o estado do sistema em qualquer tempo usando a equação de Schrödinger. Mas isso não nos permite saber o estado em que cada sistema é deixado após a interação. Para isso, precisaríamos fazer alguma medida (usando algum tipo de detector).

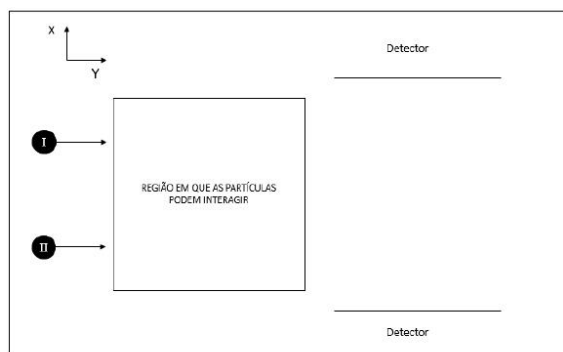


FIGURA 2. A imagem acima ilustra a situação explicada por Einstein, Podolsky e Rosen, onde dois sistemas, I e II interagem em uma determinada região e por um breve intervalo de tempo. Conhecendo os sistemas I e II no instante $t=0$ é possível descrever a interação I+II através da Equação de Schrödinger. Mas para sabermos as informações do sistema após essa interação, seria necessário realizar uma medição.

O percurso adotado no artigo EPR é partir do pressuposto de que a TQ é uma teoria completa e mostrar que isso conduz à noção de que dois operadores que não comutam representam grandezas que sim existem simultaneamente – o que contradiz a interpretação usualmente adotada. Para isso, propõem um operador A representando uma grandeza observável. Esse operador possui um conjunto discreto de autovalores a_1, a_2, a_3, \dots correspondendo aos autoestados $u_1(x_1), u_2(x_1), u_3(x_1) \dots$ em que x_1 representa a variável do primeiro sistema. Então a Ψ (função de onda do sistema composto) pode ser expressa em termos de funções de x_1 :

$$\Psi = \sum \psi_n(x_2) u_n(x_1) \quad (39)$$

Em que $\psi_n(x_2)$ faz o papel de coeficiente da expansão de Ψ na base formada pelos autoestados ortonormais do operador A, desempenhando o papel dos c_n na expressão (29). Os autores, então, comentam:

Suponha agora que a quantidade A é medida e verifica-se que tem o valor a_k . Então se concluiu que após a medição o primeiro sistema é deixado no estado dado pela função de onda $u_k(x_1)$ e que o segundo sistema é deixado no estado dado pela função de onda $\psi_k(x_2)$. (Einstein et al., 1935, p. 779)

Com o processo de medida, então, obtemos o sistema I em um autoestado do operador A. Tal resultado, entretanto, é fruto de termos escolhido a grandeza A para ser medida. Por outro lado, poderíamos ter escolhido fazer uma medida com uma grandeza B, cujo operador não comuta com A. Nesse caso, os possíveis resultados de medida são os autovalores b_1, b_2, b_3 do operador correspondentes aos autoestados $v_1(x_1), v_2(x_1), v_3(x_1)$. Nesse caso, podemos escrever $\Psi(x)$ expandindo-a em termos dos autoestados de B:

$$\Psi = \sum \phi_s(x_2) v_s(x_1) \quad (40)$$

Analogamente ao que discutimos anteriormente, $\phi_s(x_2)$ deve ser entendido como o coeficiente de expansão em termos da base formada pelos autoestados ortonormais do operador B. Da mesma forma, também, se fazemos uma medida e verificamos que o sistema I está no autoestado $v_r(x_1)$, então, também sabemos que II está no autoestado $\phi_r(x_2)$. O importante no argumento é perceber que podemos escolher se queremos medir a grandeza A ou a grandeza B no sistema I. Isso, entretanto, determina qual é o estado do sistema II. Como os sistemas não interagem, qualquer medição no sistema I **não pode alterar** o sistema II. Logo, as grandezas associadas aos estados que o sistema II assume já deveriam ser reais antes mesmo da medição. Aqui já está a essência do argumento EPR.

Einstein, Podolsky e Rosen, entretanto, vão mais adiante e exemplificam o problema supondo que A e B são os operadores posição e momento. Nesse caso, ao invés de termos espectros discretos, trataremos de espectros contínuos. Assim, os autores propõem escrever a função de onda da seguinte forma

$$\Psi = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\frac{2\pi i}{\hbar}(x_1 - x_2 + x_0)p} dp \quad (41)$$

em que x_0 é uma constante. Veja que ao escrever a Ψ com essa decomposição espectral, estamos representando uma “soma” sobre os autoestados do operador momento para o sistema I, dado pela equação (34), isto é, para uma partícula livre (visto que as partículas não estão mais interagindo):

$$u_p(x_1) = e^{\frac{2\pi i}{\hbar} p x_1} \quad (42)$$

Logo, a função associada ao sistema II é dada por

$$\psi_p(x_2) = e^{\frac{2\pi i}{\hbar}(x_0 - x_2)p} \quad (43)$$

A qual também representa uma partícula livre. Existe, entretanto, um detalhe importante: enquanto $u_p(x_1)$ é autoestado do operador $p = \frac{\hbar}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial x_1}$ com autovalor associado $+p$, $\psi_p(x_2)$ é autoestado do operador $p = \frac{\hbar}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial x_2}$ associado com o autovalor $-p$. Ou seja, Einstein, Podolsky e Rosen descrevem duas partículas livres com momentos opostos. Esse detalhe é extremamente importante: como as partículas interagiram durante um intervalo de tempo, isoladas do resto do universo, temos, por conservação de momento, que seus momentos resultantes devem ser opostos. É esse fato que faz com que, ao medir o momento do sistema I, saibamos necessariamente o momento do sistema II. Caso contrário, teríamos uma violação de uma lei Física. É justamente essa característica do experimento mental de Einstein que torna as duas medidas “atadas” uma à outra, que dá origem ao que, posteriormente, foi denominado

O que é o paradoxo EPR?

de *emaranhamento quântico* (discutiremos esse ponto na próxima seção). Assim, no caso de expandirmos a função Ψ , temos

$$\Psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_p(x_2) u_p(x_1) dp \quad (44)$$

Por outro lado, podemos representar a função de onda como autoestado do operador posição:

$$\Psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_x(x_2) v_x(x_1) dx \quad (45)$$

em que

$$v_x(x_1) = \delta(x - x_1) \quad (46)$$

no qual x é o autovalor associado para o operador x_1 . E, analogamente,

$$\phi_x(x_2) = \hbar \delta(x + x_0 - x_2) \quad (47)$$

que é autoestado do operador x_2 com autovalor $x + x_0$. Se usamos a representação de Fourier da delta de Dirac, conforme discutimos na subseção A.4, vemos que

$$\phi_x(x_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{2\pi i/h(x-x_2+x_0)p} dp \quad (48)$$

Dessa forma, se substituirmos (48) em (45) e usarmos a propriedade da filtragem, retomamos a descrição dada por (41) – mostrando que as descrições são consistentes na descrição da mesma realidade. Sintetizamos os resultados no quadro II.

Quadro II. O quadro mostra as funções e os respectivos valores dos seus coeficientes de expansão dependo da escolha que tomarmos em relação a medição de \hat{p} ou \hat{q} . Escolhendo medir o momento, a posição não ficará bem definida, sendo possível adotar $u_p(x_1)$ como autoestado e $\psi_p(x_2)$ como coeficiente de expansão. O mesmo vale para a escolha da posição, onde podem ser observados o autoestado $v_x(x_1)$ e o coeficiente de expansão $\phi_x(x_2)$. Pode-se destacar ainda que ao multiplicarmos, nos dois casos, o autoestado pelo seu respectivo coeficiente de expansão obtemos a função de onda do sistema composto. Na parte do momento através da integral de forma direta e na parte da posição através da representação da função delta pela integral de Fourier.

$\Psi = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\frac{2\pi i}{\hbar}(x_1-x_2+x_0)p} dp$	
Se escolhermos \hat{p}	Se escolhermos \hat{q}
$u_p(x_1) = e^{\frac{2\pi i}{\hbar} p x_1}$	$v_x(x_1) = \delta(x - x_1)$
$\psi_p(x_2) = e^{\frac{2\pi i}{\hbar} p(x_0-x_2)}$	$\phi_x(x_2) = \hbar \delta(x + x_0 - x_2)$
p bem definido	x bem definido
x não definido	p não definido

Ou seja, quando escolhermos se vamos medir a posição ou o momento do sistema I, definimos em qual estado estará o sistema II (por conta do emaranhamento criado pela conservação de momento). Observamos que os autoestados do operador posição e momento são significativamente distintos. Como os sistemas não estão interagindo, entretanto, a medida no sistema I não pode afetar o estado no sistema II. Logo, deve-se concluir que as duas grandezas representadas por operadores que não comutam devem ter realidade simultaneamente. Os valores de posição e momento já deveriam ser reais independentemente das medidas. Com isso, os autores, concluem:

Anteriormente, provamos que (1) a descrição mecânica quântica da realidade dada pela função de onda não está completa ou (2) quando os operadores correspondentes a duas quantidades físicas que não comutam as duas quantidades não podem ter realidade simultânea. Começando, então, com a suposição de que a função de onda dá uma descrição completa da realidade física, chegamos à conclusão de que duas quantidades físicas, com operadores que não comutam, podem ter

O que é o paradoxo EPR?

realidade simultânea. Assim, a negação de (1) leva à negação da única outra alternativa (2). Somos, portanto, forçados a concluir que a descrição mecânico-quântica da realidade física dada pelas funções de onda não está completa. (Einstein et al., 1935, p. 780)

O ponto principal é que o estado possível para o sistema II depende da medida feita no sistema I. Assim, ao escolher qual grandeza medir no sistema I, **instantaneamente**, se teria um estado definido para o II caso esse estado já não existisse antes. Portanto, ainda que implicitamente, o argumento está montado sobre a impossibilidade de se transmitir qualquer informação instantaneamente – o que violaria a Teoria da Relatividade Especial (discutiremos isso na próxima seção). Em outras palavras, o argumento assume a noção de **localidade** nas interações físicas. Por fim, os autores concluem

Enquanto nós mostramos, então, que a função de onda não provê uma descrição completa da realidade física, deixamos aberta a questão se tal descrição completa existe ou não. Nós acreditamos, entretanto, que tal teoria é possível. (Einstein et al., 1935, p. 780)

IV. DISCUSSÃO SOBRE O ARGUMENTO EPR

O artigo EPR, apresentando críticas à completude da TQ, gerou diversas consequências para o desenvolvimento da teoria. Primeiramente, deve-se ressaltar que a proposta dos autores não foi aceita por Niels Bohr, que – também em 1935 – publicou um artigo com mesmo título do artigo de Einstein, Podolsky e Rosen – reafirmando sua defesa da interpretação da complementaridade:

Mostra-se que certo "critério de realidade física" formulado em artigo recente com o título acima de A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen contém uma ambiguidade essencial quando aplicado a fenômenos quânticos. Nesse contexto, um ponto de vista denominado "complementaridade" é explicado, a partir do qual a descrição da mecânica quântica dos fenômenos físicos parece cumprir, dentro de seu escopo, todas as demandas racionais de completude. (Bohr, 1935, p. 696)

Ademais, como mencionamos, o experimento mental proposto no artigo EPR indica um novo tipo de fenômeno físico: quando dois sistemas quânticos interagem, a função de onda resultante passa a correlacionar os resultados de medida sobre um sistema com as propriedades do outro sistema – de forma que eles não podem mais ser representados independentemente. Como discutimos, ao propor a função de onda dada pela expressão (40), Einstein, Podolsky e Rosen conseguem, ao determinar o estado da partícula I, instantaneamente, determinar o estado da partícula II.

Esse novo fenômeno foi explorado de forma mais profunda por Schrödinger (1935, 1936) – que cunhou o termo “emaranhamento” para caracterizar tal fenômeno. Mais do que isso, Schrödinger reconhece que o emaranhamento não é simplesmente uma característica da TQ, é “A” característica, mostrando de forma incontestável enquanto essa se afasta da Física Clássica:

Quando dois sistemas, dos quais conhecemos os estados por seus respectivos representantes, entram em interação física temporária devido a forças conhecidas entre eles, e quando após um tempo de influência mútua os sistemas se separam novamente, então eles não podem mais ser descritos da mesma maneira como antes, viz. dotando cada um deles com um representante próprio. Eu não chamaria isso de um, mas sim o traço característico da mecânica quântica, aquele que força todo o seu afastamento das linhas clássicas de pensamento. Pela interação, os dois representantes (ou funções ψ) tornaram-se emaranhados. (Schrödinger, 1935, p. 555)

Assim, podemos dizer que o argumento EPR consistiu em revelar o fenômeno do emaranhamento na TQ. Para os autores, tal fenômeno deve ser considerado inaceitável visto que ele indica a possibilidade de fenômenos não-locais. Isto é, ao medir uma partícula, instantaneamente, a outra partícula é afetada não importa o quão distante ela esteja. Partindo da noção de localidade, os autores defendem uma visão realista, defendendo que duas grandezas representadas por operadores que não comutam devem existir simultaneamente.

Se os autores estivessem corretos, a TQ estaria incompleta e estaria faltando a descrição de parâmetros que permitisse, de antemão, caracterizar todas as grandezas físicas do sistema. Esses parâmetros ficaram conhecidos pelo termo “variáveis ocultas”. Assim, embora Einstein, Podolsky e Rosen, não tenham proposto nenhuma alternativa à interpretação da Complementaridade da TQ, o caminho a ser seguido em sua proposta seria encontrar uma teoria de variáveis ocultas locais.

Em 1952, David Bohm (1952a), físico norte-americano, inspirado nas discussões de Einstein, apresenta uma proposta alternativa à interpretação da Complementaridade, propondo uma formulação causal e determinista da TQ em

termos de variáveis ocultas. Apesar de sua inspiração nos trabalhos de Einstein, a proposta de Bohm segue tratando de variáveis não-locais¹².

Pode-se parecer que essa discussão sobre existência ou não de variáveis locais e sobre completude ou não da TQ seja um objeto de estudo puramente filosófico, ficando fora do alcance da Física. Entretanto, John Bell (1964) mostrou que seria possível haver uma diferença empírica entre um sistema quântico ter variáveis ocultas locais ou não¹³. Ou seja, Bell conseguiu mostrar que há diferenças físicas mensuráveis que permitem analisar se a interpretação usual da TQ (que implica efeitos não locais) ou a proposta de variáveis locais está correta. Todos os resultados experimentais, até hoje, apontam para a correção da TQ e, portanto, para a existência de fenômenos não-locais, contrariando a concepção do artigo EPR.

Deve-se ressaltar que a não-localidade da TQ não viola a Teoria da Relatividade Espacial, segundo a qual é impossível uma informação ser transportada com velocidade acima da velocidade da luz. Caso isso fosse possível, haveria quebra denexo causal e poderíamos ter efeitos ocorrendo antes das causas. Isso não significa, entretanto, que não é possível ter algum tipo de fenômeno acima da velocidade da luz. Ele só não pode transportar informação e prover relações de causa e efeito. Por exemplo, imagine que projetemos a luz de lanterna em um anteparo. Se o anteparo está a uma distância d da lanterna, e movemos a lanterna com velocidade angular ω , a imagem da lanterna no anteparo se moverá com velocidade $v = \omega d$. Se a distância for grande o suficiente, a velocidade da imagem no anteparo pode superar a velocidade da luz. Isso não viola a Teoria da Relatividade, pois o fenômeno físico envolve a emissão de luz da fonte até o anteparo e isso ocorre com transmissão de informação da velocidade da luz. Não conseguimos com esse fenômeno transmitir nenhuma informação ou produzir qualquer efeito com velocidade superior à da luz.

O mesmo acontece com o emaranhamento quântico. Quando fazemos uma medida sobre uma partícula, não conseguimos controlar qual resultado podemos obter e, portanto, não temos como causar um efeito específico na outra partícula. Não há nenhum transporte de informação e, portanto, não há nenhum vínculo causal que possa ser estabelecido com esse processo.

Dessa forma, somos levados a concluir que a TQ é uma teoria não local. Como discute Griffiths (2011), o argumento EPR acabou tendo uma história surpreendente. Os autores partiram da localidade para provar o realismo e, com o desenvolvimento histórico, a questão da realidade não ficou definida e ainda abandonamos a localidade.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo EPR é um artigo historicamente muito relevante para o desenvolvimento da TQ. Nele, é apresentada uma crítica à formulação da TQ que se tornou hegemônica e que era defendida por pesquisadores como Niels Bohr. Partindo da noção de localidade, Einstein, Podolsky e Rosen defendem que grandezas representadas por operadores que não comutam devem existir simultaneamente – o que contradiz a interpretação da Complementaridade. Esse argumento teve, entretanto, desenvolvimentos surpreendentes. Primeiramente, conduziu ao reconhecimento do fenômeno do emaranhamento como uma característica fundamental da TQ, conforme argumentou Schrödinger. E, posteriormente, levou ao reconhecimento de que a TQ é uma teoria não-local a partir das verificações experimentais do teorema de Bell.

Reconhecendo sua importância e a possibilidade de apresentá-lo em fases mais iniciais dos cursos de TQ, incluindo para cursos de licenciatura em Física, apresentamos, neste artigo, uma reconstrução didática do artigo original. Para contribuir com o entendimento do argumento, apresentamos na seção II, uma revisão dos conceitos de TQ que são necessários, remetendo-nos ao artigo e aos livros didáticos contemporâneos. Na sequência, na seção III, reconstruímos a derivação e a argumentação do artigo, valendo-nos dos conceitos revisados na seção anterior. Por fim, na seção IV, discutimos brevemente as consequências históricas advindas do artigo e comentamos suas implicações para o entendimento contemporâneo da TQ como uma teoria não-local.

Conforme discutimos na introdução, a apresentação de fontes históricas primárias no contexto do ensino de Física tem sido defendida por diferentes autores. Deve-se atentar, entretanto, que não é qualquer fonte histórica ou qualquer episódio que contribui para as discussões didáticas. Karam (2021), por exemplo, discute que os episódios devem ser cuidadosamente escolhidos para que se adequem ao contexto pedagógico. Nesse sentido, defendemos que o artigo escrito por Einstein, Podolsky e Rosen (1935) é uma fonte extremamente interessante para ser levada para os cursos de teoria quântica do bacharelado e licenciatura.

Primeiramente, trata-se de um artigo curto e, portanto, de rápida leitura. Em segundo lugar, o artigo é estruturado de uma forma lógica e clara, o que permite discutir a própria natureza da argumentação científica. Em terceiro lugar,

¹² O foco do artigo de Bohm (Bohm, 1952a, 1952b) não deixava clara a explicação não-local das variáveis ocultas, mas a interpretação atual dessa questão deixa claro que na verdade a não-localidade já estava presente nessas discussões em torno das variáveis ocultas de Bohm.

¹³ Uma apresentação sobre o teorema de Bell para população geral foi apresentada de forma muito clara e acessível em (Mermin, 1985)

o formalismo matemático usado pelos autores é compatível com o formalismo e conceitos vistos em cursos introdutórios de Teoria Quântica, o que torna possível compreendê-lo com relativa facilidade. Por fim, o artigo aborda um dos temas mais importantes, conceitual e historicamente, da Teoria Quântica contemporânea, o emaranhamento quântico, tópico usualmente abordado em fases finais dos cursos de Teoria Quântica (às vezes, nem sendo abordado).

De qualquer forma, deve-se atentar que um texto científico, como um artigo, é muito diferente de um texto didático. Ele foi escrito por especialistas para dialogar com outros especialistas. Por isso, não somente o formato do texto é específico, mas também a linguagem e os conceitos abordados. Para que um texto científico possa ser apresentado no contexto pedagógico, é necessário haver uma preparação, ou transposição didática (Chevallard, 1991). Neste artigo, apresentamos justamente uma narrativa que permite fazer a tradução entre o contexto científico e o didático. Primeiramente, na seção II, apresentamos, de forma estruturada, os conceitos básicos da Teoria Quântica, que são utilizados no artigo EPR. Muitos desses conceitos aparecem no artigo original, mas não são explicados pelos autores (como a representação da delta de Dirac por sua transformada de Fourier, por exemplo). Além de preparar o leitor, fazendo uma conexão com os conhecimentos usualmente apresentados em cursos de quântica, o que, do ponto de vista didático, corresponderia a relacionar o novo assunto aos conhecimentos prévios do aluno, o texto também traz uma representação do argumento em formato de diagrama – ajudando a explicitar o que está em questão na crítica dos autores – e uma representação do experimento mental, o que também não há no artigo original. Entendemos que esses elementos, juntamente com a explicação organizada do argumento, permitem criar a transposição didática necessária.

Sugerimos que tal tópico seja abordado em cursos de Teoria Quântica da graduação, seja licenciatura ou bacharelado, logo após a apresentação do formalismo matemático da Teoria. Isso fará com que o tópico seja abordado muito mais cedo do que o é usualmente. Uma possível forma de se fazer isso na sala de aula seria seguir a seguinte sequência. 1) Pedir para os alunos fazerem uma primeira leitura do artigo original e entregar ao professor todas as dúvidas. 2) O professor pode, então, apresentar a revisão teórica necessária (o correspondente à seção II deste artigo) e discutir seu o argumento geral (com as figuras 1 e 2, por exemplo). 3) Os alunos podem fazer uma nova rodada de leitura e, então, 4) o professor apresenta o desenvolvimento do artigo detalhadamente. Pode-se, nesse momento, 5) promover uma discussão na sala sobre o argumento apresentado no artigo. Ao seguir esses passos, entendemos que, primeiramente, gera-se um fator motivacional, provocando nos alunos a vontade de entender um artigo importante da história da Teoria Quântica, escrito por cientistas que contribuíram significativamente para ciência. Na sequência, garante-se que todos os conhecimentos prévios necessários sejam sistematizados de forma a viabilizar a compreensão do texto. Por fim, apresenta-se o artigo e promove-se um debate, de forma que os alunos possam se aprofundar no entendimento do tema e elaborar sua compreensão sobre o tópico em questão.

Esperamos que esse trabalho contribua para a comunidade de Ensino de Física, viabilizando que a discussão sobre tal tema possa ser efetivamente levado para o contexto pedagógico. Entendemos que a discussão do trabalho original em sala de aula pode ser um fator importante de motivação para estudantes de Física e pode contribuir para um melhor entendimento da TQ.

REFERÊNCIAS

- Auletta, G., Fortunato, M., & Parisi, G. (2009). *Quantum Mechanics*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Bell, J. S. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*. *Physics Physique Fizika*, 1, 195–200. <https://doi.org/https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>
- Bender, C. ., Brody, D. C., & Jones, H. F. (2003). Must a Hamiltonian be Hermitian? *American Journal of Physics*, 71(11), 1095–1102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1119/1.1574043>
- Bohm, D. (1952a). A suggested interpretation of the Quantum Theory in terms of “hidden” variables.I. *Physical Review*, 85(2), 166–179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.166>
- Bohm, D. (1952b). A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of “Hidden” Variables. II. *Physical Review*, 85(2), 180–193. <https://doi.org/https://doi.org/10.1103/PhysRev.85.180>
- Bohr, N. (1935). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Phys. Rev.*, 48(8), 696–702. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.48.696>
- Bohr, Niels. (1934). *Teoria atômica e a descrição da Natureza*. Cambridge, England: Cambridge University Press.

- Bunge, M. (1973). *Filosofia da Física*. Lisboa, Portugal: edições 70.
- Bunge, M. (2007). *Física e Filosofia* (1ª ed). São Paulo, Brasil: Perspectiva.
- Butkov, E. (1988). *Física Matemática*. Rio de Janeiro, Brasil: LTC.
- Chevallard, Y. (1991). *La Transposition didactique: du savoir savant au savoir enseigné*. Grenoble, França: La Pensée Sauvage.
- Cohen-Tannoudji, C., Diu, B., & Laloë, F. (1977). *Quantum Mechanics*. New York, USA: John Wiley and Sons.
- Cushing, J. (1994). *Quantum Mechanics - Historical contingency and the Copenhagen hegemony*. Chicago, USA: University of Chicago Press.
- Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 47(10), 777-780. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>
- Freire Jr., O., Pessoa Jr., O., & Bromberg, J. L. (2011). *Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais*. São Paulo, Brasil: EDUEPB.
- Freire, O. (2015). *The Quantum Dissidents: Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950-1990)*. New York, USA: Springer.
- Gomatam, R. (2007). Niels Bohr's interpretation and the Copenhagen interpretation - Are the two incompatible? *Philosophy of Science*, 74(5), 736-748. <https://doi.org/10.1086/525618>
- Gottfried, K., & Yan, T.-M. (2003). *Quantum Mechanics: Fundamentals* (2 ed). New York, USA: Springer.
- Griffiths, D. J. (2011). *Introduction to Quantum Mechanics* (2 ed). São Paulo, Brasil: Pearson.
- Griffiths, R. B. (1987). Correlations in separated quantum systems: A consistent history analysis of the EPR problem. *American Journal of Physics*, 55(1), 11-17. <https://doi.org/10.1119/1.14965>
- Howard, D. (2004). Who invented the "Copenhagen interpretation"? A study in mythology. *Philosophy of Science*, 71(5), 669-682. <https://doi.org/10.1086/425941>
- Jammer, M. (1974). *The Philosophy of Quantum Mechanics*. New York, USA: John Wiley and Sons.
- Jammer, M. (1966). *The conceptual development of Quantum Mechanics*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company.
- Karam, R. (2020). Schrödinger's original struggles with a complex wave function. *American Journal of Physics*, 88(6), 433-438. <https://doi.org/10.1119/10.0000852>
- Karam, R. (2021). Considerações metodológicas sobre o uso de fontes primárias no ensino de Física. *Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática*, 4(ed. especial), 1067-1082. <https://doi.org/https://doi.org/10.5335/rbecm.v4i3.12908>
- Laloë, F. (2001). Do we really understand quantum mechanics? Strange correlations, paradoxes, and theorems. *American Journal of Physics*, 69(6), 655-701. <https://doi.org/https://doi.org/10.1119/1.1356698>
- Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1977). *Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory* (3th ed). New York, USA: Pergamon Press.
- Lima, N., Cavalcanti, C., & Ostermann, F. (2021). Concepções de Dualidade Onda-Partícula: Uma proposta didática construída a partir de trechos de fontes primárias da Teoria Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 43, e20200270. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2020-0270>
- Lima, N., & Karam, R. (2021). Particle velocity = group velocity: A common assumption in the different theories of Louis de Broglie and Erwin Schrödinger. *American Journal of Physics*, 89(5), 521-528. <https://doi.org/10.1119/10.0003165>

Mermin, N. D. (1985). Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory. *Physics Today*, 38(4), 38–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.880968>

Mostafazadeh, A. (2001). Pseudo-Hermiticity versus PT symmetry: The necessary condition for the reality of the spectrum of a non-Hermitian Hamiltonian. *Journal of Mathematical Physics*, 43(1), 205–214. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.1418246>

Neumann, J. Von. (1932). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (1st ed.). Berlin, Germany: Julius Springer.

Ostermann, F., Pereira, A., Cavalcanti, C. J. de H., & Pessoa Jr., O. (2012). Uma abordagem conceitual e fenomenológica dos postulados da física quântica. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 29(2), 831–863. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2012v29nesp2p831>

Reisler, D. L. (1971). The Epistemological Basis of Einstein's, Podolsky's, and Rosen's Objection to Quantum Theory. *American Journal of Physics*, 39, 821–831. <https://doi.org/10.1119/1.1986291>

Sakurai, J. J., & Napolitano, J. (2013). *Mecânica Quântica Moderna* (2 ed). Porto Alegre, Brasil: Bookman.

Schrödinger, E. (1935). Discussion of Probability Relations between Separated Systems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 31(4), 555–563. <https://doi.org/10.1017/S0305004100013554>

Schrödinger, E. (1936). Probability relations between separated systems. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 32(3), 446–452. <https://doi.org/10.1017/S0305004100019137>

ANEXO B - UMA RECONSTRUÇÃO DIDÁTICA DA APRESENTAÇÃO ORIGINAL DO TEOREMA DE BELL: *SOBRE O PARADOXO DE EINSTEIN, PODOLSKY E ROSEN* (ARTIGO ORIGINAL, SUBMETIDO EM ABRIL DE 2022)

Uma reconstrução didática da apresentação original do Teorema de Bell: *Sobre o Paradoxo de Einstein, Podolsky e Rosen*

A didactic reconstruction of the original presentation of Bell's Theorem: On the Einstein, Podolsky and Rosen Paradox

Resumo: A desigualdade de Bell, proposta no artigo “On the Einstein Podolsky Rosen Paradox”, foi uma das discussões que mais gerou controvérsias em torno dos fundamentos da Teoria Quântica, pois envolvia aspectos físico-matemáticos e, também, discussões filosóficas sobre a realidade. O intuito do presente artigo é elaborar uma abordagem didática para a apresentação do Teorema de Bell e suas implicações para o desenvolvimento da Teoria Quântica. Para isso, a proposta é apresentar o material de forma a facilitar seu uso em contexto pedagógico, apresentando inicialmente um exemplo mais concreto do que seria o Teorema de Bell, abordagem de Mermin, e na sequência, após o aluno ter uma noção concreta sobre o tema, apresentar os fundamentos matemáticos necessários para o entendimento do Teorema e, então, uma explicação do argumento de Bell. Ao ser desenvolvido dessa forma, o Teorema de Bell pode assumir um caráter menos instrumentalista, destacando a controvérsia envolvida no seu desenvolvimento. Ao destacar de onde e porque determinados elementos são utilizados na derivação da desigualdade de Bell, por uma perspectiva que permite compreender a construção da teoria, buscamos aproximar o estudante dos conceitos apresentados e promover uma melhor compreensão da natureza da ciência no que diz respeito à Teoria Quântica.

Palavra-chave: Teorema de Bell, Reconstrução Didática, Teoria Quântica.

Abstract: Bell's inequality, proposed in the article “On the Einstein Podolsky Rosen Paradox”, was one of the discussions that most generated controversy around the foundations of Quantum Theory, as it involved physical-mathematical aspects and also philosophical discussions about reality. The purpose of this article is to elaborate a didactic approach for the presentation of Bell's Theorem and its implications for the development of Quantum Theory. For this, the proposal is to present the material in order to facilitate its use in a pedagogical context, initially presenting a more concrete example of what would be Bell's Theorem, Mermin's approach, and then, after the student has a concrete notion about the theme, to present the necessary mathematical foundations for the understanding of the Theorem and, then, an explanation of Bell's argument. When developed in this way, Bell's Theorem can take on a less instrumentalist character, highlighting the controversy involved in its development. By highlighting where and why certain elements are used in the derivation of Bell's inequality, from a perspective that allows understanding the construction of theory, we seek to bring the student closer to the concepts presented and promote a better understanding of the nature of science with regard to Theory Quantum.

Keywords: Bell's Theorem, Didactic Reconstruction, Quantum Theory.

1. Introdução

Na área de Ensino de Física, muitos pesquisadores defendem a noção de que, para ensinar a Teoria Quântica, é necessário ensinar, ao menos um pouco, a história da Teoria Quântica [1]. Essa noção se alinha com uma perspectiva mais geral de que o ensino de Física e o ensino de Ciências se beneficiariam significativamente ao introduzir discussões históricas, pois isso permite que os alunos entendam melhor a construção das teorias e a natureza da ciência [2], [3]. Ademais, os estudiosos das teorias de ensino e aprendizagem defendem a importância de diversificar os materiais didáticos, complementando o uso do livro didático [4].

Nesse sentido, temos defendido o uso de elementos de artigos originais em sala de aula – fazendo-se uma reconstrução didática que os torne significativos no contexto pedagógico [5], [6]. Sobre o uso de fontes primárias no ensino da Teoria Quântica, têm-se desenvolvido discussões sobre a dualidade onda-partícula [7], a proposta de Louis de Broglie [8], uma comparação entre as ideias de Louis de Broglie e Erwin Schrödinger [9], as preocupações de Schrödinger com a natureza complexa de sua função de onda [10], a derivação do princípio da Incerteza [11], e a proposição do paradoxo EPR [12].

No presente artigo, pretendemos dar um passo adiante na proposta de trazer fontes primárias para o ensino da Teoria Quântica, apresentando uma reconstrução didática do teorema de Bell, o qual é apresentado em resposta ao paradoxo EPR. Deve-se lembrar que a publicação de Einstein, Podolsky e Rosen [13], em 1935, fez uma dura crítica à Teoria Quântica (TQ), principalmente ao caráter não completo da função de onda, que já havia sido abordado anteriormente por Von Neumann [14]. Em uma tentativa de caracterizar a TQ como uma teoria causal, em 1952, David Bohm publica uma sequência de dois artigos, em que sugere uma interpretação da TQ em termos de variáveis ocultas [15]. John S. Bell, tendo lido as publicações de EPR e Bohm, influenciado pelos argumentos de Bohm sobre parâmetros ocultos, escreveu um artigo em que apresenta uma previsão teórica capaz de distinguir a possibilidade entre haver ou não variáveis ocultas locais, [16], o que leva à conhecida desigualdade de Bell (ou Teorema de Bell).

Juntamente com a teoria das variáveis ocultas, outras interpretações da TQ começaram a se desenvolver [17], opondo-se à interpretação padrão (complementaridade), o que gerou uma grande controvérsia na comunidade de físicos, envolvendo os fundamentos da TQ. Muitas previsões teóricas da Mecânica Quântica foram comprovadas experimentalmente nos últimos 80 anos, mas as questões interpretativas (como as variáveis ocultas) ainda são fonte de controvérsia [18]. Porém, muitos pesquisadores da época argumentavam que os temas envolvendo os fundamentos já estavam resolvidos pelos “pais fundadores” da TQ [17], [19] e que qualquer discordância era meramente uma questão metafísica (sem consequências experimentais). Foi justamente com o artigo de Bell que foi possível mostrar que a discussão entre a teoria ser completa ou não poderia ter sim uma implicação experimental – trazendo o debate filosófico para dentro do laboratório [17].

O objetivo desse artigo é contribuir para o ensino da TQ, apresentando um tema que geralmente não é aprofundado em sala de aula (principalmente no que tange ao seu entendimento conceitual) e que tem implicações muito fortes para o desenvolvimento da TQ. Para isso, será feita uma reconstrução didática do artigo de John Stewart Bell, explicitando (i) os pressupostos da sua apresentação, (ii) os principais pontos conceituais para a compreensão do argumento de Bell e (iii) a derivação da conhecida desigualdade que carrega seu nome. Existem artigos que tentaram simplificar a ideia contida na desigualdade de Bell, dentre eles pode-se destacar os de d’Espagnat [20], Herbert [21] e Mermin [22]. Em nossa abordagem buscamos manter uma linguagem semelhante à utilizada no artigo original [16] fazendo conexão com conceitos que os alunos usualmente aprendem nos cursos de Mecânica Quântica.

Apesar da grande controvérsia causada pelo artigo de John S. Bell, em 1964, quando Alain Aspect [23] realizou o experimento favorável a interpretação usual da TQ (que previa violações da desigualdade de Bell e portanto contrária à Teoria das Variáveis Ocultas suposta por Einstein e outros físicos tradicionais), muitos físicos acabaram considerando o tema das variáveis ocultas como encerrado. A temática referente ao teorema de Bell está presente em várias publicações atuais na literatura, seja para

discussões de aspectos conceituais do teorema [24]–[26], em forma de discussões experimentais [27]–[29], discussões referentes à matemática envolvida no teorema de Bell [30]–[33] ou em usos mais voltados para a área educacional e acadêmica [34]–[36]. A área de estudos e as conclusões sobre as variáveis ocultas ainda permanece em aberto, uma vez que o teorema não extingue a possibilidade de variáveis ocultas não-locais.

Buscando estabelecer uma estrutura didática capaz de contribuir para a compreensão do artigo proposto, as seções foram divididas para introduzir os conceitos fundamentais utilizados no artigo de Bell (texto em sua maior parte contido no material suplementar), a derivação da desigualdade de Bell e uma discussão sobre o argumento do autor. Para isso, a seção 2 apresenta uma reconstrução de uma discussão simplificada do problema envolvido no artigo de Bell, exposta por Mermin [22]. Essa explicação permite que o aluno entenda, primeiramente, o que está por trás do formalismo matemático que será utilizado. A ideia de explicitar essa discussão antes da derivação formal segue a sugestão de que a representação matemática, em uma aula, deve vir na sequência de uma discussão conceitual [37]. Na seção 3, será apresentado o valor esperado para o estado singleto de acordo com a Teoria Quântica usual, sem as variáveis ocultas. Na seção 4, demonstraremos a derivação da desigualdade de Bell, relacionando com argumentos do próprio artigo e relacionando o significado físico de tal desenvolvimento. A seção 5, então, apresenta uma discussão do argumento de Bell quanto à não-localidade (para compreender mais tipos de não-localidade e seus aspectos ver Berkovitz [38]) e as variáveis ocultas. Na seção 6, por fim, fazemos nossas considerações finais apresentando algumas sugestões para o uso da discussão nos cursos de TQ da graduação.

Assim, ressaltamos que a contribuição do presente artigo é de natureza didática: a estrutura com que o tema é apresentado está ancorado em resultados de pesquisas na área de ensino, o que aumenta a potencialidade da abordagem no sentido de contribuir para um entendimento significativo dos estudantes. A novidade do artigo está, nesse sentido, em partir de um exemplo concreto (proposto por Mermin) e avançar em direção à discussão mais abstrata proposta por Bell, finalizando com uma análise das implicações conceituais e filosóficas do teorema de Bell.

2. A analogia experimental de Mermin (1985) à desigualdade de Bell

Em 1985, Nathaniel D. Mermin apresentou ao público geral uma analogia mais simples de como funcionava e qual era a questão envolvida na desigualdade formulada por Bell em 1964. O autor propõe um experimento mental e o relaciona com o problema das variáveis ocultas na Teoria Quântica. As próximas linhas serão destinadas a sintetizar essa formulação experimental apresentada por Mermin [22]. O aparato experimental de Mermin é composto por três peças A, B e C, nas quais A e B são detectores e C é uma fonte que emite “algo” (C sempre emite duas “partículas” ao mesmo tempo, uma em direção ao detector A e outra em direção ao B), como segue na representação abaixo.

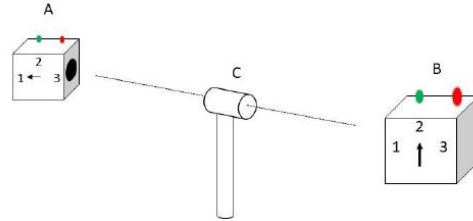


Figura 1: A imagem representa o aparato experimental sugerido por Mermin, no qual cada detector A e B contém 3 posições de chave escolhidas aleatoriamente e duas luzes, vermelha e verde, que piscam nas interações que ocorrem no experimento.

Os detectores possuem três configurações de uma chave, com posição numerada até três, além de duas luzes (verde e vermelha) que piscam com as interações que ocorrem com o que é emitido por C. As chaves têm suas posições aleatoriamente escolhidas e os detectores não têm nenhum tipo de contato entre si e nem com a fonte emissora de “algo” (que posteriormente o autor chama de partícula, mas poderia levar qualquer outro nome). Os registros do experimento são feitos através da numeração referente a chave e uma letra que identifica a cor da luz que piscou (sendo G para verde (*green*) e R para vermelho (*red*)). A única ligação entre os aparelhos é por meio da partícula (ou “algo”). Anotando-se os resultados das medições, obtêm-se o seguinte conjunto de dados:

A B			
2R2R	3R2G	3R3R	1G1G
2G2G	1G1G	3R2R	1G3G
2R1R	2R2R	3R1G	3R3R
1G1G	3R1G	2G1R	2G3R
2R1R	1G3R	3G3G	1R1R

Figura 2: Anotação de alguns resultados obtidos após a realização das medições. A sequência de números representa a chave e a cor obtida em cada aparato, respectivamente para A e B. Por exemplo, 3R2G quer dizer que o resultado foi a seleção da chave 3 e luz vermelha para o detector A e chave 2 com a luz verde para o B. Baseado em Mermin [22].

A tabela acima, com um trecho dos possíveis dados do experimento, permite concluir duas considerações importantes sobre os dados. A primeira é que, em todos os casos em que os interruptores têm a mesma configuração, é possível observar que as luzes piscam sempre nas mesmas cores. A segunda é que, no caso de observarmos os dados no geral, sem considerar as configurações dos interruptores, observa-se que o padrão de cores é aleatório, piscando metade das vezes com cor idênticas, metade das vezes com cores distintas.

O problema referente à desigualdade de Bell surge justamente pela observação de certas medidas na tabela acima, pois, observando o caso em que a mesma chave foi escolhida para ambos os detectores, é possível ver que, em todos os casos, a mesma cor de luz ascendeu. Esse resultado incomodou muitos Físicos da época, como poderia acontecer tamanha coincidência? Alguns Físicos mais desconfiados dos aspectos da TQ, como era o caso de Einstein, poderiam supor, seguindo a analogia de Mermin, que a explicação é fácil, já que os dois receptores recebem partículas vindas de uma mesma origem.

Pode-se imaginar que a fonte C emite partículas que tem uma certa propriedade que é descrita por três variáveis 1,2,3. Cada variável pode assumir duas cores (verde ou vermelha). Assim, por exemplo, uma partícula pode ser associada ao conjunto de variáveis GGG, outra pode ser descrita por GGR, e assim por diante. Todas as combinações possíveis de variáveis para uma partícula somam 8 alternativas (representadas na Figura 3). Como a fonte C sempre emite duas partículas ao mesmo tempo, podemos imaginar que ela está sempre emitindo duas partículas com a mesma sequência de cores. Com isso, conseguimos explicar por que os detectores apresentam a mesma cor quando a chave está no mesmo número: eles estão medindo a mesma variável em partículas idênticas. Essa é justamente a noção de uma variável oculta (que, a Teoria Quântica não teria descrito até então, como propunha Einstein no paradoxo EPR).

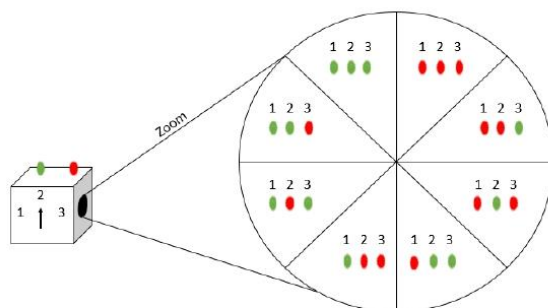


Figura 3: Visão da parte interna dos aparatos A e B, com repartições que mostram as possibilidades de combinações referentes às cores que serão emitidas nas lâmpadas do experimento.

A explicação das variáveis ocultas, apesar de uma boa alternativa para a primeira característica de dados (detectores sempre assinalarem a mesma cor quando a chave está na mesma posição), se torna insustentável para a segunda característica dos dados (a probabilidade de as cores piscarem iguais é a metade das execuções do experimento). Considerando, por exemplo, um conjunto de instruções “R-R-G”, os detectores piscarão nas mesmas cores quando a configuração for: 1-1, 2-2, 3-3, 1-2 ou 2-1 e diferentes em: 1-3, 3-1, 2-3 ou 3-2. A probabilidade de cada um desses 9 casos resultarem em cores iguais é de 5/9, sendo que essa mesma probabilidade vale para as “instruções” R-G-R, G-R-R, G-G-R, G-R-G e R-G-G. Só não sendo válidas para G-G-G e R-R-R, nas quais serão iguais em todas combinações. Então, se esse conjunto de “instruções” existir, em 5/9 de

todas as execuções, os resultados serão iguais para as cores das luzes. Porém, na demonstração real do experimento da desigualdade de Bell, as luzes piscam iguais somente na metade das vezes. Ou seja, existe um teste experimental que indica que não pode haver variáveis ocultas locais.

Uma forma de realizar esse experimento, de acordo com a TQ, seria utilizando partículas correlacionadas, do estado singleto. As chaves seriam três possíveis direções para onde apontariam os polos de ímãs Stern-Gerlach e as luzes representariam os estados “*spin up*” e “*spin down*” (para verde e vermelho). O aparelho do outro lado seria configurado com as cores opostas. Dessa forma, quando os ímãs estiverem na mesma direção (chave 1, 2 ou 3), a mesma cor aparece, pois em um aparelho teríamos “*spin up*” e no outro “*spin down*”, que devido as configurações opostas, resultariam na mesma cor nas lâmpadas. Portanto, nunca seria possível obtermos cores diferentes para uma mesma seleção de chaves. Sendo assim, independente da distância escolhida entre os aparelhos, os resultados sempre seriam opostos para uma mesma configuração de chave. Era isso que incomodava Einstein, pois ele achava que deveriam existir “instruções” prévias que permitissem prever com antecedência qual configuração pré-determinada o sistema tinha, mas não é o que ocorre.

Com esse exemplo mental podemos entender exatamente o que está em jogo no Teorema de Bell. Na época, a discussão proposta por Einstein era se a Teoria Quântica está completa (e não há variáveis ocultas) ou está incompleta (e há variáveis ocultas). Em princípio, essa parecia ser uma discussão filosófica – sem implicação empírica. Entretanto, com o experimento mental proposto, vemos que há uma diferença empírica entre uma partícula “carregar instruções” ou não. Os dados experimentais, como apontam Mermin, corroboram a ideia de que não há variáveis ocultas locais (carregadas com a partícula). Na próxima seção, discutimos os fundamentos matemáticos necessários para derivar o teorema de Bell formalmente.

3. Fundamentos da Teoria Quântica

Nessa seção, apresentamos alguns elementos fundamentais para compreensão da discussão em torno do artigo de John Bell, que ficou conhecido pela famosa desigualdade que leva o nome do autor. Para esse fim, no Material Suplementar, ao fim deste artigo, também é disponibilizado uma explicação dos principais elementos matemáticos necessários para a compreensão da derivação do Teorema de Bell e da notação utilizada. O material também contém a exposição de relações que permitem realizar o desenvolvimento do valor esperado para o estado singleto, que será abordado a seguir de acordo com a Teoria Quântica usual. Assim, em um curso introdutório de Mecânica Quântica, sugerimos que o estudante se familiarize com o material suplementar antes de avançar nas próximas seções.

3.1. O valor esperado do *Spin* para o estado singleto na Teoria Quântica usual

Nesta seção, demonstramos o valor esperado para o *spin* no estado singleto segundo a Teoria Quântica ortodoxa, relacionando com as passagens as quais Bell se refere em

seu artigo de 1964. O artigo inicia a formulação da situação explicando que no caso do artigo EPR a situação descrita é um singleto, como segue

Considere um par de partículas de spin meio formadas de alguma forma no estado de spin singleto e movendo-se livremente em direções opostas. As medições podem ser feitas, digamos por ímãs de Stern-Gerlach, em componentes selecionados de spins $\vec{\sigma}_1$ e $\vec{\sigma}_2$. Se a medição do componente $\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a}$, onde \vec{a} é algum vetor unitário, produz o valor +1, então, de acordo com a mecânica quântica, a medição de $\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{a}$ deve produzir o valor -1 e vice-versa. [16, p. 1]

Nesse trecho Bell se refere aos estados correlacionados do estado singleto, no qual, por consequência, obtêm-se medidas de valores contrários ao utilizar o experimento de Stern-Gerlach. Porém, na continuação do artigo, Bell propõe uma segunda hipótese, na qual

Se duas medições são feitas em locais distantes um do outro, a orientação de um ímã não influencia o resultado obtido com o outro. Uma vez que podemos prever com antecedência o resultado da medição de qualquer componente escolhido de $\vec{\sigma}_2$, medindo previamente o mesmo componente de $\vec{\sigma}_1$, segue-se que o resultado de qualquer medição deve realmente ser premeditado. [16, p. 1]

Além disso, pela TQ usual, um resultado de medição realizado em um aparelho distante do outro não poderia afetá-lo, ou seja, o resultado B para a partícula 2 não tem dependência do ajuste realizado na medição A da direção \vec{a} do ímã correspondente à partícula 1, e vice-versa. Então, o valor esperado do produto de dois componentes $\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a}$ e $\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b}$, para o singleto, deve ser “ $-\vec{a} \cdot \vec{b}$ ”, como será demonstrado na sequência.

Seguindo a relação de “bra” e “ket” (equações S.44 e S.45 do material suplementar) para o estado singleto, e substituindo o vetor genérico “ \vec{v} ” (equação S.43) pelos utilizados por Bell, “ \vec{a} ” e “ \vec{b} ”, utilizando “ a ” como o arco que representa a inclinação do vetor “ \vec{a} ” com a origem e “ b ” o ângulo formado pelo vetor “ \vec{b} ”, podemos reescrever a matriz para esses vetores como

$$\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a} = \begin{pmatrix} \cos(a) & \text{sen}(a) \\ \text{sen}(a) & -\cos(a) \end{pmatrix}_1 \quad (1)$$

$$\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b} = \begin{pmatrix} \cos(b) & \text{sen}(b) \\ \text{sen}(b) & -\cos(b) \end{pmatrix}_2 \quad (2)$$

Onde os sobescritos relacionam os vetores à respectiva partícula representada. Sabendo que Bell se refere ao valor esperado do produto de $\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b}$ para o estado singleto, podemos escrevê-lo como $\langle 0 | \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b} | 0 \rangle$. Temos então que

$$\begin{aligned} & \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b} | 0 \rangle \\ &= \left\{ \begin{pmatrix} \cos(a) & \text{sen}(a) \\ \text{sen}(a) & -\cos(a) \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} \cos(b) & \text{sen}(b) \\ \text{sen}(b) & -\cos(b) \end{pmatrix}_2 \right\} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_2 \right. \\ & \left. - \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_2 \right] \end{aligned}$$

Sendo que as matrizes de sobescrito 1 só atuam em matrizes de sobescrito 1 e o mesmo valendo para o índice 2, tem-se que

$$\begin{aligned} \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b} |0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos(a) & \text{sen}(a) \\ \text{sen}(a) & -\cos(a) \end{bmatrix}_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_1 \begin{bmatrix} \cos(b) & \text{sen}(b) \\ \text{sen}(b) & -\cos(b) \end{bmatrix}_2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_2 \\ &- \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos(a) & \text{sen}(a) \\ \text{sen}(a) & -\cos(a) \end{bmatrix}_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_1 \begin{bmatrix} \cos(b) & \text{sen}(b) \\ \text{sen}(b) & -\cos(b) \end{bmatrix}_2 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_2 \end{aligned}$$

$$\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b} |0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos(a) \\ \text{sen}(a) \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} \text{sen}(b) \\ -\cos(b) \end{pmatrix}_2 - \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \text{sen}(a) \\ -\cos(a) \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} \cos(b) \\ \text{sen}(b) \end{pmatrix}_2$$

Por último, a multiplicação de $\langle 0|$, obtendo

$$\begin{aligned} \langle 0| \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b} |0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} (1 \ 0)_1 (0 \ 1)_2 - \frac{1}{\sqrt{2}} (0 \ 1)_1 (1 \ 0)_2 \right] \begin{pmatrix} \cos(a) \\ \text{sen}(a) \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} \text{sen}(b) \\ -\cos(b) \end{pmatrix}_2 \\ &- \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} (1 \ 0)_1 (0 \ 1)_2 - \frac{1}{\sqrt{2}} (0 \ 1)_1 (1 \ 0)_2 \right] \begin{pmatrix} \text{sen}(a) \\ -\cos(a) \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} \cos(b) \\ \text{sen}(b) \end{pmatrix}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle 0| \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b} |0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \cos(a) (-\cos(b)) - \frac{1}{\sqrt{2}} \text{sen}(a) \text{sen}(b) \right] \\ &- \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \text{sen}(a) \text{sen}(b) - \frac{1}{\sqrt{2}} (-\cos(a)) \cos(b) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle 0| \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b} |0\rangle &= -\frac{1}{2} \cos(a) \cos(b) - \frac{1}{2} \text{sen}(a) \text{sen}(b) - \frac{1}{2} \text{sen}(a) \text{sen}(b) \\ &- \frac{1}{2} \cos(a) \cos(b) \end{aligned}$$

$$\langle 0| \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b} |0\rangle = -\cos(a) \cos(b) - \text{sen}(a) \text{sen}(b)$$

Utilizando propriedades trigonométricas, lembrando que “ $-\cos(a) \cos(b) - \text{sen}(a) \text{sen}(b)$ ” é uma forma alternativa de “ $-\cos(a - b)$ ”, chegamos em

$$\langle 0| \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b} |s = 0\rangle = -\cos(a - b) \quad (3)$$

Ou ainda, pela propriedade de multiplicação de vetores,

$$\langle 0| \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a} \vec{\sigma}_2 \cdot \vec{b} |0\rangle = -\vec{a} \cdot \vec{b} \quad (4)$$

Obtendo então a resposta que, de acordo com a TQ usual, seria o valor esperado para o singleto. Esse valor esperado aparece posteriormente na forma de $P(\vec{a}, \vec{b})$ pela notação de densidade de probabilidade de Bell.

4. Discussão sobre o argumento de J. S. Bell

A introdução do artigo escrito por Bell permite identificarmos quais as noções iniciais do autor quanto ao contexto da Teoria Quântica na época, sendo que nessa breve introdução consta que

O paradoxo de Einstein, Podolsky e Rosen foi apresentado como um argumento de que a mecânica quântica não poderia ser uma teoria completa, mas deveria ser complementada por variáveis adicionais. Essas variáveis adicionais deveriam restaurar a teoria de causalidade e localidade. Nesta nota essa ideia será formulada matematicamente e se mostrará incompatível com as previsões estatísticas da mecânica quântica. É a exigência de localidade, ou mais precisamente que o resultado de uma medição em um sistema não seja afetado por operações em um sistema distante com o qual interagiu no passado, que cria a dificuldade essencial. Houve tentativas de mostrar que, mesmo sem tal exigência de separabilidade ou localidade, nenhuma interpretação de "variável oculta" da mecânica quântica é possível. Essas tentativas foram examinadas em outro lugar e consideradas insuficientes. Além disso, uma interpretação de variável oculta da teoria quântica elementar foi explicitamente construída. Essa interpretação particular tem, de fato, uma estrutura grosseiramente não-local. Isso é característico, de acordo com o resultado a ser provado aqui, de qualquer teoria que reproduza exatamente as previsões da mecânica quântica. [16, p. 195]

Tendo isto, é possível analisarmos a grande influência de Von Neumann [14] na Teoria Quântica, pois seu argumento no livro "*Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*", até então, era considerado como uma prova de impossibilidade de que novas variáveis fossem adicionadas a TQ. Além disso, Bell afirma ter percebido um estrutura "grosseiramente" não-local já na Teoria de Variáveis Ocultas de David Bohm [15], [39], o que o motivou a escrita deste artigo. Elemento este (não-localidade) que é característico de qualquer teoria que reproduzisse as previsões da Mecânica Quântica. Bell ainda destaca que o grande problema de toda essa situação é que um sistema não possa interferir no outro, (como no caso destacado no material suplementar, na sessão sobre o paradoxo EPR) o que é descrito como "localidade". Toda essa questão envolvendo os fundamentos, apesar de muita importância para as discussões posteriores, acabou não tendo uma devida atenção na época de sua elaboração. Essa retomada de discussões sobre algo já "concluído" não era visto como um trabalho que envolvesse realmente física, chegando a ser considerado "metafísica" [17], o que inclusive dificultou que muitos físicos envolvidos nesse debate tivessem dificuldade em suas vidas profissionais. Por isso o destaque à discussão que Bell iniciou com a demonstração de sua desigualdade, o que mostrou que não somente a interpretação, mas a forma como entendemos e estudamos a Teoria Quântica poderia ser reconsiderada.

O experimento que John S. Bell descreve em seu artigo é feito com a suposição de uma medição realizada por aparatos Stern-Gerlach, no qual o estado utilizado é o singleto. Retomando o estado singleto, mas especificamente a equação que o define, ao medirmos o *spin* de uma das partículas correlacionadas, por consequência saberemos o resultado da outra. O estado sendo dado por

$$|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_2 - \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_2 \quad (5)$$

se uma medição nos revela “*spin up*” para a partícula 1 (ou valor +1 no artigo de Bell), o estado acima se reduz para $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_2$, que por consequência fornece o resultado de “*spin down*” para a partícula 2 (ou, valor -1) e vice-versa. Para mostrar que o resultado obtido utilizando “variáveis ocultas” se difere do resultado esperado de acordo com a Teoria Quântica usual, Bell adiciona ao experimento as variáveis ocultas representadas por “ λ ”. De forma que as medições A e B dependam somente das direções \vec{a} e \vec{b} , respectivamente, e da suposta variável oculta λ .

Uma representação do esquema imaginado por Bell é dado na figura 4.

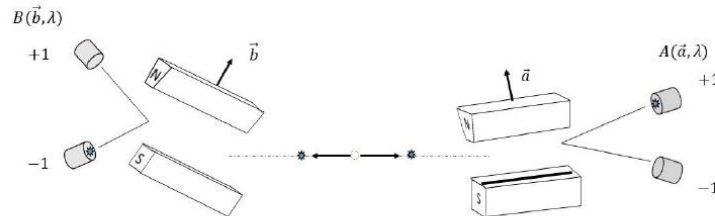


Figura 4: Experimento sugerido por Bell, no qual os aparatos Stern-Gerlach estão distantes um do outro a ponto de que a direção do campo magnético de um não interfira no outro. Um aparelho está apontando para uma direção \vec{a} e o outro para uma direção \vec{b} . Adaptado de Pessoa Jr [40].

As medições realizadas em direções arbitrárias \vec{a} e \vec{b} são denotadas então pelos valores correspondentes a *spin up* e *spin down*, ou +1 e -1 respectivamente. A média dos produtos das medições nas duas direções é representada por $P(\vec{a}, \vec{b})$. Os aparelhos, em uma posição alinhada, vão sempre apresentar resultados opostos, que é a anticorrelação perfeita do estado singlete. Adicionando a suposta variável oculta ou conjunto de variáveis representadas por λ , descreve-se os resultados das duas medidas como $A(a, \lambda)$ e $B(b, \lambda)$. A crítica realizada no paradoxo EPR era em relação ao caráter não-realista da teoria TQ, que aparece, segundo essa visão, no argumento de que $A(\vec{a}, \lambda)$ e $B(\vec{b}, \lambda)$ deveriam ter valores pré-definidos. O argumento que os autores do EPR utilizaram é o de que esse valor é desconhecido por que faltaria uma complementação das informações necessárias da medição com a variável oculta λ , de caráter local, que restauraria o caráter causal da teoria.

Algo que incomodava muitos físicos, como Einstein por exemplo, era a concepção probabilística do mundo quântico e a perspectiva de que as informações sobre um determinado aspecto da TQ só pudessem ser dadas no momento da medição [22].

5. Derivação da desigualdade de Bell

Ao final, no artigo do paradoxo EPR, é deixada em aberto a possibilidade de existir uma descrição completa da realidade física na Mecânica Quântica. Em teoria, essa especificação ou descrição mais completa da Mecânica Quântica seria dada por possíveis

variáveis ocultas λ . Sendo que λ pode representar uma única variável, um conjunto de variáveis ou, até mesmo, um conjunto de funções (essa variável pode ser discreta ou contínua), o que é indiferente para a representação que seguirá, porém Bell escolhe considerá-la um único parâmetro contínuo. Dessa forma, $\rho(\lambda)$ representa a distribuição de probabilidade, ou seja, os possíveis valores de λ e suas probabilidades de ocorrência.

Temos, da seção 4 que mostra o experimento imaginado por Bell, que o resultado da medida por um observador A da medição $\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a}$ é determinada por \vec{a} e λ , assim como para B a medição de $\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{b}$ é determinada por \vec{b} e λ . Sendo λ a representação das variáveis ocultas, não previstas na Teoria Quântica. De forma que:

$$A(\vec{a}, \lambda) = \pm 1 \quad (6)$$

$$B(\vec{b}, \lambda) = \pm 1 \quad (7)$$

O resultado de B não depende de \vec{a} e nem A depende de \vec{b} . Se $\rho(\lambda)$ é a distribuição de probabilidade de (λ) , então o valor esperado do produto de dois componentes é:

$$P(\vec{a}, \vec{b}) = \int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{a}, \lambda) B(\vec{b}, \lambda) \quad (8)$$

Sendo $\rho(\lambda)$ a distribuição de probabilidade normalizada, tem-se

$$\int d\lambda \rho(\lambda) = 1 \quad (9)$$

E, devido as relações (6) e (7), a equação (8) não pode admitir valores menores que -1 , mas sendo possível obter esse valor quando $\vec{a} = \vec{b}$. Se

$$A(\vec{a}, \lambda) = -B(\vec{a}, \lambda) \quad e \quad B(\vec{b}, \lambda) = -A(\vec{b}, \lambda) \quad (10)$$

Então, fazendo essa substituição em (8), tem-se que

$$P(\vec{a}, \vec{b}) = \int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{a}, \lambda) [-A(\vec{b}, \lambda)]$$

$$P(\vec{a}, \vec{b}) = -\int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) \quad (11)$$

Incluindo agora um vetor unitário \vec{c} , representando a medida em uma outra direção arbitrária, com o mesmo procedimento usado para obter (11), tem-se

$$P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c}) = -\int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) - (-\int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{c}, \lambda))$$

$$P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c}) = -\int d\lambda \rho(\lambda) [A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) - A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{c}, \lambda)]$$

Considerando que $[A(\vec{b}, \lambda)]^2 = 1$, podemos fazer a seguinte inserção:

$$P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c}) = -\int d\lambda \rho(\lambda) [A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) - A(\vec{a}, \lambda) (1) A(\vec{c}, \lambda)]$$

$$P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c}) = -\int d\lambda \rho(\lambda) [A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) - A(\vec{a}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) A(\vec{b}, \lambda) A(\vec{c}, \lambda)]$$

Colocando $A(\vec{a}, \lambda)A(\vec{b}, \lambda)$ em evidência, obtêm-se:

$$P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c}) = -\int d\lambda \rho(\lambda) [1 - A(\vec{b}, \lambda)A(\vec{c}, \lambda)] A(\vec{a}, \lambda)A(\vec{b}, \lambda)$$

De acordo com as relações em (6) e (7) a multiplicação do termo $A(\vec{a}, \lambda)A(\vec{b}, \lambda)$ só pode assumir valores -1 e $+1$, de forma que seus produtos tenham como resultado, ao estarem alinhados, -1 (para os vetores apontando em um mesmo sentido, já que são *spins* contrários) e $+1$ (para sentidos opostos) de forma que o módulo do produto dos dois seja $|A(\vec{a}, \lambda)A(\vec{b}, \lambda)| = 1$. Além disso, a distribuição de probabilidade da função de λ não pode assumir valores negativos, de forma que $\rho(\lambda) \geq 0$ e como o produto $A(\vec{b}, \lambda)A(\vec{c}, \lambda)$ é ± 1 , então o termo entre colchetes será 0 ou 2 , para os extremos que podem ser atingidos. Sendo assim o termo fica $[1 - A(\vec{b}, \lambda)A(\vec{c}, \lambda)] \geq 0$. Da mesma maneira, se tomássemos módulo dos dois lados $|P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c})| = |\int d\lambda \rho(\lambda) [1 - A(\vec{b}, \lambda)A(\vec{c}, \lambda)]|$, teríamos que “o valor absoluto de uma integração inteira deve ser menor ou igual ao valor integrado do valor absoluto do integrando” [41, p. 12]. De forma que, com as características que acabaram de ser descritas, podemos propor que a igualdade seja representada pela seguinte desigualdade:

$$|P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c})| \leq \int d\lambda \rho(\lambda) [1 - A(\vec{b}, \lambda)A(\vec{c}, \lambda)]$$

Sendo que $-\int d\lambda \rho(\lambda) A(\vec{b}, \lambda)A(\vec{c}, \lambda)$ é a probabilidade $P(\vec{b}, \vec{c})$, temos então

$$|P(\vec{a}, \vec{b}) - P(\vec{a}, \vec{c})| \leq 1 + P(\vec{b}, \vec{c}) \quad (12)$$

A expressão (12) é a famosa desigualdade de Bell, na mesma forma a qual foi apresentada em seu artigo de 1964. Dada essa desigualdade, é simples mostrar que a previsão da Teoria Quântica é incompatível [42], basta imaginarmos que os três vetores estejam em um mesmo plano e que \vec{c} faça um ângulo de 45° com \vec{a} e \vec{b} , tendo assim

$$P(\vec{a}, \vec{b}) = 0, \quad P(\vec{a}, \vec{c}) = P(\vec{b}, \vec{c}) = -0,707$$

de forma que a desigualdade assuma os valores

$$|-0,707| \leq 1 + (-0,707)$$

$$0,707 \leq 0,294$$

o que claramente viola a desigualdade de Bell.

6. Implicações experimentais e filosóficas após o artigo de Bell

Após a publicação do artigo de Bell, em 1964, vários foram as reinterpretações e testes feitos em torno das desigualdades de Bell [23], [43]–[45]. Entre os anos de 1972 e 1982 (experimento de Alain Aspect) existiam cerca de 11 experimentos e 8 equipes envolvidas com os testes sobre o Teorema de Bell (Freire, 2015). Bell derivou uma prova de impossibilidade para teoria de variáveis ocultas locais, na qual qualquer teoria realista que seja local é limitada por essa desigualdade (12), ou seja, todas teorias de variáveis ocultas locais deveriam respeitar essa desigualdade, mas Bell mostrou que existem

violações para essa relação [40], [46]. O debate que durante muitos anos se afastou do campo acadêmico e livros didáticos, por não ser um “tema da física”, após o desenvolvimento da desigualdade de Bell acabou tomando uma nova perspectiva e atingindo um novo patamar, possibilitando seus testes experimentais [47].

Além dos avanços tecnológicos e experimentais ocasionados pela desigualdade de Bell, podemos destacar também as implicações filosóficas que esse debate proporcionou. As posições filosóficas realistas adotadas na época, defendiam a ideia de que mesmo quantidades não observáveis teriam propriedades bem definidas (como é o caso de as medições terem resultados bem definidos mesmo antes do ato de medição). A Teoria Quântica ortodoxa adotava a perspectiva positivista, na qual só pode ser considerado real aquilo que é observado (o que eliminava os problemas ocasionados por conveniências matemáticas). Pessoa Jr [40] destaca que a derivação do teorema de Bell através das variáveis ocultas pode ser dada de duas formas: determinismo nas medições (todos resultados possíveis poderiam ser obtidos conhecendo-se $|\psi\rangle$ e λ) e a Teoria da Variáveis Ocultas Estocásticas ($|\psi\rangle$ e λ determinam apenas probabilidades para diferentes resultados), ambas discutidas na sequência.

Antes de prosseguirmos com a discussão, é necessário destacar que além da localidade e do realismo, a desigualdade de Bell foi desenvolvida, também, com base na indução. Para que a desigualdade seja testada experimentalmente, seriam necessários vários aparatos Stern-Gerlach para que as medições fossem realizadas (além de vários pares de partículas correlacionadas). Dada essa situação, não é garantido que a distribuição de probabilidade $\rho(\lambda)$ seja constante em todos os experimentos realizados nos aparatos, porém, essa hipótese é necessária para que seja mantida uma amostragem justa, permitindo que fossem realizadas quantidades finitas de medições para a amostragem [40]. Então, de forma geral, o Teorema de Bell requer que abandonemos no mínimo uma dessas três características: localidade, realismo ou indução.

Voltando as duas formas de derivação da desigualdade de Bell, temos que a primeira é denominada de determinismo nas medições, devido ao fato de que conhecendo o estado quântico e as variáveis ocultas, seria possível determinar todos os resultados das medições. O realismo estaria embutido no fato das variáveis ocultas λ determinariam todos os possíveis resultados, de forma bem definida, já a localidade, no fato da orientação de um aparelho não interferir no valor encontrado no outro. Considerando a derivação por variáveis ocultas com determinismo nas medições, o trilema é na verdade um quadrilema, devido a hipótese de “medições fidedignas”

Incluimos uma quarta hipótese, a das medições fidedignas, que supõe que o resultado de uma medição é numericamente igual ao valor possuído pelo observável imediatamente antes da medição. Essa suposição é tão próxima à hipótese do realismo que ela é usualmente incorporada nesta. [40, p. 108]

A Teoria das Variáveis Ocultas Estocásticas considera que “as variáveis ocultas (juntamente com o estado quântico) não determinam univocamente os resultados das medições, mas fornecem apenas probabilidades para diferentes resultados” [40, p. 109], se aproximando assim, de algumas características da interpretação ortodoxa da TQ, porém, produzindo um desigualdade própria. Na dedução da desigualdade nessa versão, aparecem dois tipos de localidade: incontroleável (probabilidade de se obter o “valor” I para a partícula 1 independe do valor II da partícula 2) e controlável (a probabilidade para uma das partículas independe do “observável” sendo medido na outra). Dessa forma,

novamente, o trilema na verdade se apresenta como quadrilema, adicionando a hipótese de independência dos resultados (localidade incontrolável), de forma que

A violação da independência de resultados é análoga ao que ocorre na Mecânica Quântica, segundo a interpretação ondulatória: o *resultado* obtido na medição em uma das partículas provoca um colapso não-local da função de onda (envolvendo as duas partículas), que afeta o resultado a ser obtido para a outra partícula. [40, p. 112]

Pessoa Jr ainda explica que é possível obter a desigualdade através suposição de contrafactuais, a qual não requer a suposição de existência de Variáveis Ocultas, mas “leva a uma discussão metafísica a respeito da realidade de mundos possíveis que não se realizam (ou seja, que são contrários aos fatos, contrafactuais)” [40, p. 105]. Uma medição não realizada também resultaria em valores bem definidos. Nesse caso, precisaríamos considerar que para uma medição em dois pares de partículas, um dos valores medidos é o mesmo, o que seria uma “localidade contrafactual”. Desse jeito o trilema seria entre: definição contrafactual, localidade contrafactual ou indução.

Com essa breve explicação, podemos verificar algumas implicações filosóficas dessas derivações do Teorema de Bell

- Um *realista forte*, defensor do determinismo nas medições (como Bohm), precisa aceitar a não-localidade.
- Para um *realista mais fraco* que defende uma TVO estocástica, basta rejeitar a independência de resultados e trabalhar nas suas implicações filosóficas.
- Um *realista fraco* que admite definições *contrafactuais* precisa abandonar alguma concepção de localidade em mundos contrafactuais.
- Um *realista forte*, defensor do determinismo nas medições (como Bohm), precisa aceitar a não-localidade.
- Para um *realista mais fraco* que defende uma TVO estocástica, basta rejeitar a independência de resultados e trabalhar nas suas implicações filosóficas.
- Um *realista fraco* que admite definições *contrafactuais* precisa abandonar alguma concepção de localidade em mundos contrafactuais. [40, p. 120]

Porém, as preocupações com as conclusões obtidas pelo teorema de Bell e seus testes posteriores com outras derivações da desigualdade causaram consequências que vão além das implicações filosóficas. Toda essa discussão trouxe para primeiro plano, também, a relatividade. A não-localidade “espantou” os físicos, mas não pelo fato da TQ ser não-local, mas pela possibilidade de que influências pudessem se manifestar mais rápido que a velocidade da luz, já que na situação abordada com as partículas correlacionadas a medição do resultado em uma partícula afeta instantaneamente o valor da outra. Dessa forma, influências causais que se propagassem mais rápido que a luz, poderiam ter consequências inaceitáveis, já que, nesse caso, o efeito precederia a causa, provocando anomalias lógicas. Pensando no caso de partícula correlacionadas como elétron e pósitron, um quadro de referência permite verificar uma correlação simétrica no tratamento, não fazendo diferença qual partícula influenciou na medição da outra. Isso nos leva a definir dois tipos de influência

A variedade ‘causal’, a qual produz mudanças reais em algumas propriedades físicas do receptor, detectável por medições nesse subsistema de forma isolada, e um tipo ‘etéreo’, o qual não transmite energia ou informação, e para o qual a única evidência é a correlação em dados obtidos nos dois subsistemas

separados – uma correspondência que, por sua natureza, não pode ser detectada examinando qualquer lista unicamente. As influências causais *não podem* se propagar mais rapidamente do que a luz, mas não há justificativa convincente que explique por que as influências etéreas também não podem. As influências associadas ao colapso da função de onda são do segundo tipo, e o fato de que elas ‘viajam’ mais rápido do que a velocidade da luz pode até ser surpreendente, mas não pode ser considerado catastrófico. [42, p. 428]

Durante os anos de 1964 e 1982, o Teorema de Bell passou por vários testes e reformulações, mesmo que vários experimentos tivessem sido realizados ao seu respeito. Porém, em 1982, uma equipe liderada por Alain Aspect [23] realizou um experimento que foi, para muitos, considerado a “prova definitiva” da violação da desigualdade de Bell. O experimento consistia de dois polarizadores que giravam, para orientações aleatórias, enquanto os dois fótons correlacionados ainda estivessem em voo. A diferença essencial do experimento de Aspect era justamente essa pois, nos experimentos anteriores, as configurações dos instrumentos eram feitas com antecedência, o que permitia uma possível troca de sinais com velocidade menor ou igual a da luz. Porém, nessa situação em que os polarizadores mudavam de direção com as partículas em voo, teríamos que *“a condição de localidade se tornaria então uma consequência da causalidade de Einstein, impedindo qualquer influência mais rápida que a luz”* [23, p. 1805]. Mesmo assim, foi mostrado que para determinados ângulos, a desigualdade de Bell é violada, e as previsões da Teoria Quântica foram confirmadas.

Apesar de todo o desenvolvimento das desigualdades e realizações de experimentos corroborando para a não possibilidade da existência de variáveis ocultas locais, existem alguns teóricos que trabalham para encontrar certas brechas que permitam explicar, através da violação de alguma suposição feita no experimento, a teoria através das variáveis ocultas locais. Essas teorias são denominadas *“loopholes”*, são estudadas por físicos que tentam reafirmar o aspecto de localidade da Teoria Quântica [48]–[50]. Porém, a desigualdade desenvolvida por Bell e o teste “final” de Aspect, Grangier e Roger [51] ainda predomina entre as opiniões dos físicos. Toda essa discussão sobre o desenvolvimento do Teorema de Bell e os conflitos físicos e filosóficos envolvidos constituem uma controvérsia que é considerada como “aberta” nos dias atuais, isso se deve a não comprovação dessas “variáveis ocultas não-locais”.

7. Considerações Finais

A Teoria Quântica é, geralmente, uma disciplina que desperta nos alunos a sensação de dificuldade, o que se deve a abstração necessária na compreensão de alguns dos seus conceitos. Muitas vezes isso ocorre pela desvinculação de uma determinada teoria/conceito do seu contexto de origem, sendo estabelecida somente uma perspectiva instrumentalista dos conteúdos e conceitos compreendidos nas disciplinas que abordam a Física Moderna e Teoria Quântica, deixando de lado vários elementos que foram destacados pelo autor em detrimento da compreensão de como realizar os cálculos que o envolvem [8], [52]. A dificuldade ocasionada pelo desligamento do formalismo com as teorias filosóficas e acontecimentos históricos pode fazer com que o aluno aprenda a utilizar determinado conceito mesmo sem saber seu real significado. Uma das formas de

contemplar esse desenvolvimento permeando as áreas destacadas anteriormente, é a utilização dos trabalhos originais dos autores, as fontes primárias [5], [9].

O estudo dos elementos matemáticos fundamentais para a compreensão do desenvolvimento do argumento de Bell na derivação da desigualdade juntamente do contexto histórico da época e das implicações filosóficas envolvidas, podem proporcionar um certo “aprofundamento” nos conceitos e modelos de interpretação da TQ [53]. Uma certa “base” para iniciar as temáticas envolvidas na Teoria Quântica pode iniciar no Ensino Médio [54], pois a explicação prévia de alguns conceitos sobre o tema pode facilitar a abstração em uma futura abordagem. Para isso, seria indicada a avaliação de como a estruturação dos livros didáticos são feitas e como apresentam o material sobre a Teoria Quântica, atentando aos elementos originais que aparecem na obra [55].

As possibilidades da abordagem do Teorema de Bell vão além da matemática envolvida no desenvolvimento e cálculos sobre a Teoria Quântica, o teorema traz para primeiro plano todo o aspecto filosófico envolvido e a interferências históricas ocorridas em seu contexto. A grande importância da abordagem do artigo original de Bell é, além da importância da desigualdade para a TQ e o desenrolar de aspecto filosófico, que ele foi escrito em um momento de pico de uma das controvérsias mais importantes da Teoria Quântica [56], que era justamente a discussão sobre os fundamentos da TQ e o realismo local. A desigualdade se mostra interessante justamente por evidenciar a relação fundamental entre Teoria Quântica, matemática e filosofia, na medida em que esses aspectos são incorporados no desenvolvimento do Teorema de Bell.

O artigo no qual Bell desenvolve a desigualdade [16] que posteriormente leva seu nome é de extrema importância para a história, pois é um momento no qual os fundamentos da Teoria Quântica são retomados. Bell consegue, partindo dos pressupostos de localidade e realismo, desenvolver uma desigualdade envolvendo variáveis ocultas que, após algumas etapas matemáticas, é violada pela Teoria Quântica. Esse trabalho permitiu que fossem desenvolvidas novas relações de desigualdade, as quais permitiram que o Teorema de Bell adentrasse nos laboratórios de Física, mostrando que a interação entre duas partículas correlacionadas, separadas espacialmente, ocorria instantaneamente, revelando então o caráter não-local da teoria, havendo a possibilidade de existirem variáveis ocultas de caráter não-local, algo não imaginado até o momento.

Considerando toda essa importância da fonte primária, o artigo de J. Bell, este artigo buscou apresentar todos os elementos que seriam necessários para desenvolver o raciocínio tanto matemático quanto filosófico envolvido na derivação do Teorema de Bell. Isso permite a simplificação na compreensão de todos os elementos envolvidos em seu desenvolvimento, pois agrupa em uma seção todos elementos físico-matemáticos necessários. Junto a isso, pode-se acrescentar a explicação detalhada dos argumentos utilizados por Bell e as implicações filosóficas da desigualdade (e sua violação). Sendo assim, esperamos ter aproximado o artigo de Bell de uma formulação que permita sua entrada em contexto pedagógico, proporcionando aos alunos uma explicação mais didática do original.

MATERIAL SUPLEMENTAR

O seguinte material suplementar estará disponível online:
 Apêndice A: Principais Elementos usados por Bell no argumento sobre a desigualdade

REFERÊNCIAS

- [1] H. Kragh, *Sci. Educ.* **1**, 349 (1992).
- [2] M. R. Matthews, *Sci. Educ.* **1**, 11 (1992).
- [3] N. W. Lima, *Rev. Bras. Ens. Ciências e Matemática* **4**, 1027 (2021).
- [4] M. A. Moreira, *Aprendizagem Significativa Crítica*, 2^a. 2010.
- [5] R. Karam, *Rev. Bras. Ensino Ciências e Matemática* **4**, 1067 (2021).
- [6] R. Karam e N. W. Lima, in *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education 3*, editado por J. Guisasola and E. McLoughlin (The International Commission on Physics Education, Dublin, 2022) p. 22.
- [7] N. Lima, C. Cavalcanti, e F. Ostermann, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **43**, e20200270 (2021).
- [8] N. W. Lima e M. M. Nascimento, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **42**, e20190134 (2020).
- [9] N. Lima e R. Karam, *Am. J. Phys.* **89**, 521 (2021).
- [10] R. Karam, *Am. J. Phys.* **88**, 433 (2020).
- [11] G. G. Rosa, N. W. Lima, e J. C. de H. Cavalcanti, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **44**, e20210298 (2022).
- [12] R. Wagner, A. W. da Rosa, N. W. Lima, e M. M. Nascimento, *Rev. de Enseñanza de la Física* **33**, 167 (2021).
- [13] A. Einstein, B. Podolsky, e N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
- [14] J. Von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Julius Springer, Berlin, 1932).
- [15] D. Bohm, *Phys. Rev.* **85**, 166 (1952).
- [16] J. S. Bell, *Phys. Phys. Fiz.* **1**, 195 (1964).
- [17] O. Freire Jr., *The quantum dissidents: Rebuilding the foundations of quantum mechanics (1950-1990)* (Springer, New York, 2015).
- [18] B. Berche, C. Chatelain, C. Dufour, T. Gourieux, e D. Karevski, *Condens. Matter Phys.* **9**, 319 (2006).
- [19] D. Kaiser, *How the hippies saved physics: science, counterculture, and the quantum revival* (W. W. Norton Company, New York, 2011).
- [20] B. D'Espagnat, *Foundations of Phys.* **41**, 1703 (2011).
- [21] N. Herbert, *Am. J. Phys.* **43**, 315 (1975).
- [22] N. D. Mermin, *Phys. Today* **38**, 38 (1985).

- [23] A. Aspect, J. Dalibard, e G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1804 (1982).
- [24] M. G. Alford, *Am. J. Phys.* **84**, 448 (2016).
- [25] L. E. Ballentine e J. P. Jarrett, *Am. J. Phys.* **55**, 696 (1987).
- [26] M. Ferrero, T. W. Marshall, e E. Santos, *Am. J. Phys.* **58**, 683 (1990).
- [27] Y. Hasegawa, R. Loidl, G. Badurek, M. Baron, e H. Rauch, *J. Opt. B Quantum semiclassical Opt.* **6**, S(7) (2004).
- [28] B.-Q. Liu e B. S. J. Zou, *J. Phys. A Math. Theor.* **43**, 245301 (2010).
- [29] E. R. Loubenets e A. Y. Khrennikov, *J. Phys. A Math. Theor.* **52**, 435304(14) (2019).
- [30] K. Hess, H. De Raedt, e K. Michielsen, *Phys. Scr.* **T151**, 014002 (7) (2012).
- [31] J. Foukzon, E. R. Men'kova, e A. A. Potapov, *J. Phys. Conf. Ser.* **1391**, (012073) (2019).
- [32] L. Maccone, *Am. J. Phys.* **81**, 854 (2013).
- [33] J. Pinochet e D. Rojas-Líbano, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **38**, e3303 (2016).
- [34] A. Broadbent, H. A. Carteret, A. A. Méthot, e J. Walgate, *New J. Phys.* **8**, 302 (2006).
- [35] J. R. C. Piqueira, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **33**, 4303 (2011).
- [36] L. E. Ballentine, *Am. J. Phys.* **55**, 785 (1987).
- [37] J. Piaget, *Para Onde Vai a Educação* (Livraria José Olympio Editora, Rio de Janeiro, 1976).
- [38] J. Berkovitz, *Stud. Hist. Philos. Mod. Phys.* **29**, 183 (1998).
- [39] D. Bohm, *Phys. Rev.* **85**, 180 (1952).
- [40] O. Pessoa Jr., in *Temas de Filosofia da Natureza*, editado por K. Chediak e A. A. P. Videira (UERJ, Rio de Janeiro, 2004), p. 93.
- [41] N. Hoglund e O. Jacobson, *Bell's Theorem and Inequalities, with Experimental Considerations*, Royal Institute of Technology (KTH), 2013.
- [42] D. J. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics*, (Pearson, London, 2005), v. 2.
- [43] J. F. Clauser, M. A. Home, A. Shimony, e R. A. Holt, *Phys. Rev. Lett.* **23**, 880 (1969).
- [44] J. F. Clauser e A. Shimony, *Reports Prog. Phys.* **41**, 1881 (1978).
- [45] J. S. Bell, *Rev. Mod. Phys.* **38**, 447 (1966).
- [46] O. Freire Jr., *Cad. Cat. Ens Fis.* **8**, 212 (1991).
- [47] R. da S. Souza, I. Silva, e E. S. Teixeira, *Rev. Bras. Hist. da Ciência* **13**, 171 (2020).
- [48] T. D. Angelidis, *Phys. Rev. Lett.* **51**, 1819 (1983).

- [49] T. W. Marshall, E. Santos, e F. Selleri, *Phys. Lett.* **98A**, 5 (1983).
- [50] I. Pitowsky, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 1299 (1982).
- [51] A. Aspect, P. Grangier, e G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 91 (1982).
- [52] A. Johansson, S. Andersson, M. Salminen-Karlsson, e M. Elmgren, *Cult. Stud. Sci. Educ.* **13**, 205 (2018).
- [53] I. D. Johnston, K. Crawford, e P. R. Fletcher, *Int. J. Sci. Educ.* **20**, 427 (1998).
- [54] A. C. Da Silva e M. J. P. M. De Almeida, *Cad. Bras. Ens. Fis.* **28**, 624 (2011).
- [55] N. W. Lima, F. Ostermann, e C. J. de H. Cavalcanti, *Cad. Bras. Ens. Fis.* **34**, 435 (2017).
- [56] O. Freire Jr., *Sci. Educ.* **12**, 573 (2003).

**APÊNDICE C – MATERIAL SUPLEMENTAR DE “UMA RECONSTRUÇÃO
DIDÁTICA DA APRESENTAÇÃO ORIGINAL DO TEOREMA DE BELL:
SOBRE O PARADOXO DE EINSTEIN, PODOLSKY E ROSEN”.**

**Material Suplementar para “Uma reconstrução didática da
apresentação original do Teorema de Bell: *Sobre o paradoxo de
Einstein, Podolsky e Rosen*”**

Para compreender o argumento presente no artigo escrito por Bell, mapeamos seis conceitos fundamentais da TQ, os quais apresentamos na sequência, em diálogo com textos didáticos contemporâneos, a dizer, a) notação de Dirac; b) relação de completude; c) matrizes de Pauli; d) Estado Singleto; e) Estado Singleto; f) Paradoxo EPR.

a) Notação de Dirac: Kets, Bras, Normalização e Probabilidade de um resultado

Este artigo usará as representações na notação de Dirac (o formalismo bra-ket foi construído “do zero”, por Dirac, a partir da terceira edição do seu livro [1]), a qual representa os vetores de estado por meio de um símbolo denominado “ket”, ou seja

$$\vec{v}_1 \rightarrow |v_1\rangle \quad (\text{S.1})$$

O ket pertence a um espaço vetorial que contempla os números complexos (podendo ter dimensão finita ou infinita), chamado espaço de Hilbert. Para cada “ket” pode-se associar um “bra”, escrito como o transposto conjugado do “ket”, que na forma matricial pode ser escrito como [2]:

$$\langle v_1 | = [(|v_1\rangle)^T]^* \quad (\text{S.2})$$

Podendo ser representado com o símbolo “dagger” †, sendo apresentado então por (S.3):

$$\langle v_1 | = |v_1\rangle^\dagger \quad (\text{S.3})$$

A notação de Dirac para o “ket” e “bra” pode ser representada também na forma matricial, de forma que o “ket” representa uma matriz coluna e o “bra” uma matriz linha, como segue

$$|v_1\rangle \equiv \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}; \langle v_1 | \equiv (a^* \quad b^* \quad c^*) \quad (\text{S.4})$$

Assim, o produto escalar é um “bracket”, representado pela multiplicação da matriz linha pela matriz coluna

$$\langle v_1 | v_1 \rangle = (a^* \quad b^* \quad c^*) \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = aa^* + bb^* + cc^* \quad (\text{S.5})$$

Os produtos internos respeitam duas propriedades [3], sendo elas

$$\text{propriedade 1: } \langle v_1 | v_2 \rangle = \langle v_2 | v_1 \rangle^*$$

$$\text{propriedade 2: } \langle v_1 | v_1 \rangle \geq 0$$

Sendo que dois “kets” são ditos ortogonais se

$$\langle v_1 | v_1 \rangle = 0 \quad (\text{S.6})$$

E ainda podem ser normalizados segundo

$$\| | v_1 \rangle \| = \left(\frac{1}{\sqrt{\langle v_1 | v_1 \rangle}} \right) | v_1 \rangle \quad (\text{S.7})$$

Dois vetores são ditos **ortonormais**:

$$\langle v_i | v_j \rangle = \begin{cases} 0, & \text{se } i \neq j \\ 1, & \text{se } i = j \end{cases} \quad (\text{S.8})$$

A notação de Dirac também leva em consideração os operadores, sendo eles representados por uma letra e o acento circunflexo: $\hat{A}, \hat{B}, \hat{x}, \hat{p}$, entre outros. Existem “kets” muito importantes, conhecidos como autovetores de um operador [3], tendo como propriedade:

$$\hat{A} | a' \rangle = a' | a' \rangle, \hat{A} | a'' \rangle = a'' | a'' \rangle \dots \quad (\text{S.9})$$

onde o conjunto de números $\{a', a'', a'' \dots a^n\}$ são chamados autovalores de \hat{A} . Os postulados da TQ [2] nos mostram que o resultado da medição de uma grandeza física é um dos autovalores do seu operador associado e que um $|\psi\rangle$ pode ser expandido em uma base n-dimensional de forma que

$$\text{espectro discreto } |\psi\rangle = \sum_n c_n |n\rangle \quad (\text{S.10})$$

$$\text{espectro contínuo } |\psi\rangle = \int c(a) |a\rangle da \quad (\text{S.11})$$

Para sabermos a probabilidade de se obter, em um espectro de autovalores contínuo, resultados entre “a” e “a + da”, basta utilizarmos:

$$dP(a) = |\langle a | \psi \rangle|^2 da \quad (\text{S.12})$$

Em um caso, onde quiséssemos medir valores entre um intervalo de posição, por exemplo, teríamos, utilizando (S.12) que

$$dP(x) = |\langle x | \psi \rangle|^2 dx \quad (\text{S.13})$$

Onde, por (S.11)

$$\langle x|\psi\rangle = \langle x|\int_{-\infty}^{-\infty} c(x')|x'\rangle dx' = \int_{-\infty}^{+\infty} c(x')\langle x|x'\rangle dx' \quad (\text{S.14})$$

Onde $\langle x|x'\rangle$ são dois elementos de base ortonormal contínua, o que é representado pela função delta de Dirac $\delta(x-x')$. Utilizando a propriedade de filtragem da função delta de Dirac¹ tem-se que

$$\langle x|\psi\rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} c(x')\delta(x-x')dx' = c(x) \quad (\text{S.15})$$

Então $|\langle x|\psi\rangle|^2$ é na verdade

$$|\langle x|\psi\rangle|^2 = c(x)c^*(x) \quad (\text{S.16})$$

Onde $c(x)c^*(x)$ nos remete à TQ ondulatória, na qual tem-se $\psi(x)\psi^*(x)$, com a conclusão de que o coeficiente de expansão, na notação de Dirac para esse caso é igual a função de onda, podendo reescrever $|\psi\rangle$ como

$$|\psi\rangle = \int \psi(x)|x\rangle dx \quad (\text{S.17})$$

Então, na verdade, (S.13) pode fornecer a densidade de probabilidade, como segue

$$dP(x) = |\langle x|\psi\rangle|^2 dx = \psi(x)\psi^*(x)dx \quad (\text{S.18})$$

Ao integrarmos dos dois lados com os limites entre pontos genéricos a e b tem-se:

$$P_{ab}(x) = \int_a^b \psi(x)\psi^*(x)dx \quad (\text{S.19})$$

b) Relação de Completeza (Fechamento) e Representação Matricial

Se A é um operador hermitiano e seus autovetores normalizados constituem um conjunto completo ortonormal, então um ket arbitrário pode ser expandido em termos dos seus autovetores. Dado um ket arbitrário $|v_1\rangle$, sua representação no espaço gerado pelos autoestados de A pode ser descrita da seguinte forma (considerando que A tenha espectro discreto):

$$|v_1\rangle = \sum_{a'} c_{a'} |a'\rangle \quad (\text{S.20})$$

¹ A filtragem da função delta dá-se da seguinte forma

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\delta(x-a)dx = f(a) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x-a)dx = f(a)$$

Sendo que

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x-a)dx = 1$$

Multiplicando à esquerda por $\langle a'' |$ teremos

$$\langle a'' | v_1 \rangle = \sum_{a'} c_{a'} \langle a'' | a' \rangle$$

Pela propriedade de ortonormalidade, $\langle a'' | a' \rangle = \delta_{a'' a'}$

$$\langle a'' | v_1 \rangle = c_{a''} \langle a'' | a'' \rangle$$

Restando

$$c_{a''} = \langle a'' | v_1 \rangle \quad (\text{S.21})$$

Substituindo a expressão (S.21) em (S.20) tem-se que

$$|v_1\rangle = \sum_{a'} |a'\rangle \langle a' | v_1 \rangle$$

Isso mostra que na expressão

$$|v_1\rangle = \left(\sum_{a'} |a'\rangle \langle a' | \right) |v_1\rangle$$

O que está entre parênteses deve ser igual a um, de forma que a expressão abaixo é conhecida como relação de completudeza ou fechamento

$$\sum_{a'} |a'\rangle \langle a' | = \mathbb{1} \quad (\text{S.22})$$

Essa relação, quando aplicada duas vezes em um operador A nos dá

$$A = \sum_{a''} \sum_{a'} |a''\rangle \langle a'' | A | a' \rangle \langle a' |$$

Então o operador pode ser representado por uma matriz

$$A \doteq \langle a'' | A | a' \rangle$$

Ou, de forma mais explícita

$$A \doteq \begin{pmatrix} \langle a^{(1)} | A | a^{(1)} \rangle & \langle a^{(1)} | A | a^{(2)} \rangle & \dots \\ \langle a^{(2)} | A | a^{(1)} \rangle & \langle a^{(2)} | A | a^{(2)} \rangle & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad (\text{S.23})$$

No caso especial de sistemas de spin $\frac{1}{2}$, os kets de base utilizados são $|S_z; \pm\rangle$ (que por questão de simplificação na representação serão escritos como $|\pm\rangle$), sendo que $|+\rangle$ é *spin up* e $|-\rangle$ é *spin down* [3]. Nesse caso, a relação de completudeza é dada em função de $|+\rangle$ e $|-\rangle$, então

$$(|+\rangle\langle +|) + (|-\rangle\langle -|) = \mathbb{1} \quad (\text{S.24})$$

Como um operador pode ser representado também por

$$A = \sum_{a'} a' |a'\rangle \langle a' | \quad (\text{S.25})$$

E os autovalores do sistema de spin $\frac{1}{2}$ são $\pm \frac{\hbar}{2}$, então o operado S_z fica

$$S_z = \left(\frac{\hbar}{2}\right) (|+\rangle\langle +|) + \left(-\frac{\hbar}{2}\right) (|-\rangle\langle -|) \quad (\text{S.26})$$

Colocando $\left(\frac{\hbar}{2}\right)$ em evidência, encontramos

$$S_z = \frac{\hbar}{2} [|+\rangle\langle +| - |-\rangle\langle -|] \quad (\text{S.27})$$

Esse operador pode agora ser aplicado nos kets $|+\rangle$ e $|-\rangle$, resultando em

$$S_z|+\rangle = \frac{\hbar}{2}|+\rangle\langle +|+\rangle - \frac{\hbar}{2}|-\rangle\langle -|+\rangle = \frac{\hbar}{2}|+\rangle \quad (\text{S.28})$$

$$S_z|-\rangle = \frac{\hbar}{2}|+\rangle\langle +|-\rangle - \frac{\hbar}{2}|-\rangle\langle -|-\rangle = -\frac{\hbar}{2}|-\rangle \quad (\text{S.29})$$

Como um operador aplicado a um ket resulta em outro ket

$$A|\alpha\rangle = |\beta\rangle$$

Aplicando o bra $\langle a'|$ pelo lado esquerdo na equação acima, temos que

$$\langle a'|A|\alpha\rangle = \langle a'|\beta\rangle$$

E agora o operador identidade entre A e $|\alpha\rangle$

$$\langle a'|\beta\rangle = \sum_{a''} \langle a'|A|a''\rangle \langle a''|\alpha\rangle$$

Então o ket $|\alpha\rangle$ pode ser representado por uma matriz na seguinte forma

$$|\alpha\rangle \doteq \begin{pmatrix} \langle a^{(1)}|\alpha\rangle \\ \langle a^{(2)}|\alpha\rangle \\ \langle a^{(3)}|\alpha\rangle \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (\text{S.30})$$

Dessa forma, a representação matricial dos kets $|+\rangle$ e $|-\rangle$ é

$$|+\rangle \doteq \begin{pmatrix} \langle +|+\rangle \\ \langle -|+\rangle \end{pmatrix} \doteq \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{S.31})$$

$$|-\rangle \doteq \begin{pmatrix} \langle +|-\rangle \\ \langle -|-\rangle \end{pmatrix} \doteq \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{S.32})$$

c) Matrizes de Pauli

As matrizes de Pauli ($\vec{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$) levam o nome do físico que as desenvolveu, Wolfgang Pauli, e estão associadas aos operadores de spin ($\vec{S} = \frac{\hbar}{2}\vec{\sigma}$). Os operadores de spin são usados para representar os resultados de uma medida de *spin* nas direções x , y e z . Uma construção desses operadores pode ser encontrada em [3], [4]. As matrizes de Pauli são matrizes complexas, unitárias e hermitianas [3], escritas e representadas pela letra grega sigma e o índice sobescrito que representa x , y e z :

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{S.33})$$

$$\sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{S.34})$$

$$\sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (\text{S.35})$$

O fato de as matrizes de Pauli demandarem o uso de número complexos tem sido usado por diferentes autores para corroborar a noção de que números complexos são essenciais na descrição da Teoria Quântica [5]. Essas matrizes representam as seguintes duas importantes propriedades

$$\sigma_i^2 = \mathbb{1} \quad (\text{S.36})$$

$$\sigma_i \sigma_j + \sigma_j \sigma_i = 0 \quad \text{para } i \neq j \quad (\text{S.37})$$

Considerando agora $\vec{\sigma} \cdot \vec{v}$, em que \vec{v} é um vetor unitário de três dimensões, e $\vec{\sigma} = \sigma_x \mathbf{i} + \sigma_y \mathbf{j} + \sigma_z \mathbf{k}$, podemos entender isso como sendo uma matriz 2x2, de forma que

$$\vec{\sigma} \cdot \vec{v} \equiv \sum_k v_k \sigma_k \quad (\text{S.38})$$

Utilizando as matrizes (S.33), (S.34) e (S.35) podemos escrever a equação (S.38) da seguinte forma

$$\begin{aligned} \sum_k v_k \sigma_k &= v_x \sigma_x + v_y \sigma_y + v_z \sigma_z \quad (\text{S.39}) \\ &= \begin{pmatrix} 0 & v_x \\ v_x & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -iv_y \\ iv_y & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_z & 0 \\ 0 & -v_z \end{pmatrix} \end{aligned}$$

A operação acima resulta na conhecida matriz

$$\vec{\sigma} \cdot \vec{v} \equiv \begin{pmatrix} v_z & v_x - iv_y \\ v_x + iv_y & -v_z \end{pmatrix} \quad (\text{S.40})$$

Agora introduzindo coordenadas esféricas, considerando o vetor \vec{v} unitário, tem-se que $v_x = \text{sen}\theta \cos\phi$, $v_y = \text{sen}\theta \text{sen}\phi$ e $v_z = \cos\theta$, ficamos com

$$\begin{aligned} \vec{\sigma} \cdot \vec{v} & \quad (\text{S.41}) \\ & \equiv \begin{pmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta \cos\phi - i \text{sen}\theta \text{sen}\phi \\ \text{sen}\theta \cos\phi + i \text{sen}\theta \text{sen}\phi & -\cos\theta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Isolando os termos comuns e utilizando a identidade Euler, podemos reescrevê-la como

$$\begin{pmatrix} \cos\theta & \operatorname{sen}\theta(\cos\phi - i\operatorname{sen}\phi) \\ \operatorname{sen}\theta(\cos\phi + i\operatorname{sen}\phi) & -\cos\theta \end{pmatrix} \quad (\text{S.42})$$

$$= \begin{pmatrix} \cos\theta & \operatorname{sen}\theta e^{-i\phi} \\ \operatorname{sen}\theta e^{i\phi} & -\cos\theta \end{pmatrix}$$

De forma que

$$\vec{\sigma} \cdot \vec{v} \equiv \begin{pmatrix} \cos\theta & \operatorname{sen}\theta e^{-i\phi} \\ \operatorname{sen}\theta e^{i\phi} & -\cos\theta \end{pmatrix} \quad (\text{S.43})$$

Ou ainda, quando o ângulo ϕ for zero, indicando um mesmo plano, tem-se a forma

$$\vec{\sigma} \cdot \vec{v} \equiv \begin{pmatrix} \cos\theta & \operatorname{sen}\theta \\ \operatorname{sen}\theta & -\cos\theta \end{pmatrix} \quad (\text{S.43})$$

Esse resultado mostra o operador de spin na direção do vetor \vec{v} .

d) Estado Singlete

O singlete se refere ao estado onde uma ou mais partículas se encontram em um estado correlacionado, geralmente uma representação unidimensional, onde o valor total de *spin* é zero [3]. Einstein, Podolsky e Rosen foram os primeiros a apontar a existência de estados correlacionados, mostrando que partículas produzidas em certas condições (como obedecendo algum princípio de conservação) tem medidas correlacionadas [6].

Assim, o singlete permite identificar ou antecipar a medição do outro par do estado, pois se esse par de partículas correlacionadas tiver em uma das partículas um *spin* “para cima” a outra, por consequência terá *spin* “para baixo” e vice-versa. Então, no contexto de medição, esse estado nos permite saber que em metade das vezes teremos resultado *spin up* e a outra metade será *spin down*.

O estado singlete, na notação “ket”-“bra” é dada por

$$|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_2 - \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_2 \quad (\text{S.44})$$

$$\langle 0| = \frac{1}{\sqrt{2}} (1 \ 0)_1 (0 \ 1)_2 - \frac{1}{\sqrt{2}} (0 \ 1)_1 (1 \ 0)_2 \quad (\text{S.45})$$

Onde o ‘ket’ $|0\rangle$ representa o estado singlete e $\langle 0|$ o ‘bra’ dual, com os índices que representam duas partículas correlacionadas (1 e 2). Além disso, as matrizes

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_1 \quad e \quad \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_1$$

Representam respectivamente *spin* para cima e para baixo na situação da partícula 1, já as matrizes

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}_2 \quad e \quad \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_2$$

Representam os estados de *spin* para baixo e *spin* para cima no caso da partícula 2.

Uma propriedade muito importante desse estado quântico é a chamada “anticorrelação perfeita”, propriedade que faz com que os resultados das medições feitas em um par de partículas correlacionadas sejam sempre opostos um ao outro. Se uma partícula tem sua leitura modificada, a outra também o tem. Se uma detecção foi +1 (*spin up*), a outra será -1 (*spin down*), de forma que o produto das correlações é sempre -1. O Singleto recebe um nome especial devido a essa propriedade de anticorrelação perfeita, sendo chamado de estados emaranhados [7].

e) Valor Esperado

Como já demonstrado no tópico “a)”, pode-se calcular, para uma variável contínua, a probabilidade do seu resultado ser encontrado entre um intervalo a e $a + da$, que por vezes também é representado como $\rho(a)da$, sendo que “ a ” representa a variável contínua desejada. O termo $\rho(a)$ é denominado de fator de proporcionalidade ou, de forma mais precisa [4], densidade de probabilidade. De forma que a probabilidade de encontrar um determinado valor entre dois pontos a e b do espectro contínuo de uma variável dada uma certa densidade de probabilidade, seja, de acordo com (S.13) e (S.19), representada² também por

$$P_{ab} = \int_a^b \rho(a)da \quad (\text{S.46})$$

Na interpretação probabilística, geralmente, não é possível atribuir valores exatos (como especificar momento e posição) em uma medição. Mas é possível prever a probabilidade da ocorrência dos resultados possíveis em uma medição, conhecendo-se a função de onda ou estado associado a grandeza que pretende ser medida. O valor esperado é então definido como a média dos possíveis valores que a grandeza pode assumir, ponderado pelas suas possíveis probabilidades de ocorrência [4].

O valor esperado de um operador \hat{A} , é representado por $\langle \hat{A} \rangle$ e, matematicamente, tem-se que o valor esperado de um operador \hat{A} em um estado $|\psi\rangle$ é representado da seguinte forma

$$\langle \hat{A} \rangle = \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle \quad (\text{S.47})$$

f) Paradoxo EPR

Antes de prosseguir com o desenvolvimento da desigualdade e dos argumentos de Bell, é interessante retomarmos o que deu início a essa discussão. Em 1935 Einstein, Podolsky e Rosen [8] publicam um artigo que fazia críticas em relação a completude da Teoria Quântica. A relação de existência de uma correspondência entre elementos de teoria e da realidade era considerada pelos autores uma característica de completude de uma teoria física. Dessa forma, um critério de realidade de uma quantidade física é justamente a possibilidade de podermos realizar previsões sobre o sistema sem perturbá-lo. A Teoria Quântica usual assume que uma função de onda Ψ forneceria a descrição completa para um sistema, porém, essa função de onda é expressa em termo de uma sobreposição de autoestados de um operador que representa a grandeza física observada.

² Considerando que $\psi^*\psi$ é uma densidade de probabilidade, ao substituímos $\rho(a)$ por $\psi^*\psi$, é possível obter a equação descrita em (S.19).

Sendo assim, não podemos definir simultaneamente os valores de autoestados de grandezas que não comutam. Então se escolhermos medir posição e momento, ao medirmos uma, não será possível definir simultaneamente o valor da outra, de forma que uma delas acaba não tendo realidade física.

Isso gerou duas conclusões: “(1) a descrição da mecânica quântica da realidade dada pela função de onda não é completa ou (2) quando os operadores correspondentes a duas grandezas físicas não comutam as duas grandezas não podem ter realidade simultânea” [8, p. 778]. Por consequência, teríamos duas opções: a mecânica quântica é completa e a posição e momento não são reais ao mesmo tempo ou a teoria quântica é incompleta e posição e momento são reais. Einstein, Podolsky e Rosen partem então do pressuposto de que a função de onda nos dá todas as informações sobre o sistema, propondo então, um experimento mental, que acaba revelando um novo fenômeno de estudo na Teoria Quântica, o emaranhamento

O experimento consiste em duas partículas livres com momentos opostos, em um sistema isolado, que interagiram durante um intervalo breve de tempo. O fato de terem momentos de valor igual, mas em sentidos opostos, permite que ao medirmos o valor do momento no sistema I, saibamos por consequência o momento no sistema II. Ao final do argumento, os autores mostram que as descrições realizadas nas medidas dos dois sistemas são consistentes com a mesma realidade. Esse fator torna a conclusão (1) falsa, destacando então que a função de onda não descreve a realidade dada. Mais detalhes sobre o argumento EPR podem ser encontrados em Wagner, da Rosa, Lima e Nascimento [6]. Shimony e Clauser [9], em seu artigo sobre o Teorema de Bell, destacaram que EPR tiveram uma terceira condição colocada como verdadeira, que foi o pressuposto de que não há ação a distância na natureza. Assim, o desenvolvimento do artigo EPR foi baseado em realismo e localidade, estando o último evidenciado na observação de que um sistema não poderia afetar instantaneamente o outro em locais espacialmente separados.

Referências

- [1] P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics* (Oxford University Press, London, 1958), v. 4.
- [2] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, e F. Laloë, *Quantum Mechanics* (John Wiley and Sons, New York, 1977).
- [3] J. J. Sakurai e J. Napolitano, *Mecânica Quântica Moderna* (Bookman, Porto Alegre, 2013)
- [4] D. J. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics*, (Pearson, London, 2005), v. 2.
- [5] R. Karam, *Am. J. Phys.* **88**, 39 (2019).
- [6] R. Wagner, A. W. da Rosa, N. W. Lima, e M. M. Nascimento, *Rev. Enseñanza de la Física* **33**, 167 (2021).
- [7] O. Pessoa Jr., in *Temas de Filosofia da Natureza*, editado por K. Chediak e A. A. P. Videira (UERJ, Rio de Janeiro, 2004), p. 93.
- [8] A. Einstein, B. Podolsky, e N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
- [9] J. F. Clauser e A. Shimony, *Reports Prog. Phys.* **41**, 1881 (1978).