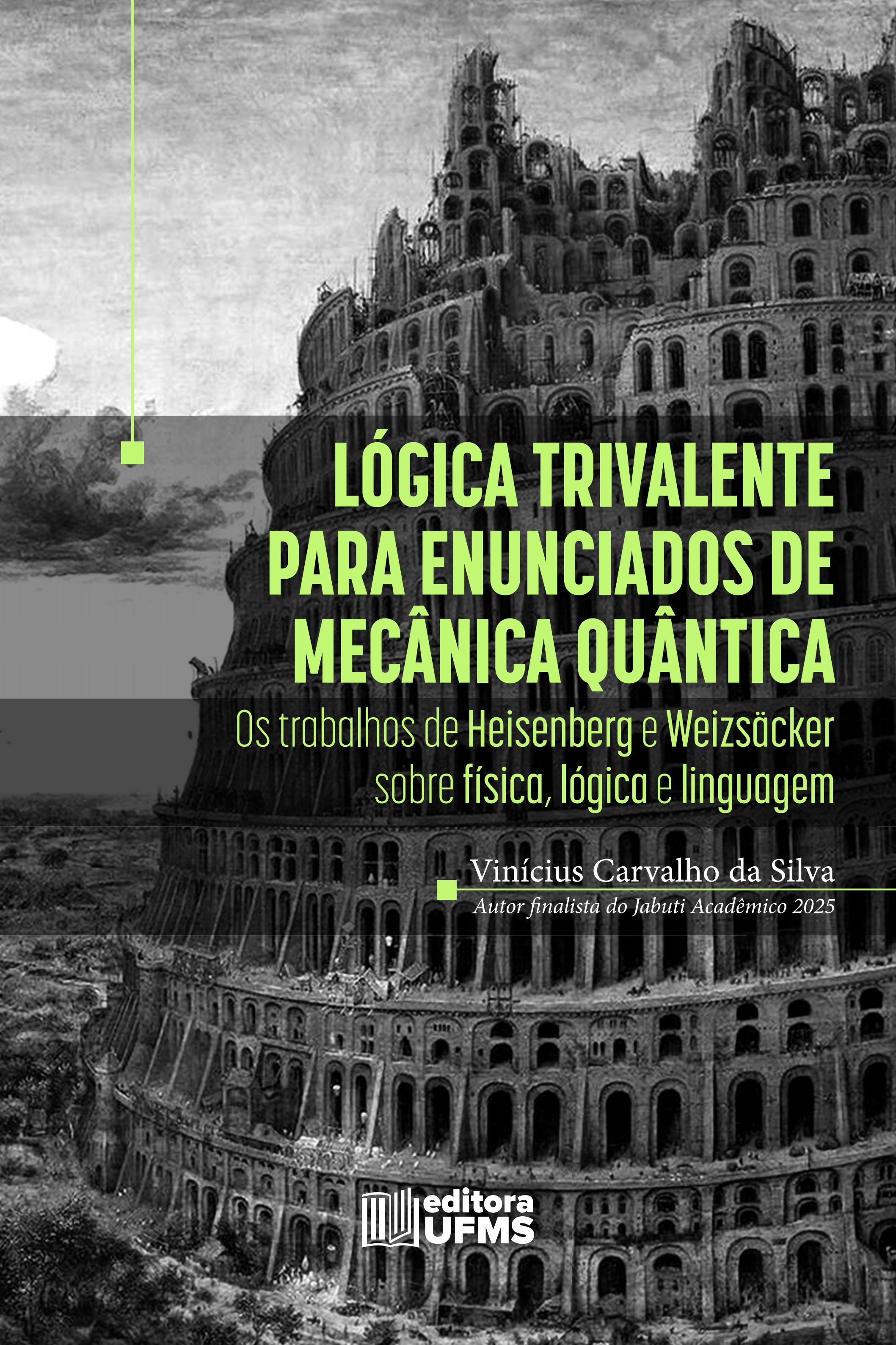


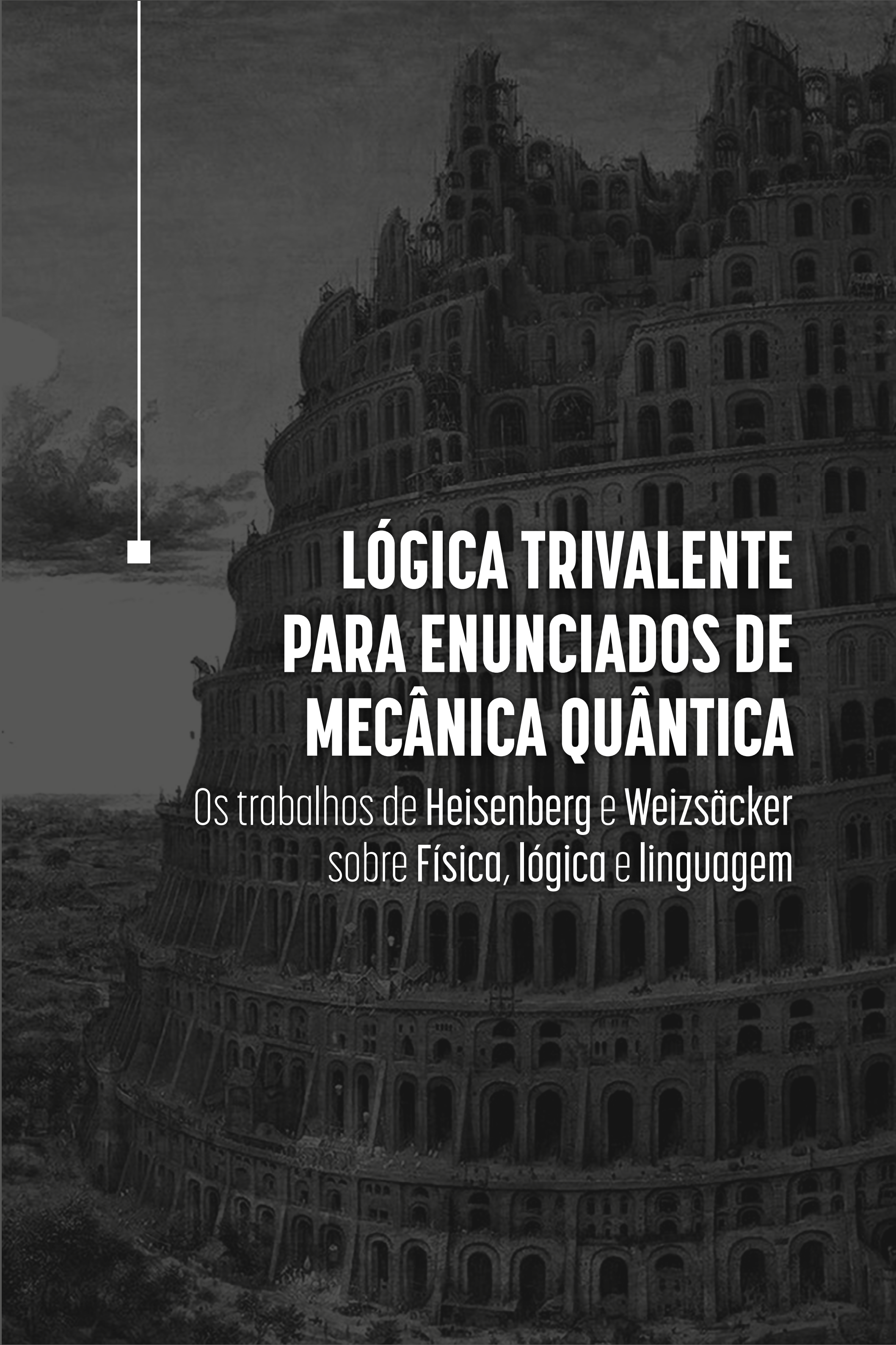
LÓGICA TRIVALENTE PARA ENUNCIADOS DE MECÂNICA QUÂNTICA

Os trabalhos de Heisenberg e Weizsäcker sobre física, lógica e linguagem

Vinícius Carvalho da Silva

Autor finalista do Jabuti Acadêmico 2025

editora UFMS



LÓGICA TRIVALENTE PARA ENUNCIADOS DE MECÂNICA QUÂNTICA

Os trabalhos de Heisenberg e Weizsäcker sobre Física, lógica e linguagem

UNIVERSIDADE FEDERAL
DE MATO GROSSO DO SUL

Reitora
Camila Celeste Brandão Ferreira Ítavo

Vice-Reitor
Albert Schiaveto de Souza

Obra aprovada pelo
CONSELHO EDITORIAL DA UFMS
Resolução nº 347-COED/AGECOM/UFMS,
de 28 de abril de 2026.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Diretoria de Bibliotecas – UFMS, Campo Grande, MS, Brasil)

Silva, Vinícius Carvalho da.
Lógica trivalente para enunciados de mecânica quântica [recurso eletrônico] : os trabalhos de Heisenberg e Weizsäcker sobre física, lógica e linguagem / Vinícius Carvalho da Silva. – Campo Grande, MS : Ed. UFMS, 2026.
66 p. : il.

Dados de acesso: https://repositorio.ufms.br
Bibliografia: p. 64-65
ISBN: 978-85-7613-837-2

1. Física – Filosofia. 2. Teoria quântica. 3. Lógica - Estudos. 4. Linguagem - Estudos. 5. Werner Heisenberg – Estudos. 2. Carl Friedrich von Weisäcker – Estudos. I. Título.

CDD (23) 530.01

Bibliotecário responsável: Valdeir da Silva Severino – CRB1/ 3.044

LÓGICA TRIVALENTE PARA ENUNCIADOS DE MECÂNICA QUÂNTICA

Os trabalhos de Heisenberg e Weizsäcker sobre física, lógica e linguagem

Vinícius Carvalho da Silva

Campo Grande-MS, 2026

editora UFMS

Vinícius Carvalho da Silva

1ª edição: 2026

Capa
Torre de Babel. Oléo sobre tela. Pieter Bruegel, 1563.
Museu Boijmans Van Beuningen. Países Baixos.

Preparação do texto, Projeto Gráfico e Editoração Eletrônica
Secretaria da Editora UFMS

Revisão
A revisão linguística e ortográfica é de responsabilidade do autor

A grafia desta obra foi atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa, de 1990, que entrou em vigor no Brasil em 1º de janeiro de 2009.

As opiniões e os conteúdos expressos neste material são de responsabilidade do autor e não refletem, necessariamente, a opinião do corpo editorial.

Direitos exclusivos para esta edição

Secretaria da Editora UFMS - SEDIT/AGECOM/UFMS
Av. Costa e Silva, s/n˚ - Bairro Universitário
Campo Grande - MS, 79070-900
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Fone: (67) 3345-7205
e-mail: sedit.agecom@ufms.br

Editora associada à

ABEU
Associação Brasileira das
Editoras Universitárias

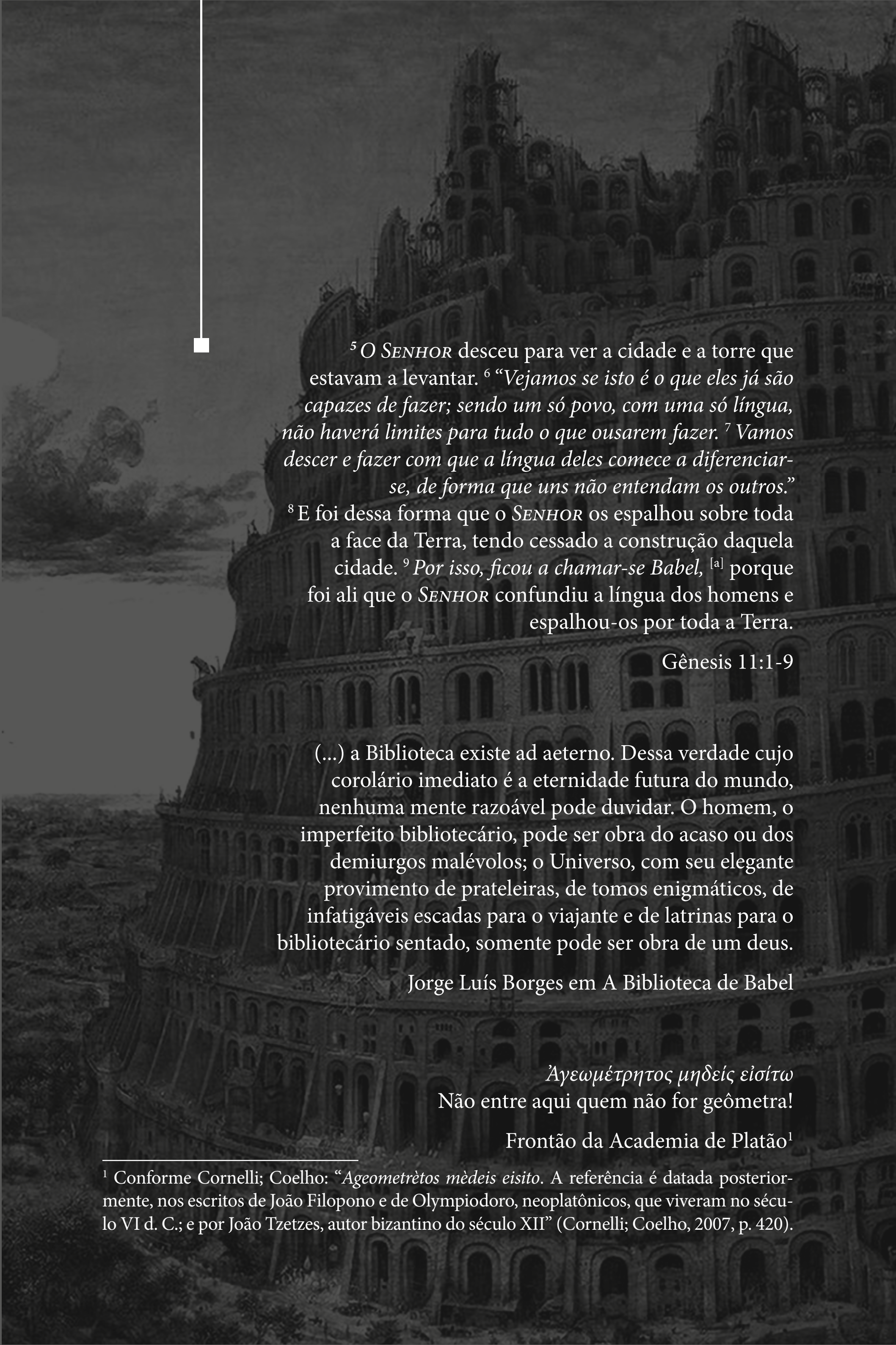
ISBN: 978-85-7613-837-2

Versão digital: março de 2026.

Apoio:

UNIVERSIDADE FEDERAL
DE MATO GROSSO DO SUL

Obra contemplada no Edital AGECOM nº 3/2024
Divulgação Técnico-Científica para Publicação pela Editora UFMS - Fluxo Contínuo.



5 *O* SENHOR desceu para ver a cidade e a torre que
estavam a levantar. 6 "*Vejamos se isto é o que eles já são
capazes de fazer; sendo um só povo, com uma só língua,
não haverá limites para tudo o que ousarem fazer.* 7 *Vamos
descer e fazer com que a língua deles comece a diferenciar-
se, de forma que uns não entendam os outros.*"
8 E foi dessa forma que o *SENHOR* os espalhou sobre toda
a face da Terra, tendo cessado a construção daquela
cidade. 9 *Por isso, ficou a chamar-se Babel,* [a] porque
foi ali que o *SENHOR* confundiu a língua dos homens e
espalhou-os por toda a Terra.

Gênesis 11:1-9

(...) a Biblioteca existe ad aeterno. Dessa verdade cujo corolário imediato é a eternidade futura do mundo, nenhuma mente razoável pode duvidar. O homem, o imperfeito bibliotecário, pode ser obra do acaso ou dos demiurgos malévolos; o Universo, com seu elegante provimento de prateleiras, de tomos enigmáticos, de infatigáveis escadas para o viajante e de latrinas para o bibliotecário sentado, somente pode ser obra de um deus.

Jorge Luís Borges em A Biblioteca de Babel

Ἀγεωμέτρητος μηδείς εἰσίτω
Não entre aqui quem não for geômetra!

Frontão da Academia de Platão[1]

[1] Conforme Cornelli; Coelho: "*Ageometrètos mèdeis eisito*. A referência é datada posteriormente, nos escritos de João Filopono e de Olympiodoro, neoplatônicos, que viveram no século VI d. C.; e por João Tzetzes, autor bizantino do século XII" (Cornelli; Coelho, 2007, p. 420).

Sumário

Introdução

Com o desenvolvimento da mecânica quântica no primeiro quarto do século passado diversos problemas filosóficos fundamentais se impuseram. Tais questões são de ordem ontológica, epistemológica, e lógica, além de discussões também suscitadas em sentido axiológico por seus próprios pioneiros.

Por um lado, isso decorreu do fato de que a geração de cientistas que, desde Planck e Einstein, abriu caminho até construir as primeiras edificações da MQ, reuniu personagens conhecidos como *físicos filósofos*, que possuíam não somente grande erudição filosófica, mas a atitude crítica fundamental para colocar as questões mais radicais que poderiam ser postas em seu campo de conhecimento. Isto significa que eles não apenas faziam física, como se perguntavam pela natureza da física. Por outro lado, eles se viram diante da necessidade de empreender um intenso trabalho de análise e revisão no nível dos fundamentos, envolvendo a crítica dos conceitos físicos mais básicos.

O mundo quântico que emergia era abundante em eventos estranhos, exóticos e até mesmo desconcertantes, o que inevitavelmente nos levaria a uma série de questões fulcrais: qual é a ontologia das entidades físicas mais básicas? Qual é a natureza das partículas elementares? Como podemos conhecer a trajetória de uma partícula? Como descrever o que ocorre entre as observações em um determinado arranjo experimental? Qual é a natureza da probabilidade nos eventos quânticos? Como fica a causalidade e o determinismo no quadro da nova física? Como representar, em sentido ontológico, a dualidade onda-partícula? Que limites epistemológicos nos impõem as relações de incerteza? Como elaborar uma explicação – ou ao menos uma representação – harmônica e ordenada do real, unificando a mecânica quântica e a física relativística?

Após uma primeira fase, marcada por Planck, pelo debate entre Einstein e Bohr, pelo modelo ondulatório de Broglie, a teoria quântica ganhou novo impulso, e consolidou-se, de fato como uma "mecânica", com os trabalhos inovadores de Heisenberg, Schrödinger, Pauli, Jordan, Dirac, Born, von Neumann e outros.

Heisenberg desenvolveu a mecânica matricial e o princípio de incerteza, que estabelecia a impossibilidade de conhecermos simultaneamente a posição e o momentum de uma partícula. Schrödinger elaborou a mecânica ondulatória, que demonstrou ser matematicamente equivalente à mecânica matricial de Heisenberg, e por meio de sua equação, descreveu a evolução temporal das partículas em espaços de Hilbert em termos de funções de onda. A MQ nos revelou um quadro conceitualmente inovador, e assombroso, da natureza.

PRIMEIRA PARTE

Da Interpretação

Negação, axiomática e terceiro excluído no texto aristotélico e na lógica da física moderna

1. Fundamentos axiomáticos da lógica clássica

Nosso objetivo é analisar os seis "tópicos" iniciais de *Da Interpretação* em busca de uma compreensão da definição, e poderíamos dizer, da função da negação na lógica aristotélica, especificamente, na teoria das proposições. Queremos entender a relação entre a negação proposicional e o axioma aristotélico do terço excluído, e porque alguns autores situaram-no fora dos limites de aplicabilidade de lógicas não-clássicas.

Assumimos aqui que a lógica clássica tem como fundamento uma base axiomática formada por três leis: identidade, não contradição e terceiro excluído. Nessa ocasião, apresentaremos os axiomas seguindo as definições de Thomas L. Saaty em *The Three Laws of Thought, Plus One: The Law of Comparisons.*

> *Law 1: The Law of Identity*
>
> Two entities *x* and *y* are identical if they share the same properties. A necessary and sufficient condition for two entities *x* and *y* to be identical (be the same) is that they share the same properties: $\forall x \forall y[x=y \rightarrow \forall P(Px \leftrightarrow Py]$ and $\forall x \forall y[\forall P(Px \leftrightarrow Py) \rightarrow x=y]$. In other words: for all *x* and all *y*, the statement *x* is *y* implies that for every property P, if *x* has that property, then *y* has that property and conversely. It is also true that for all properties, if *x* and *y* have the same properties, then they are identical (...)
>
> *Law 2: The Law of Noncontradiction*
>
> Either *x* or not *x* is true and there is no other possibility.
>
> *Law 3: The Law of the Excluded Middle*
>
> An entity *x* has or does not have a property P. Conversely, a property *P* is either possessed by an entity *x* or it is not possessed by *x*. (Saaty, 2014, p. 48)[1].

[1] "*Lei 1: A Lei da Identidade*
Duas entidades x e y são idênticas se compartilharem as mesmas propriedades. Uma

O terceiro excluído é um axioma na medida em que é uma lei do pensamento, ou, uma verdade primeira, universal, conforme a interpretação de Jonathan Barnes:

> Com o termo "axioma", Aristóteles provavelmente visa designar aquelas verdades primeiras que são comuns a todas as ciências ("todos os homens usam"): assim, o princípio de não-contradição, em particular, e as leis da lógica, em geral, são axiomas (Barnes, 2009, p. 109).

A interpretação que Barnes oferece da definição aristotélica de axioma, como uma verdade primeira comum a todas as ciências parece deixar claro que o que podemos entender por "função" do axioma em Aristóteles é algo muito próximo, senão o mesmo, do que em Euclides, como notamos das palavras de Philot[2]:

> Em Euclides as *noções comuns* [*axiomas*] não são limitadas apenas às ciências matemáticas, possuindo um caráter amplo e fundamental para outras ciências. Por este motivo é que muitas destas noções poderiam ser trocadas pelos princípios da lógica

condição necessária e suficiente para que duas entidades x e y sejam idênticas (sejam iguais) é que elas compartilhem as mesmas propriedades: $\forall x \forall y[x=y \to \forall P(Px \leftrightarrow Py]$ e $\forall x \forall y[\forall P(Px \leftrightarrow Py) \to x=y]$. Em outras palavras: para todo x e todo y, a afirmação x é y implica que, para toda propriedade P, se x tem essa propriedade, então y tem essa propriedade e vice-versa. Também é verdade que, para todas as propriedades, se x e y têm as mesmas propriedades, então eles são idênticos (...)

Lei 2: A lei da não-contradição
Ou x ou não x é verdadeiro e não há outra possibilidade.

Lei 3: A Lei do Terceiro Excluído
Uma entidade x tem ou não tem uma propriedade P. Por outro lado, uma propriedade P ou é possuída por uma entidade x ou não é possuída por x" [nossa tradução] (Saaty, 2014, p. 48).

[2] A definição aristotélica e euclidiana de axioma não permanece atual, tendo sido reformulada na lógica moderna, como podemos constatar das palavras de Philot: "Outras noções que foram modificadas foram a de *postulado* e de *axioma*. Na concepção antiga, um postulado era um princípio indemonstrável de uma ciência particular, enquanto que o axioma era um princípio indemonstrável de qualquer ciência. Esta diferenciação entre axioma e postulado foi relegada, e seu sentido foi modificado. Ambos, na concepção moderna, são entendidos como hipóteses básicas" (Philot, 2009, p. 43).

> sem alterarem em nada as demonstrações feitas por Euclides, pois, assim como a lógica, estas noções pretendem ser como um órganon de todo e qualquer sistema de conhecimento (Philot, 2009, p. 16, grifo nosso)[3].

Como veremos adiante, a negação proposicional na lógica aristotélica assumirá um papel central na formulação axiomática do terceiro excluído e da não contradição. Mas, antes de tudo, é necessário percorrermos os tópicos inicias de *Da interpretação*, buscando um entendimento conciso do texto aristotélico. A que se propõe Aristóteles neste texto? Qual seu objetivo? Ao menos em uma leitura simples, poderíamos dizer que em *Da interpretação* Aristóteles elabora sua teoria das proposições, até mesmo, sua lógica proposicional. Nas palavras de Robin Smith: *"Da interpretação oferece uma teoria da estrutura das proposições e suas condições de verdade, que é em grande parte pressuposta pelos primeiros analíticos"* (Smith, 2009, p. 109).

[3] Esta possibilidade elencada por Philot, de que seria possível, na geometria de Euclides, trocar axiomas euclidianos por aristotélicos sem que a estrutura interna do sistema fosse alterada, "parece" ficar patente no caso do primeiro axioma do Livro I dos Elementos de Euclides: *"As cousas, que são eguaes a uma terceira, são eguaes entre si"* (Na tradução da edição de 1855 da Universidade de Coimbra). De acordo com Euclides, se A=C e B=C, então A=B. Poderíamos defender que essa é justamente uma formulação possível do princípio de identidade de Aristóteles. Nas palavras de Tugendhat e Wolf, de acordo com Aristóteles, se a e b são, uma "única" coisa, então a e b são idênticos (Tugendhat; Wolf, 1997, p. 132). Sendo assim, Se a e c são a mesma coisa, e b e c são a mesma coisa, então a e b são a mesma coisa. O axioma de Euclides é ainda mais "indissociável" do princípio de identidade de Leibniz, tal como nos apresenta Rafael Vaz: "Derivam da Lei de Leibniz os princípios de: 1) transitividade, quando atribuímos uma relação de identidade entre dois entes e, de um deles, reconhecemos sua identidade com uma terceira entidade, a primeira e a última também partilharão desta relação. Formalmente, representamos: se $x = y$ e $y = a$, então $x = a$; e 2) simetria, porque o que individua um ente pode ser deduzido de um segundo que com ele compartilha de uma relação de identidade. Formalmente, se $x = y$, então $y = x$ (Vaz, 2006, p. 36-37). A Formalização do axioma de Euclides e da identidade dos indiscerníveis de Leibniz pode ser, a rigor, a mesma: A=C, B=C, A=B.

2. Da interpretação

No tópico I, 16a1, Aristóteles busca definir o que é nome e o que é verbo, para em seguida, explicar o que devemos entender por negação, afirmação, sentença e proposição[4]. Como definir nomes e verbos sem antes definir o que são palavras? Aristóteles então define palavras como "símbolos dos sons dos atos de fala" e os sons dos atos de fala como "símbolos dos conteúdos internos do sujeito da fala", ou, símbolos das paixões da alma. Antes mesmo de passar à definição de nome e verbo, Aristóteles nos esclarece que nomes e verbos são como conceitos isolados. Se não forem compostos, ou seja, se não estiverem em relação qualitativa e quantitativa com outros, não podem ser considerados verdadeiros ou falsos. Já neste momento podemos notar uma introdução à teoria das proposições como unidades elementares – unidades mínimas – de valor de verdade, pois S isoladamente, e P isoladamente, não podem ser nem verdadeiros nem falsos, mas somente operações como "Todo S é P" ou "Algum S não é P", por exemplo.

No tópico II, Aristóteles define o nome como um "som que possui significado", estabelecido por convenção e que não faz referência ao tempo. Assim, o som Petrópolis é um som que significa, neste caso específico, uma determinada cidade brasileira. Um som formado por dois: "Petro" e "Polis". Para o significado do nome

[4] Estamos a trabalhar com a segunda edição do Órganon da Edipro, tradução de Edson Bini (2010). Tal tradução apresenta algumas diferenças em relação àquela de Emmanuel Carneiro Leão, para o grupo Ousia, da UFRJ. (Disponível em: https://www.docsity.com/pt/de-interpretatione-platao/4850718/?src=social_login). Na tradução de Carneiro Leão, onde, na versão de Bini, se lê "negação", "afirmação", "sentença" e "proposição", figuram, pela ordem, apófase, catáfase, apófanse e discurso: "Primeiro, se deve estabelecer o que é um nome e um verbo; depois, o que é uma apófase e uma catáfase, uma apófanse e um discurso" (Leão, 2012, s/p.).

Petrópolis, tanto Petro, quanto Polis, tomados isoladamente, não significam nada. Isto no caso dos nomes compostos por outros. Já os nomes simples significam algo. O som "cão" é suficiente para nos provocar a representação mental de um cão. Mas basta. Não sabemos cão o quê... O nome isolado nada nos comunica. Nesta passagem, Aristóteles destaca a importância dos conceitos de símbolo e convenção: Um som não é naturalmente um nome. O som *x* não nomeia nada, até que, por convenção, o som *x* se torna um símbolo. A conversão parece dupla: o símbolo passa a ser o nome, o ente se converte em nomeado.

Há ainda os nomes indefinidos[5]. S é um nome. Não-S não é um nome. A negação de um nome não é um nome. Temos dois Fs, F1 e F2. Sabemos que F1=João C. Chamamos F1 de João C. Por convenção, João C significa F1. Este é o seu nome. E se perguntássemos a um interlocutor faceiro como se chama F2, e ele nos dissesse que se chama Não-João C? Não-João evidentemente é um não-nome. Tudo o que saberíamos é que não podemos chamar F2 de João C, mas não sabemos do que realmente chamá-lo. Ora, não sabemos seu nome, logo a negação de um nome de um ente S nos informa apenas que, para nós, seu nome permanece indefinido.

Vemos em 16b1 que além dos nomes e dos nomes indefinidos, há os casos dos nomes. Tomemos a frase "De André para Rafael". Se dividirmos a frase não em quatro unidades, mas em duas: (1) "De André" e (2) "Para Rafael", não obtemos dois nomes, mas dois casos dos nomes. A diferença entre um nome e um caso de nome é que, quando há uma relação temporal entre um predicado e um nome, temos uma proposição que é verdadeira ou falsa. O mesmo não ocorre com os casos dos nomes. Assim, quando a André,

[5] "Nomes indeterminados", na tradução de Carneiro Leão (Leão, 2012, s/p.).

acrescentamos a relação temporal "é" e o predicado flamenguista, temos a proposição André é flamenguista, que pode ser verdadeira ou falsa. Falsa, posto que André seja botafoguense. Mas, se a "Para Rafael", por exemplo, acrescentamos "é" e "pesquisador do INMETRO", obtemos a frase sem sentido "Para Rafael é pesquisador do INMETRO". Não formamos uma proposição, logo, a sentença não pode ser verdadeira ou falsa.

O nome, sendo assim, porta um significado peculiar. O verbo, por sua vez, também porta significado. No tópico III, Aristóteles define o verbo como palavra que (1) transmite significado + (2) possui referência temporal. O nome nos diz de *x*, o que é, o verbo nos diz o que é e quando é. Tomemos o verbo "investigar". Investigar, isoladamente, possui certo significado. Sabemos que não se trata de jogar, amar, correr, mas de investigar. Aristóteles, todavia, nega significado pleno ao verbo isolado. Investigar o que? Quem investiga? Quando investiga? Mas se temos que "S investiga P", então o verbo predica alguma coisa P de alguma coisa S. Noutros termos, o verbo estabelece que P está presente em S. Este estar presente significa algo como "P faz parte", "P pertence" a S, mas além, indica quando. P está presente em S no presente. O verbo, sendo assim, predica P de S no tempo presente. Passado e futuro são indicados por tempos verbais. Assim, "S investigou" e "S investigará" não são verbos, mas casos de verbos, na verdade, são tempos verbais.

Do mesmo modo que a negação de um nome não é um nome, a negação de um verbo não é um verbo. "Não-investigará" ou "não-investigou" não são verbos propriamente ditos, mas verbos indefinidos[6].

[6] A tradução de Edson Bini nos parece inconsistente neste ponto. Os exemplos que ele nos fornece de verbos indefinidos são "Está não-doente" e "Está não-bem". Em ambos os casos, os verbos não estão sendo negados, mas sim os predicados que se seguem. Deste modo,

No tópico IV Aristóteles define sentença como fala que porta significado e proposição como ato de fala apofântico. A sentença "S é P em T1" pode ser verdadeira ou falsa, logo é uma proposição[7]. As partes que constituem a sentença proposicional, embora possuam certo significado, não podem ser verdadeiras ou falsas. Deste modo, apenas "S", "P" e "T1", não são atos de fala apofânticos. Suponhamos que alguém nos dissesse que "E1 = Rach 3 (S) é a composição mais complexa (P) do século XX (T1)". Sem dúvida, podemos sustentar, tanto que E1 = V, quanto que E1 = F. Todavia, digamos que nosso interlocutor nos diga apenas "Rach 3", ou apenas "século XX". Não cabe sustentarmos que ambos os atos de fala sejam ou verdadeiros ou falsos. Ou seja, eles não expressam nem uma afirmação, nem uma negação, e por isso não podem ser nem verdadeiros, nem falsos. A proposição é o tema do tópico V, será definida como sentença que ou afirma ou nega a relação entre predicados e sujeitos, sendo, portanto, ou verdadeira ou falsa. As proposições podem ser simples ou compostas[8]. As proposições simples indicam um fato singular em virtude de uma conjunção, tal como S é P. As proposições compostas indicam multiplicidade e são compostas por pro-

temos "Está", que é verbo, + "não-bem" que é um nome indefinido. Todavia, Aristóteles não parece afirmar que um verbo indefinido assuma a fórmula "verbo" + "nome indefinido". Já na tradução de Carneiro Leão, o que em Bini se lê "Está não-bem, lemos "Não cura". Neste caso temos o verbo curar no presente (do contrário seria um tempo verbal) e sua negação. Sendo assim, temos de fato um não-verbo, a negação da ação. O verbo indeterminado parece assumir a fórmula "negação" + "verbo" assim como o nome indeterminado a fórmula "negação" + "nome".

[7] Na lógica aristotélica este é o chamado princípio de bivalência, de acordo com o qual, uma proposição é verdadeira ou falsa, como podemos notar das palavras de Abílio Rodrigues Filho em *Fazedores-de-verdade, a tese da disjunção e o princípio do terceiro excluído*: "A lógica clássica se baseia em uma concepção ontológica do princípio da bivalência segundo a qual toda proposição é verdadeira ou falsa independentemente de termos conhecimento do seu valor de verdade" (Rodrigues Filho, 2007, p. 26). Abilio Rodrigues Filho em "*Revista PHILÓSOPHOS*, Goiânia, v. 12, n. 2, p. 11–32, jul./dez. 2007".

[8] Aristóteles chama as proposições de *apófansis*. A afirmação simples é *catáfasis* e a negação simples *apófasis*.

posições simples, como é o caso da proposição "S é P e P não é X"[9]. Uma proposição simples, em suma, é um ato de fala dotado de significado, que por meio de um conectivo afirma ou nega um predicado qualquer de um sujeito qualquer, com referência ao tempo, seja por meio de um verbo que indique o tempo presente, ou por casos de verbo que indiquem o passado ou futuro[10].

É no tópico VI que o tema da negação será discutido pela primeira vez. Aristóteles define a afirmação como a proposição que "afirma alguma coisa de alguma coisa", em suma, que afirma um predicado para um sujeito. A negação, por sua vez, é "a proposição que nega alguma coisa de alguma coisa", que nega um predicado de um sujeito. Nas palavras de Smith:

> Numa negação, algo é negado de alguma outra coisa (...). Desse modo, qualquer asserção consiste, segundo Aristóteles, em duas partes: um predicado, que é ou afirmado ou negado de algo, e um sujeito, do qual o predicado é afirmado ou negado (Smith, 2009, p. 66).

É a partir do tópico em questão, quando Aristóteles refina sua teoria das proposições, que podemos deduzir o chamado quadrado das oposições. A primeira relação proposicional quadrática pode ser deduzida quando Aristóteles sustenta que tudo que pode ser afirmado pode ser negado e que tal relação é simétrica. Se S é P é possível, então S não é P é possível.

---

[9] Ernest Tugendhat e Ursula Wolf em *Propedêutica Lógico-Semântica* definem frases complexas como frases que contém expressões componentes, que por sua vez também são frases apofânticas, isto é, que podem ser verdadeiras ou falsas (Tugendhat; Wolf, 1997, p. 84).

[10] As proposições aristotélicas simples e compostas serão chamadas de proposições moleculares e atômicas por Russel em "Lógica e Conhecimento": "Chamo-as proposições moleculares porque elas contêm outras proposições que podemos chamar seus átomos, e significo por proposições moleculares as proposições que possuem as palavras 'ou', 'se', 'e', e assim por diante. Se digo 'ou hoje é terça feira, ou todos nós fizemos um erro estando aqui', esta é a espécie de proposição que significo ser molecular" (Russel, 1978, p. 77).

S é P______________________S não é P

C

Simetricamente, se S não é P é possível, então S é P é possível. Sendo assim, de toda proposição afirmativa podemos deduzir uma proposição negativa que é a sua oposta. Esta relação entre proposições opostas é chamada de contradição.

A negação, ou, simplesmente, o uso do "não" na teoria das proposições de Aristóteles é o que nos permite pensar a relação de contradição entre as proposições. Porque tal relação recebe o nome de contradição, penso como suficiente, para nossos modestos propósitos, a explicação de Heyting[11]:

> Estritamente falando, nós devemos bem distinguir o uso do "não" na matemática daquelas explicações envolvendo-o e que não são matemáticas, e que são expressadas em linguagem ordinária. Nas asserções matemáticas nenhuma ambigüidade pode surgir: o "não" tem sempre um significado estrito. "A proposição p não é verdadeira", ou "a proposição p é falsa" significa "Se nós supomos a verdade de p, nós somos levados a uma contradição" (Sanz, 2006, p. 73)[12].

[11] Wagner de Campos Sanz sustenta que a noção de contradição tal como a elaborada por Heyting é, em suma, aristotélica: "Se fizermos uso da conceituação que é no fundo de origem aristotélica acerca dos opostos contraditórios e usarmos a negação para representá-la, então as fórmulas A e ~A representariam simplesmente duas proposições opostas contraditórias (...) Chamaremos essa regra de dedução de **reductio ad contradictione** ou, simplesmente, **reductio**. Provavelmente é algo similar ao que está sendo capturado nessa regra que Heyting tinha em mente, pois, da suposição A, somos levados a um par de sentenças contraditórias entre si. O significado de ~A, segundo Heyting, seria exatamente este" (Sanz, 2006, p. 73). Sanz, todavia, problematiza a noção de contradição de Heyting, considerando-a insatisfatória e discorre acerca do fato de que na lógica intuicionista a noção de contradição é substituída pela noção de "absurdo". Para mais, consultar a obra de Sanz mencionada na nota seguinte.

[12] Em *Uma Investigação acerca das regras para a negação e o absurdo em dedução natural*, de Wagner de Campos Sanz. Unicamp, 2006.

Dizer que a relação entre duas proposições é uma relação de contradição é o mesmo que dizer que, quando afirmamos que ambas são verdadeiras ao mesmo tempo, caímos em contradição. Todavia, Aristóteles não define exatamente o que são as proposições contraditórias no tópico VI. É no início do tópico VII que veremos que tipo de oposição pode ser a contradição. É a partir de 17b1 que Aristóteles introduz a quantificação em sua teoria proposicional, fato fundamental para a definição das relações quadráticas de oposição. Há proposições universais e proposições particulares. Proposições universais são aquelas que, dado um conjunto *x* (ou um "universo" *x*) se referem à totalidade de seus elementos.

Proposições particulares são aquelas que não se referem a tal totalidade. Após a introdução da quantificação na teoria, Aristóteles define a relação de contrariedade entre proposições. Duas proposições são contrárias quando ambas quantificam do mesmo modo, mas qualificam de modos opostos.

Assim, "Todo S é P" é contrária a "Todo S não é P". As proposições contrárias, quando universais, não podem ser ambas verdadeiras, mas podem ser ambas falsas. Sendo assim, se temos que "P1 = Todo filósofo é investigador" e "P2 = Todo filósofo não é investigador", Se P1 = V, então P2 = F", logo, temos a disjunção ou P1 ou P2. Todavia, ambas podem ser falsas. Com relação às proposições contrárias particulares, podem ser ambas verdadeiras, embora não possam ser ambas falsas. Se temos um conjunto de *J*'s, "Algum *J* é *x*" e "Algum *J* não é *x*" podem ser verdadeiras simultaneamente. Do mesmo modo, "Algum *J* é *x*" é F, logo, "Algum *J* não é *x*" consequentemente é V.

Tendo definido as proposições contrárias, Aristóteles define as proposições contraditórias mencionadas já no tópico anterior.

São contraditórias as proposições que quantificam e qualificam de modo oposto, a saber, quando uma é universal afirmativa e a outra é particular negativa e, inversamente, quando uma é universal negativa e a outra é particular afirmativa. Exemplo:

Todo S é P

C′

Algum S não é P

Como vimos, proposições contrárias diferem somente quanto à qualidade, enquanto as proposições contraditórias diferem quanto à quantidade e à qualidade. De acordo com o modo como as proposições se opõem, elas podem ou não ser verdadeiras ou falsas ao mesmo tempo. São tais relações o que mais nos interessa no momento, pois delas poderemos deduzir tanto o princípio de não contradição, quanto o princípio do terceiro excluído. Na última frase do tópico VIII, Aristóteles afirma que, se temos duas proposições contraditórias uma é necessariamente verdadeira e a outra é necessariamente falsa. Temos aí o princípio de não contradição. Se p = "Todo S é P" e p' = "Algum S não é P", se p = V, então p' = F. Se um enunciado afirma p e p' (p = V e p' = V), então este enunciado se contradiz, logo: $\neg (P \wedge \neg P)$. Nas palavras de Tugendhat e Wolf: *O que se chama de "princípio da contradição", é o princípio segundo o qual é impossível que um enunciado que se contradiga seja verdadeiro* (Tugendhat; Wolf, 1997, p. 43). Poderemos deduzir o princípio do terceiro excluído do tópico IX quando Aristóteles afirma que somos levados a concluir, que todas as afirmações e todas as negações, são ou verdadeiras ou falsas. Se P é uma proposição, então P é V ou não V, não havendo uma terceira possibilidade: $P \vee \neg P$.

3. A inaplicabilidade do terceiro excluído em lógicas não clássicas

Temos, então, dois axiomas aristotélicos que podem ser deduzidos dos primeiros tópicos de *Da interpretação*[13]. São estes, o axioma da não contradição $\neg (P \wedge \neg P)$ e o axioma do terceiro excluído $P \vee \neg P$. Somemos a estes o axioma da identidade, $A = A$[14]. Ou, em formalismo não aristotélico:

$$\forall x \forall y [x = y \rightarrow \forall P (Px \leftrightarrow Py)]$$ [15]

Portanto:

$$\forall x \forall y [\forall P (Px \leftrightarrow Py) \rightarrow x = y]$$ [16]

---

[13] Sanz, 2006, p. 3

[14] De acordo com Krause e da Costa, outro princípio "violado" pela mecânica quântica é o de identidade. Em alguns trabalhos como *Axioms for Collections of Indistinguishable Objects*, de 1996 e *Sortal predication and quantum physics*, de 2002, Krause defende que na mecânica quântica os objetos devem ser tratados como não-indivíduos, logo, devemos dispor de teorias que violam o princípio de identidade dos indiscerníveis. Jaison Schinaider, doutorando da UFSC em 'Identidade relativa, predicados sortais e a Indistinguibilidade das partículas na mecânica quântica' enfatiza que os objetos quânticos devem ser tratados como entidades para as quais a noção de identidade não faz sentido. Michael Dickson, da Universidade de Indiana, em *Quantum Logic Is Alive*, publicado no periódico *Philosophy of Science,* volume 68, número 3, do biênio 2000/2001, afirma que a importância de uma lógica quântica permanece "atual". De acordo com o artigo, uma das possíveis implicações da LQ seria que a lei distributiva da álgebra booleana seja "errada", não errada para sistemas quânticos, ou no contexto das teorias físicas, mas errada em si.

[15] "Para todo x e todo y, a afirmação x é y implica que, para toda propriedade P, se x tem essa propriedade, então y tem essa propriedade e vice-versa (Ver nota 1).

[16] "Também é verdade que, para todas as propriedades, se x e y têm as mesmas propriedades, então eles são idênticos" (Idem).

Tais axiomas, ou ao menos algum deles, seriam recusados a partir de novos desenvolvimentos em lógica e em física. Nos perguntamos, por exemplo, se o axioma do terceiro excluído, ou simplesmente princípio do terceiro excluído, como o chamaremos, é ou não é aplicável ao sistema fechado de proposições da mecânica quântica. Todavia, consideramos ser pertinente ressaltar que a inaplicabilidade do princípio do terceiro excluído é abordada em outras áreas que não as chamadas lógicas quânticas. Na lógica intuicionista, por exemplo, o terceiro excluído não seria aplicável às proposições matemáticas. Nas palavras de Abílio Rodrigues:

> Para o matemático intuicionista, uma proposição p é verdadeira se nós temos uma prova de p, e falsa se nós podemos mostrar que pressupor que existe uma prova de p nos leva a uma contradição. Por essa razão, nem sempre podemos afirmar $p \vee \neg p$ de uma dada proposição p. Nessa perspectiva, o trabalho do matemático não consiste em apreender a verdade acerca de entidades matemáticas que existem independentemente da mente humana, em uma realidade paralela, ou algum tipo de "mundo platônico". Daí vem a rejeição do terceiro excluído, sendo o exemplo habitual a chamada conjectura de Goldbach:
>
> *(G) Todo número inteiro e par maior que 2 é igual à soma de dois primos.*
>
> Como não se tem uma prova de (G), tampouco um contraexemplo para (G), não se pode afirmar a disjunção $G \vee \neg G$. A rejeição de (TEX) pela lógica intuicionista, portanto, está diretamente relacionada ao caráter epistemológico da matemática intuicionista (Rodrigues, 2007, p. 27-28, grifo nosso).

O princípio do terceiro excluído, na lógica intuicionista, não poderia ser aplicado, simplesmente porque não podemos nos decidir entre uma proposição e a sua negação. Logo, a fórmula $P \vee \neg P$ não seria possível. Um contra-intucionista poderia ainda argumentar a possível introdução do terceiro excluído nestes casos a partir da apresentação da fórmula sob a forma hipotética: "Se P então não não-P". Desta forma, poderiam dizer que a estrutura do terceiro excluído permaneceria intacta. Assim, não poderíamos dizer $P \vee \neg P$ porque não podemos nos decidir entre P e $\neg P$, mas se, por hipótese, $P = V$, então necessariamente $\neg P = F$, logo $P = V \rightarrow \neg P = F$, de modo que $(P \vee \neg P) = (P = V \rightarrow \neg P = F)$. Mas o intuicionista poderá ainda nos responder que este apelo à formulação hipotética não resolve o imbróglio, pois mesmo que P fosse uma proposição verdadeira (ou, na formulação hipotética: Mesmo SE P fosse uma proposição verdadeira) se não pudéssemos "demonstrar" que $P = V$, não tornaríamos o sistema imune à contradição, o que nos remete ao teorema de Gödel.

A rejeição do terceiro excluído por não podermos nos decidir entre uma proposição e a sua negação pode ser deduzida do teorema de incompletude de Kurt Gödel[17]. Nas palavras de Hao Wang: *(Gödel) acaba por concluir que em sistemas suficientemente fortes como o Principia Mathematica (teoria dos tipos) ou a teoria dos conjuntos ("Zermelo-Fraenkel") existem proposições indecidíveis* (Wang, 1981, p. 46:653–659). O teorema da incompletude de Gödel pode ser lido assim:

Teorema de Gödel (primeiro): Há teorias consistentes efetivamente geradas capazes de expressar a aritmética elementar, nas quais existe ao menos uma sentença verdadeira, todavia indemonstrável.

[17] Na década de 1930 Gödel já havia investigado a completude e a consistência de sistemas formais. Sustentar a impossibilidade de um sistema plenamente consistente é, em suma, declarar a impossibilidade de um sistema plenamente livre de contradições. De acordo com Fernando Ferreira em *A Matemática de Kurt Gödel*: No verão de 1930, Gödel toma como problema a consistência formal da análise. Isto significa considerar um sistema axiomático totalmente formalizado da análise e mostrar que dele não se deduzem contradições (Ferreira, 2006, p. 7). Fernando Ferreira em http://www.ciul.ul.pt/~ferferr/GodelMat.pdf.

Se uma sentença é indemonstrável (embora verdadeira), então, *strictu senso*, não posso "provar" que tal sentença seja verdadeira, tampouco que seja falsa, logo, não posso provar que o terceiro excluído seja o caso: $\neg(P \vee \neg P)$. Ou seja, uma teoria consistente é aquela na qual o axioma do terceiro excluído se aplica, uma teoria inconsistente é aquela na qual o mesmo não se aplica. De acordo com Felipe O. S. Netto:

> Uma vez que os teoremas de Gödel tratam de consistência e completude, é necessário entender bem estes conceitos. Por uma teoria consistente, entende-se uma teoria que não gera contradição, ou seja, não existe nela uma proposição P de modo a se poder provar tanto P como sua negação formal $\neg P$. Já uma teoria completa é aquela que permite concluir a veracidade ou falsidade de qualquer sentença que se possa formular, ou seja, para toda proposição P, podemos provar P ou provar $\neg P$ (Netto, 2011, p. 133).

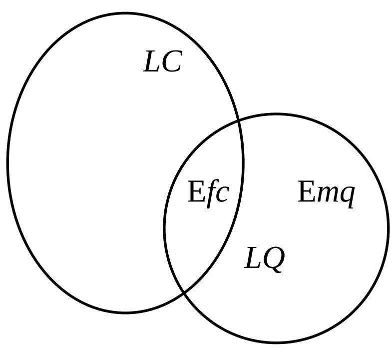
Como vimos não é possível sustentar que o princípio do terceiro excluído seja um axioma no sentido aristotélico e euclidiano: uma verdade primeira para toda e qualquer ciência, uma lei do pensamento, sem a qual nenhum discurso pode ser dotado de sentido. O princípio do terceiro excluído é um axioma de um sistema específico: a lógica clássica. Notamos que o mesmo não se aplica ao sistema da lógica intuicionista. Mas os intuicionistas não estão sozinhos. Na primeira metade do século XX físicos filósofos ligados à chamada Interpretação de Copenhagen da mecânica quântica (MQ) argumentaram que o terceiro excluído não seria aplicável, também, ao sistema de enunciados de Lógica Quântica (L-MQ).

4. A Lógica quântica e o terceiro excluído

Heisenberg, em *Física e Filosofia,* notou que enunciados de determinados fenômenos quânticos não poderiam ser devidamente formulados sem que princípios clássicos fossem violados. Isso não significa que uma lógica quântica deveria ser completamente diferente e independente da lógica clássica.

> O resultado dessas tentativas [de elaborar uma lógica quântica], da autoria de Birkhoff e Neumann, e mais recentemente por parte de Weizsäcker, pode ser descrito dizendo-se que o esquema matemático da teoria quântica pode ser interpretado como uma extensão ou modificação da lógica clássica (Heisenberg, 1987, p. 101-113).

A lógica clássica permaneceria sendo válida para a maior parte dos enunciados de linguagem e ciências comuns, enunciados de fatos clássicos (Efc), e a lógica quântica seria um "caso limite", que, em alguns casos, forçaria o rompimento dos limites da lógica clássica, lidando com enunciados próprios da mecânica quântica (Emq).



O que exatamente Heisenberg compreendia que deveria ser "desenvolvido" ou modificado? Em quais casos os enunciados de mecânica quântica iriam além dos limites de aplicabilidade dos axiomas da lógica clássica?

> É, em especial, um dos princípios fundamentais da lógica clássica que parece requerer uma nova concepção, como discutiremos a seguir. Na lógica clássica, supõe-se que, se uma afirmação tiver sentido, há então somente duas possibilidades a considerar, a saber, ela é correta, ou caso contrário, sua negação o será. Nas duas seguintes asserções, "nesta mansarda há uma mesa" e "não há uma mesa nesta mansarda", uma delas é verdadeira e, a outra, falsa. Aqui vigora o princípio do "terço excluído", *tertium non datur*: uma terceira possibilidade inexiste. Pode ocorrer pela fragilidade de nosso conhecimento que não saibamos decidir qual das duas assertivas, a afirmativa ou sua negativa, seja a correta; mas, de fato, somente uma delas é verdadeira. Na teoria quântica, o princípio do terço excluído precisa ser modificado (Heisenberg, 1987, p. 101-113).

Heisenberg identifica o princípio do terceiro excluído como o problema nuclear da inadequação entre a lógica clássica e o sistema de enunciados de mecânica quântica, e na última linha se posiciona pela sua "modificação". Apesar de propor que o princípio do terceiro excluído precisa ser modificado quando os enunciados em questão são referentes a dados empíricos de fenômenos quânticos, Heisenberg não deixou claro, nessa ocasião, quais seriam tais modificações, e apesar de citar os trabalhos de Birkhoff, Neumann e Weizsäcker, o faz muito rapidamente, sem ponderar se considerava que tais trabalhos assentavam ou não as bases de uma lógica devidamente axiomatizada e formal, que resolvia o problema em questão. Conforme Heisenberg, dado o metaenunciado[18] "é verda-

[18] Heisenberg trabalha com a ideia de dois níveis de enunciados. Enunciados são sentenças lógicas acerca de fatos físicos ao passo que metaenunciados são sentenças lógicas acerca

deiro que o elétron passou somente pela fenda A", o enunciado "o elétron passou pela fenda B" ou é verdadeiro ou é falso. Sendo assim, poderíamos formular o seguinte princípio: "Sempre que um metaenunciado for verdadeiro, os enunciados correspondentes serão falsos ou verdadeiros, mas nunca indeterminados". Se isto está correto, então Heisenberg tinha razão em considerar a "persistência das leis clássicas na teoria quântica" (Heisenberg, 1987, p. 139). Consequentemente, "Sempre que um metaenunciado for falso, os enunciados correspondentes serão indeterminados":

$$\mathrm{M_E}(v) \left| \begin{array}{r} \mathrm{E}_1 = 1 \\ \sim\mathrm{E}_1 = 0 \end{array} \right|$$

$$\mathrm{M_E}(f) \left| \begin{array}{r} \mathrm{E}_1 = i \\ \sim\mathrm{E}_1 = i \end{array} \right|$$ [19]

O próprio Weizsäcker defendeu que, na lógica quântica, é a falsidade de um metaenunciado que introduz a indeterminação do enunciado correspondente como um valor de verdade, e que o mesmo não se dá no caso de metaenunciados verdadeiros:

> Podemos estabelecer exatamente em que sentido o princípio do terceiro excluído é válido – em que nível se aplica e em que nível não se aplica. Os dois enunciados *a*1 e "*a*1 é verdadeiro" pertencem a níveis distintos de linguagem e sem dúvida possuem sentidos diferentes. Na lógica clássica tais enunciados são equivalentes, isto é, ou ambos são verdadeiros ou ambos são

de enunciados. Assim sendo, "P = O elétron passou pela fenda B" é um enunciado, que pode ser verdadeiro ou falso (Ou P = 1 ou P = 0), ao passo que "É verdadeiro que P" é um metaenunciado, que, igualmente, pode ser verdadeiro ou falso: (Ou [P = 1] = 1] ou [P = 1] = 0]).

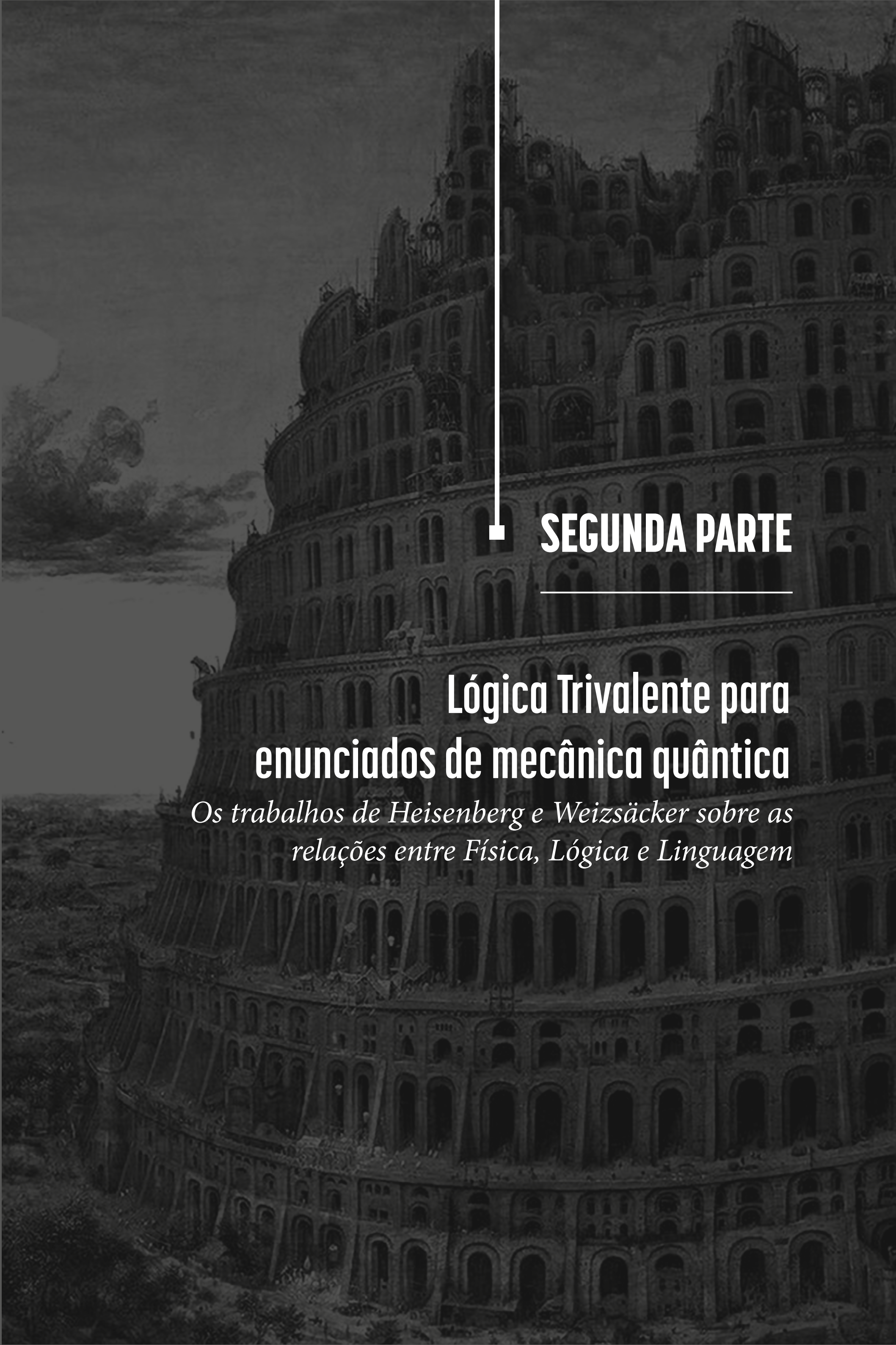
[19] Em linguagem mais familiar $\forall \mathrm{M_E}=v\,[\forall \mathrm{E1}=v \rightarrow \forall\neg \mathrm{E1}=f]$ e $\forall \mathrm{M_E}=f\,[\forall \mathrm{E1}=i \rightarrow \forall\neg \mathrm{E1}=i]$..

> falsos. Na lógica quântica tais enunciados não são equivalentes. Na realidade, da verdade ou falsidade de *a*1, se segue a verdade ou falsidade de "*a*1 é verdadeiro", mas não o inverso: se "*a*1 é verdadeiro" é falso, *a*1 pode estar indeterminado. (...) Neste sentido, podemos afirmar que a lógica quântica não modifica as implicações do valor "verdadeiro", mas somente do valor "falso" (Weizsäcker, 1958, p. 320).

Na realidade, devemos destacar dois casos em que a lógica clássica pode ou não aplicar-se à mecânica quântica: (1) Quanto ao conteúdo de um enunciado. (2) Quanto à relação entre enunciados e metaenunciados.

No caso (1) sempre que o conteúdo de um enunciado expressar incerteza e superposição, os princípios de não contradição e terço excluído serão suspensos. Com respeito ao caso (2) – a relação entre enunciados e metaenunciados – a lógica clássica é válida no regimento das relações entre enunciados quânticos sempre que os valores de verdade V e F forem suficientes (sempre que os metaenunciados forem verdadeiros) e inválida sempre que os valores de verdade V, F, e I estiverem presentes (o que ocorre quando metaenunciados são falsos e o valor de verdade I é introduzido).

Podemos concluir, portanto, que o princípio do terceiro excluído não é aplicável ao sistema fechado de proposições da lógica quântica de Weizsäcker, tal como discutida por Heisenberg, pois esta trabalha com três valores de verdade, V, F e I.



SEGUNDA PARTE

Lógica Trivalente para enunciados de mecânica quântica

Os trabalhos de Heisenberg e Weizsäcker sobre as relações entre Física, Lógica e Linguagem

1. Física, lógica e matemática

Em *The Structure of Physics,* o físico filósofo alemão Carl von Weizsäcker classifica a ciência a partir de uma demarcação entre "ciências puras" e "ciências empíricas". As ciências puras, estritamente formais e abstratas, seriam a lógica e a matemática, ao passo que as ciências empíricas, que se utilizariam das ciências formais para tratar de diferentes objetos ou sistemas naturais, seriam a física, astronomia, química, biologia, geologia, psicologia, etc. A ciência empírica mais básica seria a física, pois trataria, em sentido ontológico, do que é mais fundamental, daqueles sistemas naturais que são elementares, e portanto, anteriores a todos os demais (Weizsäcker, 2006).

Weizsäcker enfatiza que a física, na medida em que é uma ciência empírica, não pode ser desenvolvida sem recorrer às ciências puras, isto é, a lógica e a matemática. Para o autor, as "leis universais da natureza são essencialmente matemáticas" (Weizsäcker, 2006, p. 334)[20]. A impossibilidade de desenvolvermos a física sem a lógica é sustentada igualmente por Newton da Costa em *Ensaios sobre os fundamentos da lógica*, quando afirma que "não há ciência sem lógica subjacente" (Costa, 2008, p. 63). Podem existir várias lógicas. Uma teoria pode basear-se nesta ou naquela. Mas o que não pode haver, é uma teoria, enquanto sistema de axiomas e enunciados, que não tome determinados princípios lógicos como pressupostos estruturantes.

A matematização da física e a geometrização da natureza não possuem um caráter instrumental, como criações intelectuais artificiais e arbitrárias, construções teóricas inventadas pelos sujeitos do conhecimento para promoverem uma espécie de ordenamento

[20] WEIZSÄCKER, Carl Von. *The Structure of Physics*. Atlanta: Springer, 2006.

ad hoc dos dados da experiência. Lógica e matemática são de fato sistemas linguísticos simbólicos, que possuem uma história natural e sofrem variações antropológicas, mas refletem uma ordem subjacente, estruturas, relações e regularidades inscritas nas coisas mesmas. Dizer que as leis universais da natureza são "essencialmente matemáticas" é assumir um tipo de realismo platônico, pressupondo que o que é mais básico e elementar na natureza são relações ordenadas e regulares, que encontram nos sistemas lógico-matemáticos a sua linguagem ideal.

Essa crença não era exclusiva de Weizsäcker, sendo antes uma metafísica geral dos físicos de seu círculo. Em *A Parte e o Todo*, Heisenberg narra a conclusão de uma conversa com Einstein acerca dos pressupostos filosóficos da mecânica quântica (MQ), justificando a sua crença de que a MQ seria uma descrição verdadeira dos sistemas subatômicos. Embora não houvesse, "ainda", experimentos e observações suficientes que atestassem sua adequação com os fatos, e embora também no plano teórico ainda persistissem muitas lacunas e desafios, Heisenberg acreditava basicamente que a teoria desenvolvida até ali não poderia estar errada, pois os sistemas matemáticos logicamente consistentes, com seus axiomas e conclusões gerais dotados de simplicidade e elegância, "deveriam" ser verdadeiros, nos comunicando algo acerca da realidade objetiva (Heisenberg, 1996).

2. Breves comentários sobre Weizsäcker e sua lógica

Em *A Imagem Física do Mundo* Weizsäcker discorre sobre uma lógica para enunciados de mecânica quântica. Os conceitos são apresentados sem formalização. Os conceitos, os axiomas, os níveis lógicos e as relações lógicas são explicados por extenso, sem a apresentação de uma notação básica e uma linguagem simbólica. Tampouco o nosso objetivo nessa ocasião é desenvolver uma formalização da lógica de complementariedade de Weizsäcker. Todo o simbolismo aqui apresentado não deve ser encarado como uma tentativa estrita de formalização, mas apenas como um primeiro esboço, um passo ainda incipiente e provisório na direção de um formalismo.

Não há, portanto, formalização, a não ser *lato sensu*, como o emprego intuitivo de uma representação simbólica preliminar, mas não certamente *strictu sensu*. Pareceu-nos mais apropriado e original – e, como em um "jogo", ou *puzzle*, mais divertido também – propor o esboço de um simbolismo intuitivo do que nos utilizar de um formalismo já consolidado de alguma lógica não clássica. O simbolismo, diferente de um formalismo estrito, pode ser muito incipiente, além de possuir variadas lacunas e inconsistências, mas possui um duplo propósito, (a) heurístico e (b) propedêutico:

a. A representação simbólica, ainda que não resulte de um sistema formal bem acabado e consistente, favorece a visualização de ideias, conceitos, relações e regularidades. Símbolos, códigos e linguagens simbólicas são instrumentos de visualização de entidades teóricas abstratas, como conceitos.

b. A representação simbólica *lato sensu* pode ser como o germe de um formalismo ulterior *strictu sensu*, propondo mais do que a mera possibilidade, mas a vantagem real, de desenvolvimentos nessa direção.

Weizsäcker era um físico de destaque, lidava com o complexo formalismo matemático da mecânica quântica e conhecia o formalismo lógico clássico e o trabalho de Birkhoff e von Neumann. Se desejasse aplicar o formalismo de alguma lógica polivalente ao seu trabalho, teria feito. Se ele não fez, tampouco nos interessou fazê-lo. Por isso, o que há de Weizsäcker nesse trabalho é de ordem conceitual.

Para nossos propósitos diremos que a lógica de Weizsäcker divide-se em níveis ou "mundos" lógicos. Enunciados sobre estados quânticos ou objetos quânticos são de primeiro nível, ou pertencem ao Mundo 1. Os metaenunciados são enunciados sobre enunciados quânticos; portanto, são de segundo nível, ou pertencem ao Mundo 2. Há ainda um terceiro mundo, composto por enunciados sobre metaenunciados.

Devemos esclarecer ao leitor certas peculiaridades biográficas e históricas – talvez até mesmo sociológicas. Weizsäcker pertenceu a um grupo de cientistas conhecidos pela alcunha de físicos filósofos. Foram físicos europeus, da passagem do século XIX para o XX, que ao longo da primeira metade do século XX estiveram envolvidos com a criação dos dois pilares da física contemporânea, a relatividade e a mecânica quântica. Tais cientistas possuíam uma sólida formação intelectual e humanística, uma elevada erudição geral, bem como bastante leitura filosófica.

Poderíamos dizer que uma característica geral do grupo ou "geração" de físicos filósofos foi a crença na impossibilidade de se fazer ciência sem filosofia. E isto não quer dizer que tais físicos filósofos tenham se aproximado dos filósofos que lhes eram contemporâneos, embora isso tenha acontecido em alguns casos pontuais, como Einstein com Popper. Havia entre tais cientistas certo espírito de independência em relação à tradição filosófica acadêmica. Se a filosofia lhes parecia inevitável, não era a "filosofia dos filósofos", aquela feita na academia pelos filósofos profissionais de sua época, mas a atividade filosófica, a reflexão epistemológica, o enfrentamento das questões metafísicas, que eles mesmos, enquanto físicos, deveriam empreender em suas investigações[21].

Tais cientistas defendiam, de um modo geral, a inevitabilidade da metafísica, da epistemologia e da lógica na elaboração da teoria física. Mas, a despeito de tais considerações, o fato é que os autores que trabalharemos de agora em diante, Weizsäcker e Heisenberg, ao menos no escopo da presente discussão, e tendo como referências as obras *A imagem da física*, de Weizsäcker e *Física e Filosofia* de Heisenberg, não dialogaram com a tradição lógica dos séculos XIX e XX, não discutiram com autores como Frege, Russel, Whitehead, Łukasiewicz entre outros. O trabalho de lógica quântica citado por Weizsäcker é o de Birkhoff e von Neumann. Não podemos dizer, no entanto, que Weizsäcker discuta tais autores pormenorizadamente, tampouco que aplique seu formalismo ao que apresenta como "lógica de complementaridade". Nossos autores não desenvolveram nenhuma notação lógica, não ao menos complexa, nem aplicaram o formalismo lógico de algum sistema trivalente já existente à chamada "lógica quântica" com a qual lidaram em linguagem comum. Sendo assim, pode parecer ao nosso leitor versado em lógica, e não sem razão, que as questões apresentadas por nossos autores estejam deslocadas ou desconectadas dos desenvolvimentos que ocorriam à época no campo da lógica. Não é, portanto, exatamente pela origi-

[21] Para circunscrever histórica e socialmente o grupo a que chamamos de "físicos filósofos", estamos falando dos pioneiros da mecânica quântica e da relatividade, como Planck, Einstein, Bohr, Born, Heisenbeng, Schrödinger, Pauli, Dirac, Weizsäcker, e aqueles que frequentavam o mesmo ambiente intelectual destes, compartilhando de sua atitude perante a ciência.

nalidade, tampouco pelo rigor lógico, que nos interessamos ao lidar com tais autores e problemas. O que nos parece de elevada importância é a pesquisa de como esses físicos filósofos compreenderam e lidaram com as questões lógicas levantadas pelo novo campo da física que ajudaram a erigir.

3. Conceitos lógicos, ontológicos e físicos fundamentais da lógica de Weizsäcker

Em *A imagem física do mundo*, Weizsäcker nomeia a lógica quântica que pretende expor como lógica de complementaridade, por tratar justamente das relações entre os enunciados complementares da mecânica quântica. A noção de complementaridade aqui é a de que dois conceitos, ou enunciados, são complementares, quando podem ser empregados corretamente, mas não simultaneamente, como é o caso dos conceitos e enunciados de MQ sobre (a) posição e *momentum* e (b) onda e partícula (Weizsäcker, 1974, p. 288-294). Dado um elétron *e*, ou bem enunciamos sua posição, ou bem enunciamos o seu *momentum*. Da mesma forma, ou enunciamos seu estado de onda ou de partícula. Ambos podem ser enunciados, mas não simultaneamente. Para Weizsäcker a "lógica de complementaridade" é uma "lógica modal multivalente" (Weizsäcker,1974, p. 287).

Já vimos que a lógica de Weizsäcker possui um nível 1, de enunciados acerca de objetos quânticos, um nível 2, de metaenunciados (enunciados sobre enunciados quânticos) e um terceiro nível, de enunciados sobre metaenunciados. Além disso, Weizsäcker apresenta alguns conceitos lógicos e ontológicos fundamentais. Para aclarar nossa compreensão sobre o seu sistema e para entender-mos as análises de Heisenberg e o problema do axioma do terceiro excluído no sistema de enunciados da mecânica quântica, vamos apresentar rapidamente tais conceitos. São eles:

i. Conceitos lógicos

Em *Para uma concepção física do universo* (*Zum Weltbild der Physik*) Weiszäcker procura estabelecer a noção de verdade com a qual a lógica da MQ (L_{mq}) deve operar:

> No ponto de vista lógico-formal, a Mecânica quântica utiliza um conceito plurivalente de verdade, no qual um enunciado, além dos valores teoréticos <<verdadeiro-falso>>, pode ter ainda um valor de verdade que consiste em ser <<indeterminadamente verdadeiro, segundo este ou aquele grau de probabilidade>> (Weizsäcker, 1945, p. 126).

Isso significa que alguns enunciados são verdadeiros (V=1), alguns são falsos (F=0), mas alguns são definidos por um número complexo maior que 0 e menor que 1.

> Se representamos verdade e falsidade por meio dos valores de verdade e falsidade 1 e 0 e designamos como enunciado elementar um enunciado que descreve um "caso puro" no sentido da teoria quântica, podemos resumir, hipoteticamente, a lógica de complementaridade por meio desta proposição: *Todo enunciado elementar pode ter, fora dos valores de verdade 1 e 0, um número complexo como valor de verdade* (Weizsäcker, 1974, p. 313).

Em edição posterior da mesma obra, o físico filósofo adicionou alguns capítulos importantes, como "A importância da lógica para as ciências da natureza" e "Complementaridade e lógica". Neste último, se dedica a definir os valores de verdade da L_{mq}, afim de "fixar uma terminologia lógica que traduza ao menos em parte a significação dos complexos valores de verdade mediante uma linguagem vinculada com os conceitos lógicos tradicionais" (Weizsäcker, 1974, p. 316). Os valores de verdade são novamente apresentados em três tipos, como também definidos:

Verdade: Um enunciado elementar –um enunciado sobre fatos experimentais – é verdadeiro (*v*), se, e somente se, sua probabilidade[22] é igual a 1.

A probabilidade é 1 quando é (a) logicamente possível, (b) fisicamente provável, (c) estatisticamente relevante e (d) informa sobre sistemas observados, ou seja, possui um conteúdo empírico maior que zero.

Falsidade: Um enunciado elementar é falso, (*f*) se, e somente se, sua probabilidade é igual a 0. Um enunciado é falso, basicamente, quando não satisfaz as condições supracitadas.

Indeterminação: Um enunciado elementar é indeterminado[23] (*i*) se, e somente se, sua probabilidade é menor que 1 e maior que 0.

Complementaridade. Dois enunciados são complementares se não podem ser determinados simultaneamente. Dois enuncia-

[22] Weizsäcker introduz em sua lógica o conceito de "probabilidade", que também é central na própria mecânica quântica, preservando assim a paridade entre física e lógica. Se na física *x* (F_x), a teoria da verdade vigente opera com a noção de "graus de verdade" dados por relações probabilísticas, na lógica subjacente a tal física, que podemos chamar de (L_x) a verdade de um enunciado deve ser dada por sua probabilidade em se situar em alguma região do espectro entre 0 e 1, sendo 0 = absolutamente falso e 1 = absolutamente verdadeiro. Os valores bivalentes V e F continuam existindo, de modo que enunciados que correspondem aos mesmos são "mais que prováveis". Mas um novo valor I é acrescido, sendo I maior que 0 e menor que 1.

[23] Determinação e verdade são conceitos distintos. Um enunciado é verdadeiro quando sua probabilidade é igual a 1. Um enunciado é determinado quando sua probabilidade é igual a 1 ou 0. Um enunciado é indeterminado se, e somente se, sua probabilidade situa-se em alguma posição entre 0 e 1.

dos são complementares se, e somente se, para cada caso em que um enunciado é verdadeiro ou falso o outro é necessariamente indeterminado.

A probabilidade lógica de um enunciado de primeiro nível ser 1, 0 ou *i*, decorre da probabilidade física do que está sendo enunciado[24]. *Enunciados elementares* são determinados por *observações máximas*, a saber, que expressam informações acerca de sistemas observados, em acordo com o princípio de complementaridade. O "enunciado elementar" de Weizsäcker não é definido logicamente, mas fisicamente. Isto é, um enunciado é elementar quando seu conteúdo é dado por uma observação.

Há também outro ponto em que o conceito lógico de "indeterminação" parece apontar para a necessidade de considerarmos os princípios da lógica clássica como inaplicáveis ao sistema de lógica quântica. Na lógica quântica há uma terceira possibilidade para um enunciado além de verdadeiro ou falso, pois pode ser que ele seja indeterminado, isto é, que sua probabilidade seja menor que um e maior que zero[25].

Dizemos que na lógica de Weizsäcker há uma paridade entre física e lógica. Com isso entendemos que os conceitos lógicos refletem conceitos físicos. Que o valor de verdade de um enunciado lógico depende das realidades físicas que estão sendo enunciadas.

[24] Na lógica de Weizsäcker há uma paridade físico-lógica. Isto é, um enunciado é verdadeiro quando o que está sendo enunciado é fisicamente verdadeiro. É falso quando o que está sendo enunciado é fisicamente falso. O grau de probabilidade lógica (para enunciados de primeiro nível) reflete, portanto, o quanto é fisicamente provável que o que está sendo enunciado seja verdadeiro ou falso no escopo da mecânica quântica.

[25] Para outros sistemas lógicos não clássicos, trivalentes, como a lógica de Łukasiewicz, consultar o capítulo "Lógicas não elementares e lógicas heterodoxas" Newton da Costa em *Ensaio sobre os fundamentos da lógica*. Ver referências.

Weizsäcker parece estabelecer essa paridade quando introduz conceitos ontológicos em seu sistema:

> Uma lógica especial dos casos puros como a que estabelecemos aqui é propriamente a formulação lógica de certas propriedades dos entes, isto é, de relações ontológicas objetivas. Sendo assim, na lógica tal como a estruturamos, fundamentada nos casos puros, os enunciados ontológicos aparecem como pressupostos dos enunciados lógicos. Introduzimos, assim, uma linguagem ontológica em relação com a linguagem lógica (Weizsäcker, 1974, p. 317).

Com isto, passamos aos conceitos ontológicos que são os pressupostos dos conceitos lógicos acima descritos.

ii. Conceitos ontológicos

A probabilidade de um enunciado ser 1, 0, ou *i* não expressa, no escopo deste sistema, um déficit de informação, mas propriedades e relações ontológicas dos objetos aos quais os enunciados de mecânica quântica se referem. A lógica quântica de Weizsäcker, portanto, é uma lógica dos casos puros, ou "brutos", a formulação lógica de certas propriedades dos entes quânticos em si, isto é, de relações ontológicas quânticas. Os enunciados ontológicos são pressupostos dos enunciados lógicos. Deste modo, Weizsäcker delimita conceitos ontológicos fundamentais do sistema:

Realidade: Um estado (ou evento) é denominado real se, e somente se, o enunciado que afirma sua existência é verdadeiro. $r\ (Er = 1)$ O enunciado é verdadeiro quando sua probabilidade é igual a 1. A probabilidade de um enunciado é igual a 1 quando, dentre outros pontos, é (I) logicamente possível, (II) fisicamente provável, (III) estatisticamente relevante e (IV) empiricamente informativo. Sendo assim, dizer que um estado quântico é real significa dizer que satisfaz I, II, III, e IV, e que isso pode ser comunicado por meio de um enunciado lógico no escopo de uma teoria física, enquanto um sistema de enunciados logicamente conectados.

Não-real: Um estado é considerado não-real se o enunciado que afirma sua existência é falso. $-r\ (Er = 0)$

Possível: Um estado é considerado possível se o enunciado que afirma sua existência é fisicamente possível. $p\ (Fp)$

Mais que possível: Um estado é "mais que possível" se o enunciado que afirma sua existência encontra-se indeterminado. Na linguagem de Heisenberg, um estado somente possível é uma *potentia* física objetiva. $p'(Ep = i)$

Essa relação entre enunciados e estados ontológicos satisfaz a paridade entre física e lógica, instituindo um "conjunto verdade" com valores de verdade e um "conjunto realidade" com "estados ontológicos", que são dados conforme o valor de verdade dos enunciados que tratam de objetos ontológicos[26]. Por exemplo, um estado ontológico é real, quando seu enunciado correspondente é verdadeiro.

Exemplo de caso: Superposições de estados quânticos conforme a equação de Schrödinger e o enunciado de estado mais que possível.

[26] O formalismo que introduzimos "intuitivamente" (Sua forma nos parece tão intuitiva e autoevidente, que não nos cabe aqui estabelecer pormenorizadamente suas propriedades sintáticas e semânticas, a natureza dos símbolos, que nos advém de outras lógicas, tampouco das regras de combinação e das relações, importadas de outros sistemas) não é exatamente um "formalismo lógico" em sentido estrito, como um sistema, mas apenas uma "representação formal" dos conceitos lógicos e ontológicos da lógica de Weizsäcker.

Se um estado A ($Q_{(x)} = A$) é real e outro estado B concomitante, ($Q_{(x)} = B$) é mais que possível, dizemos que B participa de A. A superposição de estados quânticos é logicamente deduzida da equação de Schrödinger. O princípio de superposição de Schrödinger e a interpretação de Heisenberg para entes quânticos concorrem para que possamos atribuir status existencial aos estados mais que possíveis: são entes potenciais. De acordo com Weizsäcker, se os vetores ξ e γ representam estados possíveis de S, então a superposição ψ (ξ γ) também representa um estado possível.

iii. Conceitos físicos

Além dos conceitos lógicos e ontológicos, axiomatizados neste trabalho, Weizsäcker estabelece os conceitos que chamaremos de empíricos:

Alternativas: Na lógica quântica de Weizsäcker o conceito de "problema" corresponde ao conceito físico de "experimento". Os enunciados são resultados, respostas ou informações acerca de problemas. Um problema delimitado é aquele que está posto, para o qual pode dar-se uma solução. Um problema positivo ou "plenamente delimitado" é chamado de "alternativa". Uma "alternativa" é o problema cuja verdade de sua solução implica a falsidade de soluções alternativas. Assim, as "alternativas" implicam em "enunciados falsificadores de alternativas", que são aqueles cuja verdade demonstra que todos os outros enunciados alternativos são falsos. Se um enunciado $E_{(x)}$ é verdadeiro e todos os enunciados que não são $E_{(x)}$ são falsos, então $E_{(x)}$ é uma "alternativa", isto é, um enunciado que falsea todos os enunciados alternativos.

Alternativas eneádicas: Uma alternativa é chamada de eneádica quando possuí *n* soluções. Vejamos o problema "onde se localiza a partícula β em t*x*?" A solução para tal questão é dada pela relação entre a posição da partícula β em uma região específica do espaço, por meio das coordenadas (*x,y,z*) no momento determinado t*x*. Uma alternativa eneádica é um problema cuja solução admite n soluções.

Vetores de estado e vetores de estado ortogonais: Na mecânica clássica tal questão pode ser considerada trivial. Todavia, na mecânica quântica, dada a relação de incerteza $\Delta x \; \Delta p \geq h/2$, a resposta para o problema supracitado pode ser a alternativa eneádica "a partícula está em *n* posições". Cada posição é descrita por um vetor complexo que indica a relação $(x,y,z) + \mathrm{t}$. Tal tipo de vetor é chamado de "vetor mecânico-quântico de estado". São chamados de ortogonais os vetores correspondentes a alternativas, isto é, aos enunciados que, do fato de serem enunciados elementares verdadeiros, implicam a falsidade de outros enunciados. Ou seja, os vetores ortogonais de estado quântico são os estados físicos descritos por enunciados que satisfazem a condição de "alternativas" no sentido acima definido. Se, p. ex. para um problema tenho *n* soluções e se *x* é uma solução verdadeira, com vetores ortogonais, então todas as soluções, menos *x*, são falsas. Entretanto, não se segue que da falsidade de *x* possamos inferir a não-falsidade das outras soluções.

Exemplo de caso: O experimento da dupla fenda

Analisemos, a título de exemplo, agora à luz da lógica quântica, o experimento da dupla fenda. Tendo tal experimento como problema fundamental, pomos a questão: por qual fenda passou a partícula β? Em primeiro lugar, podemos constatar que tal problema é positivo, uma "alternativa eneádica". É uma alternativa por que sua solução implica a falsificação de outros enunciados possíveis, e é eneádica por que não admite uma única solução. Temos três enunciados, a saber, E_1 = "A partícula passou pela fenda A", E_2 = "A partícula passou pela fenda B" e E_{12} = "Os enunciados E_1 e E_2 são ambos verdadeiros".

4. A ortogonalidade e a redução das possibilidades lógicas da trivalência à bivalência

Podemos reduzir estes três enunciados E_1, E_2, E_{12} aos dois que se seguem: M_{E1} = "A partícula passou somente pela fenda A", M_{E2} = "A partícula passou somente pela fenda B" por meio da introdução de um operador restritivo "somente". Destes dois enunciados derivamos as seguintes relações: Se $M_{E1} = 1$ então $M_{E2} = 0$. Se é verdadeiro que a partícula β passou somente pela fenda A então é falso que passou (somente) pela fenda B. Se $M_{E1} = 0$ então $M_{E2} = 1$. Se é falso que a partícula β passou, somente, pela fenda A, então é verdadeiro que passou pela fenda B. Assim, constatamos que com a adição de um operador lógico de restrição ("somente"), os enunciados assim formulados se tornam "alternativas" *strictu sensu*, ou seja, enunciados cuja verdade implica a falsidade de enunciados alternativos. Voltaremos a tal questão mais abaixo quando tratarmos da recepção da lógica de Weizsäcker por Heisenberg.

iv. Axiomas

Weizsäcker não reserva uma seção para os axiomas, arrolando-os dentre os conceitos ontológicos e lógicos fundamentais. Na verdade, reserva o status de "princípio" somente ao princípio de complementariedade. No entanto, podemos, para maior organização sistemática, destacar três conceitos que podem ser apresentados como princípios:

Princípio de complementariedade: Para todo enunciado elementar, existem enunciados elementares complementares.

Identidade: Se dois enunciados elementares são verdadeiros e equivalentes, então designam o mesmo objeto.

Coexistência: Se dois enunciados elementares são complementares, então os estados designados por eles são coexistentes.

5. Proposta de um esquema geral da Lógica Quântica de Weizsäcker

Nas próximas páginas falaremos em enunciados, metaenunciados, linguagens, conteúdos ontológicos dos objetos enunciados etc. Sendo assim, acreditamos ser necessário introduzir um esquema sistemático da Lq, definindo o que entendemos por cada um de seus domínios. Assim, o leitor poderá saber quando estaremos falando de uma linguagem, L_e ou L_m, ou dos enunciados *e* ou metaenunciados *m* de tais linguagens etc.

Newton da Costa, apresentando a semiótica de Morris, explica que esta possui três domínios que podem ser chamados de sintática, semântica e pragmática (Costa, 2008, p. 40). "A sintaxe de L nada mais é, no fundo, do que o formalismo que a ela podemos, ao menos em princípio, associar (Costa, 2008, p. 39). A semântica nos daria os conceitos de verdade, falsidade (e outros, caso a lógica seja polivalente), de denotação, etc., bem como nos permitiria tratar das inter-relações entre níveis de linguagem.

A pragmática trataria das questões que escapam à sintática e a semântica, como os usos pragmáticos da linguagem, condicionados por variáveis múltiplas, fatores históricos, sociológicos e psicológicos. No uso que Newton da Costa faz da expressão "pragmática", incluem-se também os princípios ou postulados pragmáticos da razão, sem os quais um sistema lógico não se completa (Costa, 2008, p. 57).

Aproveitamos os domínios de Morris aqui. À sintática, semântica e pragmática acrescentamos em nosso esquema a axiomática, geralmente contida em outros domínios. Nosso sistema deve ser encarado em sua condição atual: provisório, incompleto e em construção, mas nos serve para definir os conceitos que empregamos, e seus respectivos usos.

Na representação que fizemos dele, dividimos a semântica em *conceitos* e *linguagens*, cada qual em uma extremidade. Trata-se de um único domínio, subdividido de tal maneira para simbolizar que é a semântica que nos oferece as condições de contorno, garantindo a estabilidade do esquema geral como um sistema fechado. A semântica delimita a extensão conceitual do sistema. Além disso, no momento, o que Weizsäcker nos oferece está restrito à semântica e axiomática.

O núcleo de uma possível "lógica quântica de Weizsäcker", formado pela sintática, axiomática e pragmática, a partir de tal semântica, permanece sem o devido tratamento, pois a sintática e a pragmática não foram objeto de Weizsäcker em *A imagem física do mundo*. A ligação entre a semântica, a axiomática e tais áreas nucleares, portanto, é uma idealização.

Na semântica temos os conceitos lógicos C_l, os conceitos ontológicos C_o, e as linguagens: l_e e l_m. Em l_e temos enunciados *e* e em l_m metaenunciados *m*. Assim, se falarmos em e_1, e_2,...,en, estaremos falando nem de linguagens nem de metaenunciados, mas de enunciados (próprios da linguagem l_e). Se falarmos em m_1, m_2,..., m_n, estaremos falando de metaenunciados (próprios da linguagem l_m)[27].

A sintática é um elemento central no sistema, pois nos dá os símbolos utilizados na Lq, S: {s_1, s_2,..., s_n}, e suas regras ou fórmulas de associação, R: {r_1, r_2,..., r_n}. A axiomática nos dá o conjunto de axiomas de Lq, A: {α_1, α_2,..., α_n}. Por fim, a pragmática estabelece os princípios pragmáticos pressupostos e implicados pela Lq, P: {p_1, p_2,..., p_n}.

A essa altura, todos os domínios carecem de desenvolvimentos. No entanto, a semântica e a axiomática encontram-se em um estágio superior, uma vez que seus elementos principais foram ao menos apresentados nessa ocasião.

Se desejássemos obter a primeira base a partir da qual seria possível erigir um sistema formal da Lq de Weizsäcker, teríamos que trabalhar sobretudo na sintática, e desenvolver também a pragmática.

Para as finalidades do presente trabalho, a fim de iluminar a discussão que iniciaremos em seguida, a presente apresentação da semântica nos será suficiente.

6. Enunciados e Metaenunciados

De acordo com a lógica quântica de Weizsäcker, em um plano lógico imediato temos enunciados como:

a) "E_1 é verdadeiro" ou $E_1 = 1$

b) "E_1 é falso" ou $E_1 = 0$

[27] Por convenção, adotamos *E* e *e* como símbolos equivalentes para enunciados, e *M* e *m* para metaenunciados. Assim, para nos referirmos a um enunciado qualquer, podemos tanto falar E_x quanto e_x.

Em um plano lógico mais elevado são tais enunciados imediatos que são verdadeiros ou falsos: trata-se do plano lógico dos metaenunciados:

a) "O enunciado E_1 *é verdadeiro* é verdadeiro", o que implica que o enunciado

"O enunciado E_1 *é falso* é falso", preservando o axioma de não contradição:

$$E_1 \begin{bmatrix} [E_1 = 1] = 1 \\ [E_1 = 0] = 0 \end{bmatrix}$$

b) "O enunciado E_1 *é verdadeiro* é falso" ou;

$$E_1 \begin{bmatrix} [E_1 = 0] = 1 \\ [E_1 = 1] = 0 \end{bmatrix}$$

Na lógica quântica de Weizsäcker, da verdade ou falsidade de E_1 se segue a verdade ou falsidade de "E_1 é verdadeiro". Tal operação, entretanto, apresenta "inversão assimétrica", ou seja, se invertermos sua ordem não verificamos o mesmo resultado.

Se "E_1 é verdadeiro" é falso, então não se segue que E_1 seja falso – não estamos afirmando que E_1 é falso, mas apenas negando que seja verdadeiro. Se E_1 não é verdadeiro, então pode ser ou falso ou indeterminado.

É neste sentido que o conceito de indeterminação se qualifica como um valor de verdade, uma terceira via além de verdade e falsidade.

Vejamos uma representação em árvore, em que na extremidade do "tronco", o valor de verdade do enunciado é dado pelo valor de verdade do metaenunciado. Primeiro, vamos ao caso simétrico, em seguida, passamos ao assimétrico.

Se "E_1 é verdadeiro" é verdadeiro, então E_1 é verdadeiro.

$$\mathrm{E}_1 \begin{bmatrix} [E_1 = 1] = 1 \\ \downarrow \\ E_1 = 1 \end{bmatrix}$$ ou, em uma representação completa:

$$\mathrm{E}_1 \begin{bmatrix} E_1 = 1 \\ \uparrow \\ [E_1 = 1] = 1 \\ [E_1 = 0] = 0 \\ \downarrow \\ E_1 = 1 \end{bmatrix}$$

Mas se Sé "E_1 é verdadeiro" é falso, então E_1 é indeterminado.

$$\mathrm{E}_1 \begin{bmatrix} [E_1 = 1] = 0 \\ \downarrow \\ E_1 = i \end{bmatrix}$$ ou, em uma representação completa:

$$\mathrm{E}_1 \begin{bmatrix} E_1 = i \\ \uparrow \\ [E_1 = 1] = 0 \\ [E_1 = 0] = 0 \\ \downarrow \\ E_1 = i \end{bmatrix}$$

Vejamos a representação completa das relações entre enunciados e metaenunciados. Da esquerda para a direita, temos o caso em que um enunciado é verdadeiro, e ao seu lado, o caso em que o enunciado é falso. No centro da matriz o enunciado ou metaenunciado base na linha superior e sua implicação na linha inferior. Nas extremidades dos vetores verticais, o que ocorre com os metaenunciados correspondentes. Na mesma ordem, nas duas últimas posições, repetimos as operações, mas invertemos a ordem, verificando as relações a partir dos metaenunciados (como fizemos acima):

$$\mathrm{E}_1 = 1 \begin{bmatrix} [E_1 = 1] = 1 \\ \uparrow \\ E_1 = 1 \\ \sim[E_1 = 0] \\ \downarrow \\ [E_1 = 0] = 0 \end{bmatrix} \quad \mathrm{E}_1 = 0 \begin{bmatrix} [E_1 = 0] = 1 \\ \uparrow \\ E_1 = 0 \\ \sim[E_1 = 1] \\ \downarrow \\ [E_1 = 1] = 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathrm{M}_{E1} = 1 \begin{bmatrix} E_1 = 1 \\ \uparrow \\ [E_1 = 1] = 1 \\ [E_1 = 0] = 0 \\ \downarrow \\ E_1 = 1 \end{bmatrix} \quad \mathrm{M}_{E1} = 0 \begin{bmatrix} E_1 = i \\ \uparrow \\ [E_1 = 1] = 0 \\ [E_1 = 0] = 0 \\ \downarrow \\ E_1 = i \end{bmatrix}$$

Nos casos acima a indeterminação não resulta do estado ontológico do sistema físico correspondente a cada enunciado, mas da relação lógica entre enunciados e metaenunciados. Por isso o único enunciado indeterminado decorre da falsidade de seu metaenunciado.

7. A análise de Heisenberg da lógica de Weizsäcker e o problema do terceiro excluído

Para Weizsäcker o sistema de proposições de mecânica quântica é composto por duas classes de enunciados: os enunciados – que são acerca de fatos do mundo – e os metaenunciados – que são acerca de enunciados. O princípio do terceiro excluído pode ser aplicado na análise das relações compreendidas por enunciados, mas não é válido quanto à classe dos metaenunciados, isto é, não pode ser aplicado na análise das relações compreendidas por metaenunciados e enunciados, o valor de verdade de um metaenunciado pode determinar o valor de verdade de um enunciado como falso, verdadeiro ou indeterminado[28].

Temos que distinguir aqui o que é valor de verdade de um enunciado do que é valor de verdade da relação entre enunciados. Um enunciado pode ser verdadeiro, falso ou indeterminado, conforme o estado quântico correspondente. Trata-se, portanto de um caso de paridade físico-lógica, ou, dizendo de outro modo, da adequação entre o estado ontológico e seu enunciado lógico. Um enunciado E pode ser verdadeiro ($E=1$), falso ($E = 0$) e indeterminado ($E = i$), mas nesse caso, a indeterminação sempre decorre ou da indeterminação ontológica do conteúdo físico do enunciado, ou da falsidade do metaenunciado ao qual este enunciado encontra-se subordinado. O caso ficará mais claro à medida em que avançarmos.

[28] De acordo com Heisenberg, o princípio do terceiro excluído deve ser modificado para ser compatível com o sistema de proposições da mecânica quântica. Como vimos, todavia, a lógica de Weizsäcker não promove ajustes no domínio deste princípio, e também em nenhuma outra área da lógica clássica. Pelo contrário, o que deve ser modificado é nosso entendimento acerca deste princípio mesmo. O que Weizsäcker propõe, de fato, é compreendermos sob quais condições o princípio do terceiro excluído não deve ser válido, e por que.

Em *Física e Filosofia* Heisenberg analisa a tentativa de Weizsäcker de elaborar um sistema formal de lógica quântica. A noção de níveis de linguagem é indispensável no sistema de Weizsäcker. Em um primeiro nível temos enunciados acerca de objetos, ou "fatos do mundo". Neste sentido, a equação $e = mc^2$ é uma relação simples entre fatos empíricos puros (energia, massa, velocidade da luz) e fatos matemáticos (igualdade, multiplicação, potenciação). Em um segundo nível de linguagem, temos enunciados sobre enunciados de objetos ou fatos do mundo. O enunciado "É verdadeiro que $e = mc^2$" é uma operação de segundo nível, e, portanto, um metaenunciado. Em um terceiro nível, temos enunciados acerca de enunciados. Se chamarmos o enunciado "É verdadeiro que $e = mc^2$" de e_1, então o enunciado "e_1 é verdadeiro" ("É verdade que *é verdadeiro que* $e=mc^2$") é uma operação de terceiro nível. Na linguagem de Weizsäcker, enunciados acerca de enunciados são metaenunciados. Logo, o sistema possui enunciados, metaenunciados de primeiro nível e metaenunciados de segundo nível[29].

Os metaenunciados são complementares. Heisenberg defende que na lógica clássica a relação entre diferentes níveis de linguagem é biunívoca. Heisenberg oferece o exemplo de um átomo em uma caixa. Ou "o átomo está na metade esquerda da caixa" – chamaremos este enunciado de e_1, ou "o átomo está na metade direita da caixa" – chamaremos este enunciado de e_2. O átomo pode, então, de acordo com a lógica clássica, encontrar-se em uma das metades ou na outra. Não há uma terceira possibilidade: o princípio do terceiro excluído! (Heisenberg, 1987, p. 138).

O enunciado "o átomo encontra-se na parte esquerda da caixa" é um enunciado de primeiro nível. O enunciado "É verdadeiro

[29] É uma decisão arbitrária interromper a série infinita de metaenunciados. Weizsäcker menciona apenas enunciados e metaenunciados.

que o átomo encontra-se na parte esquerda da caixa", ou seja, "e_1 é verdadeiro", ou simplesmente "$e_1 = 1$", é um metaenunciado de primeiro nível. Chamaremos tal enunciado de m_1. Para a lógica clássica, não há modos lógicos distintos para os diferentes níveis de linguagem, portanto, há equivalência total entre tais enunciados, de modo que ou são ambos verdadeiros, ou são ambos falsos[30]. Se m_1 é verdadeiro, então e_1 é verdadeiro. Se m_1 é falso, então e_1 é falso, e vice e versa. Se m_1 é falso, e, portanto, e_1 é falso, logo e_2 é verdadeiro. Temos então a seguinte distinção entre Lc e Lq:

$$L_c \begin{bmatrix} m_1 = 0 \\ e_2 = 1 \end{bmatrix}$$

Dadas as relações completas, se gerarmos uma tabela para cada possibilidade em que um enunciado, e_1 e e_2, e cada metaenunciado, m_1 e m_2, são v ou f, sendo l_e o nível dos enunciados e l_m o nível dos metaenunciados, temos:

$$l_e \begin{bmatrix} e_1 = 1 \\ e_2 = 0 \\ m_1 = 1 \\ m_2 = 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 = 0 \\ e_2 = 1 \\ m_1 = 0 \\ m_2 = 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2 = 1 \\ e_1 = 0 \\ m_2 = 1 \\ m_1 = 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2 = 0 \\ e_1 = 1 \\ m_2 = 0 \\ m_1 = 1 \end{bmatrix}$$

$$l_m \begin{bmatrix} m_1 = 1 \\ m_2 = 0 \\ e_1 = 1 \\ e_2 = 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 = 0 \\ m_2 = 1 \\ e_1 = 0 \\ e_2 = 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_2 = 1 \\ m_1 = 0 \\ e_2 = 1 \\ e_1 = 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_2 = 0 \\ m_1 = 1 \\ e_2 = 0 \\ e_1 = 1 \end{bmatrix}$$

[30] Heisenberg, quando se refere à lógica clássica, tem em mente especificamente a lógica aristotélica.

Ora, sabemos que o átomo está na caixa, ou no lado direito, ou no lado esquerdo. Se for falso que ele está no lado esquerdo, então é necessariamente verdadeiro que ele esteja no lado direito.

No caso do sistema lógico de Weizsäcker, a relação de equivalência entre enunciados de níveis diferentes é quebrada. A correção ou incorreção de um enunciado *e* de primeiro nível, (pertencente a l_e), permanece implicando a correção ou incorreção de um enunciado de segundo nível, um metaenunciado *m*, (pertencente a $l_{m)}$. Todavia, a incorreção de um enunciado de segundo nível não implica a incorreção de um enunciado de primeiro nível[31].

Heisenberg entende que há "completa equivalência" entre metaenunciados e enunciados quando há uma concordância necessária entre seus valores de verdade. Se soubermos que um metaenunciado afirmativo é verdadeiro, então saberemos que o enunciado corresponde é necessariamente verdadeiro. No entanto, se soubermos que o metaenunciado é falso, então não saberemos se o enun-

[31] O problema se deve à natureza física da indeterminação quântica, e não somente às relações lógicas entre níveis de enunciados. Para Heisenberg, um metaenunciado correto implica a correção de seu enunciado correspondente, mas um enunciado incorreto não implica a incorreção de seu enunciado correspondente, pois o estado físico de tal enunciado pode estar indeterminado, como está indeterminado o estado físico de uma entidade no experimento mental do gato de Schrödinger. Vejamos. Seja o enunciado "O gato está vivo" igual a e_1. Seja m_1 o metaenunciado "$e_1 = 1$". Se $m_1 = 0$, $m\ ((e_1= 1) = 0)$, não se segue que $e_1 = 0$, pois pode ser que $e_1 = {}_i$. Isto é, se o enunciado "O gato está vivo é verdadeiro" for falso, o enunciado "o gato está vivo" não é necessariamente falso. Em sentido estritamente lógico, isso ocorre porque em uma lógica trivalente, não ser verdadeiro não é o mesmo que ser falso, já que um enunciado pode ser indeterminado. Se o metaenunciado "O gato está vivo é verdadeiro" é verdadeiro, se $m\ ((e_1 = 1) = 1)$, então o enunciado "O gato está vivo" é necessariamente verdadeiro. O enunciado é necessariamente verdadeiro, mas pode nos oferecer informação incompleta sobre o sistema físico. Ora, se o estado quântico é indeterminado, então os enunciados "O gato está vivo" (A) e "O gato está morto" (B) podem estar ambos corretos e ambos incompletos. Somente o enunciado "A e B" nos daria uma informação mais completa. Aparentemente "A e B" viola o princípio de não contradição. Talvez seja necessário introduzir um operador lógico para "somente". Nesse caso, manteríamos o princípio intacto, pois se A fosse "O gato está somente vivo" e B "O gato está somente morto", já não seria possível afirmar "A e B".

ciado correspondente é falso ou indeterminado, portanto, é logicamente indeterminado. Assim, a "completa equivalência" só ocorre no caso em que os metaenunciados são verdadeiros.

Em *Física e Filosofia* Heisenberg notou esta relação assimétrica entre metaenunciados incorretos e seus enunciados correspondentes. Nas palavras de Heisenberg:

> Se o segundo enunciado for incorreto, fica em aberto se o átomo está, ou não, na metade esquerda: o átomo não precisa, necessariamente, estar na metade direita. Persiste ainda uma completa equivalência entre os dois níveis de linguagem, no exemplo citado, no que diz respeito à correção de um enunciado, mas não no que se refere à sua incorreção (Heisenberg, 1987, p. 139).

A sutileza da quebra de paridade lógica neste exemplo dado por Heisenberg – quebra de equivalência, na terminologia de Heisenberg – é que se m_1=0, m_1 (($e_1 = 1$) = 0), não é necessário que e_2=1. Na lógica quântica, o metaenunciado "é verdade que o átomo está SOMENTE no lado esquerdo da caixa", se for verdadeiro, estabelece que o enunciado "o átomo está SOMENTE no lado esquerdo da caixa" é verdadeiro. Caso o metaenunciado seja falso, o átomo pode estar SOMENTE no lado direito ou em uma região indeterminada entre o lado esquerdo e o lado direito. No que diz respeito à equivalência entre metaenunciados e enunciados, temos a seguinte diferença entre a lógica clássica e a lógica quântica:

$$L_c\begin{bmatrix} m_1 = 0 \\ e_2 = 1 \end{bmatrix} \qquad L_q\begin{bmatrix} m_1 = 0 \\ e_2 = i \end{bmatrix}$$

Dadas as relações completas:

$$l_e \begin{bmatrix} e_1 = 1 \\ e_2 = 0 \\ m_1 = 1 \\ m_2 = 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 = 0 \\ e_2 = 1 \\ m_1 = 0 \\ m_2 = 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2 = 1 \\ e_1 = 0 \\ m_2 = 1 \\ m_1 = 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2 = 0 \\ e_1 = 1 \\ m_2 = 0 \\ m_1 = 1 \end{bmatrix}$$

$$l_m \begin{bmatrix} m_1 = 1 \\ m_2 = 0 \\ e_1 = 1 \\ e_2 = 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 = 0 \\ m_2 = i \\ e_1 = 0 \\ e_2 = i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_2 = 1 \\ m_1 = 0 \\ e_2 = 1 \\ e_1 = 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_2 = 0 \\ m_1 = i \\ e_2 = 0 \\ e_1 = i \end{bmatrix}$$

Na lógica quântica, ao contrário da lógica clássica, o fato de sabermos que o átomo não está no lado esquerdo da caixa não nos comunica onde o átomo está – sabemos somente onde ele não está. Isto posto, o princípio do terceiro excluído não se aplicaria a tal sistema de enunciados. O terceiro excluído não se aplicaria aos enunciados quânticos por estas duas razões:

1. Um enunciado do tipo “O átomo está somente no lado esquerdo da caixa” pode ser (a) ou verdadeiro, (b) ou falso, (c) ou indeterminado. Não há exclusão de um terceiro valor de verdade. O princípio aqui é o de inclusão, e não de exclusão, do terceiro.

2. Se um metaenunciado é verdadeiro seu enunciado correspondente é necessariamente verdadeiro, mas se o metaenunciado é falso, o enunciado correspondente é indeterminado.

Todavia, mesmo após expor suas considerações acerca da lógica de Weizsäcker, Heisenberg permanece sendo inconclusivo. Em *Física e Filosofia*, onde discorre acerca das relações entre lógica e linguagem na física moderna, não fica compreensível se a noção de "limites de aplicabilidade lógica" é admitida pelo autor. Sendo assim, Heisenberg não se posiciona de modo claro em relação ao sistema de Weizsäcker, em que distintos níveis de linguagem possuem diferentes ordenações lógicas. Não sabemos se Heisenberg permanece pensando que o princípio do terceiro excluído deve ser modificado no escopo da lógica quântica ou se considera que tal questão não faz sentido, posto que tal princípio não se aplique àquela esfera. A exposição que faz do sistema de Weizsäcker parece indicar que Heisenberg considera que o terceiro excluído não se aplica à lógica quântica. Contudo, há passagens do texto que comprometem esta interpretação:

> Todavia, como aponta Weizsäcker, pode-se distinguir diversos níveis de linguagem. O primeiro deles refere-se a objetos, por exemplo, a átomos e elétrons. O segundo tem a ver com enunciados sobre objetos. O terceiro dirá respeito a enunciados acerca de enunciados sobre objetos e, assim, *ad infinitum*. (...) A possível modificação da lógica clássica dirá respeito, em primeiro lugar, ao nível de pronunciamentos sobre objetos (Heisenberg, 1987, p. 137).

Neste trecho Heisenberg considera ainda uma "possível modificação" da lógica clássica com relação aos enunciados quânticos de primeiro nível. O terceiro excluído não se aplicaria aos enunciados de primeiro nível porque, voltando ao exemplo do átomo na caixa, a mecânica quântica admite mais de dois estados possíveis. O átomo pode estar ou somente do lado direito, ou somente do lado esquerdo, ou em um estado quântico indeterminado entre o lado esquerdo e o lado direito:

> Na teoria quântica, contudo, teremos que admitir – se quisermos fazer uso dos termos 'átomo' e 'caixa' – que ocorram outras possibilidades, misturas estranhas daquelas duas" (Heisenberg, 1987, p. 138).

Para tentar resolver o problema Heisenberg chega a considerar que a lógica de Weizsäcker "corresponde ao formalismo matemático da mecânica quântica" e que "essa estrutura lógica propicia as fundações de uma linguagem precisa que pode ser utilizada na descrição do átomo" (Heisenberg, 1987, p. 139).

Parece que Heisenberg considera que a lógica de Weizsäcker soluciona as aparentes contradições entre o sistema de proposições da mecânica quântica e o princípio clássico do terceiro excluído, admitindo que os níveis de linguagem quântica exijam modos lógicos específicos, dentro dos quais não se inclui o referido axioma lógico. Se *x* não se aplica a *y*, *y* não pode implicar que *x* é falso. Entretanto, o quadro pretensamente diáfano volta a turvar-se rapidamente. Heisenberg defende que tal linguagem levanta problemas. Não fica clara a extensão destes problemas. Heisenberg sustenta que na lógica quântica a equivalência lógica entre enunciados de níveis diferentes é quebrada somente nos casos de incorreção, mas não nos casos de correção. Se um enunciado de segundo nível é correto, então o enunciado de primeiro nível correspondente é necessariamente correto. Tal equivalência revela uma interrelação própria da lógica clássica. É como se Heisenberg defendesse que nos casos de correção os fundamentos da lógica clássica são suficientes no regimento das relações entre enunciados de mecânica quântica. É como se a lógica clássica fosse um caso limite da lógica quântica. Quando um metaenunciado é verdadeiro, a relação dele com seu enunciado pode ser descrita satisfatoriamente por uma lógica bivalente. Caso o metaenunciado seja falso, sua relação com o enunciado correspondente deverá ser descrita por uma lógica trivalente.

A lógica clássica opera com dois valores de verdade, $V = 1$ e $F = 0$. Ou bem algo é verdadeiro, ou bem é falso, não havendo uma terceira possibilidade. Algo não pode ser V e F ao mesmo tempo. Na lógica quântica, há três valores de verdade: $V = 1$, $F = 0$ e $I = i$. Um enunciado pode ser verdadeiro, falso ou indeterminado. De acordo com Weizsäcker, se um metaenunciado é falso, então o enunciado correspondente pode ser falso ou indeterminado. Temos aí os três valores de verdade que caracterizam a lógica quântica e a tornam tão diferente da lógica clássica. Todavia, parece que Heisenberg argumenta que na lógica quântica ainda persistem fortes elementos clássicos – talvez seja neste sentido que o autor afirma ser a lógica clássica um *a priori* para a lógica quântica. Vejamos. Mesmo na lógica quântica, se um metaenunciado é verdadeiro, então o enunciado correspondente é falso ou verdadeiro, mas nunca indeterminado. Neste caso, os valores de verdade clássicos V e F regem as relações entre os metaenunciados e enunciados quânticos.

Analisemos o seguinte caso. Temos dois enunciados de primeiro nível (E_1^a e E_1^b) e um metaenunciado (M_1). E_1^a = "O elétron passou somente pela fenda A". E_1^b = "O elétron passou somente pela fenda B". M_1 = "O enunciado E_1^a é verdadeiro":

$$E_1^a = 1$$

Se M_1 é verdadeiro, então E_1^a é necessariamente verdadeiro e E_1^b é necessariamente falso[32].

[32] Conforme o axioma de complementariedade de Weizsäcker, dois enunciados são complementares quando a verdade de um implica a falsidade de outro (Algo como o princípio de não contradição). A introdução de um operador "SOMENTE" é o que faz com que tais enunciados sejam complementares. Com o "somente", se um enunciado é verdadeiro, o

Se o enunciado "é verdadeiro que o elétron passou somente pela fenda A" é verdadeiro então o enunciado "o elétron passou pela fenda B" ou é verdadeiro ou é falso – logo, é falso – não havendo possibilidade de ser indeterminado. Sendo assim, poderíamos formular o seguinte princípio: "Sempre que um metaenunciado for verdadeiro, os enunciados correspondentes serão falsos ou verdadeiros, mas nunca indeterminados". Se isto está correto, então Heisenberg tinha razão em considerar a "persistência das leis clássicas na teoria quântica" (Heisenberg, 1987, p. 139).

A "crítica" de Heisenberg ao sistema de Weizsäcker, no sentido de que este pressuporia um total rompimento com a lógica clássica (Heisenberg não descarta a lógica de Weizsäcker, mas a considera problemática em alguns sentidos complexos demais para serem discutidos naquela ocasião, em *Física e Filosofia*), contudo, não nos parece justa, nem mesmo clara. O que queremos dizer é que não nos parece que possamos criticar Weizsäcker por postular um rompimento total com a lógica clássica. Weizsäcker não defendeu que todas as relações entre enunciados de mecânica quântica deveriam necessariamente contar com os três valores de verdade quânticos, V, F e I. O próprio Weizsäcker defendeu que, na lógica quântica, é a falsidade de um metaenunciado que introduz a indeterminação do enunciado correspondente como um valor de verdade, e que o mesmo não se dá no caso de metaenunciados verdadeiros[33]:

outro é falso. Sem o operador "somente" os enunciados "o elétron passou pela fenda A" e "O elétron passou pela fenda B" poderiam ser ambos verdadeiros, de modo que não seriam complementares. Isto é, podemos falar "A e B". Mas não podemos falar "Somente A e Somente B". Se "Somente A" é verdadeiro, então "Somente B" é falso. Se "Somente A" é falso, então "Somente B" pode ser verdadeiro ou indeterminado. Se não é verdade que o elétron passou somente pela fenda A, então pode ter passado somente pela fenda B como pode ter passado em uma "estranha mistura" entre a fenda A e B.

[33] Esta passagem de Weizsäcker nos parece problemática e carece de maior análise e desenvolvimento. Ele parece defender que o terceiro excluído se aplica apenas às relações entre metaenunciados e enunciados quando os primeiros são falsos. Mas o valor de verdade

> Podemos estabelecer exatamente em que sentido o princípio do terceiro excluído é válido – em que nível se aplica e em que nível não se aplica. Os dois enunciados *a*1 e "*a*1 é verdadeiro" pertencem a níveis distintos de linguagem e sem dúvida possuem sentidos diferentes. Na lógica clássica tais enunciados são equivalentes, isto é, ou ambos são verdadeiros ou ambos são falsos. Na lógica quântica tais enunciados não são equivalentes. Na realidade, da verdade ou falsidade de *a*1, se segue a verdade ou falsidade de "*a*1 é verdadeiro", mas não o inverso: se "*a*1 é verdadeiro" é falso, *a*1 pode estar indeterminado. (...) Neste sentido, podemos afirmar que a lógica quântica não modifica as implicações do valor "verdadeiro", mas somente do valor "falso" (Weizsäcker, 1958, p. 320).

Heisenberg considera que os enunciados de mecânica quântica contêm informações acerca de novas estruturas ontológicas desconhecidas do "materialismo ingênuo" da física clássica. Como a linguagem evoluiu para expressar os níveis imediatos de experiência do mundo, obviamente, há contradições entre os modos lógicos que regem tal linguagem, e a concatenação dos fatos quânticos. Estes, por serem tão diferentes e pouco intuitivos, por serem de uma complexidade formal e abstrata muito elevada, demandam novos modos lógicos, aparentemente incompatíveis com aqueles da linguagem ordinária. Sendo assim, Heisenberg considera muito natural que haja contradições entre princípios de lógica clássica, como o "terceiro excluído", e enunciados de mecânica quântica, especialmente aqueles que comunicam relações de incerteza e superposi-

"indeterminado" parece se aplicar, também, no primeiro nível, quando tomamos um enunciado isoladamente, sem mesmo levar em conta sua relação com metaenunciados. Ora, os enunciados "O gato de Schrödinger está vivo", "O elétron passou pela fenda esquerda", "As imagens em um interferômetro de Mach-Zender são provocadas por partículas" ou "O átomo está no lado direito da caixa" são todos passíveis de três valores de verdade: v, f e i. Nesse caso, a indeterminação lógica dos enunciados decorre da indeterminação ontológica dos estados físicos correspondentes. Em todos os casos, é apenas a partir da introdução de um operador restritivo "somente" que eles se tornam bivalentes.

ção – todos os fatos do mundo para os quais uma descrição física é possível se e somente se estiverem expressos por meio do princípio de incerteza de Heisenberg e da equação de Schrödinger.

Considerações finais

Heisenberg parece chegar à conclusão que a lógica clássica é um caso limite da lógica quântica, sendo um *a priori* para esta. Isto significa que a lógica clássica é limitada ao Mundo 1, ou seja, não podemos considerar que ela seja universal a todos os mundos lógicos possíveis. No que diz respeito ao sistema de enunciados de mecânica quântica devemos destacar dois casos em que a lógica clássica pode ou não aplicar-se: (1) Quanto ao conteúdo de um enunciado. (2) Quanto à relação entre enunciados e metaenunciados.

No caso (1) sempre que o conteúdo de um enunciado expressar incerteza e superposição, os princípios de não contradição e terceiro excluído serão suspensos[34]. Com respeito ao caso (2) – a relação entre enunciados e metaenunciados – a lógica clássica é válida no regimento das relações entre enunciados quânticos sempre que os valores de verdade V e F forem suficientes (sempre que os metaenunciados forem verdadeiros) e inválida sempre que os valores de verdade V, F, e I estiverem presentes (o que ocorre quando metaenunciados são falsos e o valor de verdade I é introduzido).

[34] De acordo com Décio Krause e Newton da Costa, outro princípio "violado" pela mecânica quântica é o de identidade. Em alguns trabalhos como *Axioms for Collections of Indistinguishable Objects*, de 1996 Krause defende que na mecânica quântica os objetos devem ser tratados como não-indivíduos, logo, devemos dispor de teorias que violam o princípio de identidade dos indiscerníveis. Jaison Schinaider, em *Identidade relativa, predicados sortais e a Indistinguibilidade das partículas na mecânica quântica* enfatiza que os objetos quânticos devem ser tratados como entidades para as quais a noção de identidade não faz sentido. Todos esses trabalhos foram escritos décadas após os manuscritos de Weizsäcker. Michael Dickson em *Quantum Logic Is Alive*, afirma que a importância de uma lógica quântica permanece "atual".

Consideramos que a lógica de Weizsäcker constitui uma interessante investigação acerca da relação entre os princípios da lógica clássica e os enunciados da mecânica quântica. No entanto, tal lógica carece de formalização, campo que poderá ser desenvolvido em estudos ulteriores.

Referências bibliográficas

ARISTÓTELES. **De interpretatione** (Da interpretação). Tradução de Emmanuel Carneiro Leão. 2012. Disponível em: https://www.docsity.com/pt/de-interpretatione-platao/4850718/.

BÍBLIA. **Bíblia Sagrada**. Gênesis, 11:1–9. Tradução utilizada no texto. Disponível em: https://www.biblegateway.com.

BORGES, Jorge Luis. A biblioteca de Babel. *In*: BORGES, Jorge Luis. **Ficções**. Tradução de Carlos Nejar. São Paulo: Editora Globo, 1998.

BORN, Max; AUGER, Pierre; SCHRÖDINGER, Erwin; HEISENBERG, Werner. **Problemas da física moderna**. Tradução de Gita K. Guinsburg. São Paulo: Perspectiva, 2006.

CORNELLI, Gabriele; COELHO, Maria Cecília de Miranda N. "Quem não é geômetra não entre!": geometria, filosofia e platonismo. **Kriterion**, Belo Horizonte, n. 116, p. 417-435, dez. 2007.

DA COSTA, N. C. A. **Ensaio sobre os Fundamentos da Lógica**. São Paulo: Hucitec, 1980.

DICKSON, Michael. Quantum logic is alive. **Philosophy of Science**, Chicago, v. 68, n. 3, 2001.

EINSTEIN, Albert. Induction and deduction in physics. **Scientific Studies**, São Paulo, v. 3, n. 4, out./dez. 2005. Tradução de A. M. Adam do alemão para o **Journal for General Philosophy of Science**, v. 31, p. 34–35, 2000.

EINSTEIN, Albert. Sobre a teoria geral da gravitação. *In*: **Prêmios Nobel na Scientific American**. São Paulo: Duetto, 2010.

FERREIRA, Fernando. **A matemática de Kurt Gödel**. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2006. Disponível em: http://www.ciul.ul.pt/~ferferr/GodelMat.pdf.

HEISENBERG, Werner. **Philosophic problems of nuclear science**. New York: Philosophical Library, 1952.

HEISENBERG, Werner. **Física e filosofia**. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1987.

KRAUSE, Décio. Axioms for collections of indistinguishable objects. **Logique et Analyse, Louvain**, n. 153–154, p. 69–93, mar./jun. 1996.

MAXWELL, James Clerk. On action at a distance. P**roceedings of the Royal Institution of Great Britain**, London, v. 7, p. 44–54, 1873. Republicado *in*: NIVEN, W. D. (ed.). **The scientific papers of James Clerk Maxwell**. Cambridge: Cambridge University Press, 1890. v. 2, p. 311–323.

NETTO, Felipe O. S. Os teoremas de Gödel. **Cadernos do IME** – Série Matemática, Rio de Janeiro, v. 23, p. 133–139, 2011. Disponível em: https://www.e-publicacoes.uerj.br/cadmat/article/download/11864/11541/50827.

RODRIGUES FILHO, Abílio. O princípio do terceiro excluído e a lógica intuicionista. **Revista PHILÓSOPHOS**, Goiânia, v. 12, n. 2, p. 11–32, jul./dez. 2007.

RUSSELL, Bertrand. **Lógica e conhecimento e ensaios filosóficos**. São Paulo: Abril Cultural, 1978.

SAATY, Thomas L. **The three laws of thought, plus one**: the law of comparisons. Pittsburgh: RWS Publications, 2014.

SANZ, Wagner de Campos. **Uma investigação acerca das regras para a negação e o absurdo em dedução natural**. 2006. Tese (Doutorado em Filosofia) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006. Disponível em: https://www.cle.unicamp.br/prof/coniglio/tesepb.pdf.

SILVA, Vinícius Carvalho da. **A interpretação filosófica da mecânica quântica de Werner Heisenberg**: ontologia matemática e crise nos fundamentos da lógica clássica. 2012. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

TUGENDHAT, Ernst; WOLF, Ursula. **Propedêutica lógico-semântica**. São Paulo: Loyola, 1997.

WANG, Hao. **Reflections on Kurt Gödel**. Cambridge: MIT Press, 1981.

WEIZSÄCKER, Carl Friedrich von. **Zum Weltbild der Physik**. Stuttgart: S. Hirzel, 1958.

WEIZSÄCKER, Carl Friedrich von. **La importancia de la ciencia**. Tradução de Juan Carlos García Borrón. Barcelona: Editorial Labor, 1972.

WEIZSÄCKER, Carl Friedrich von. **La imagem física del mundo**. Madri: Editorial Católica S. A., 1974.

Sobre o autor

Vinícius Carvalho da Silva é doutor e mestre em Filosofia da Ciência e Teoria do Conhecimento pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Pós-doc pelo IMS-UERJ. Estudou História da Ciência no COC-Fiocruz. É professor de Filosofia na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (FACH-UFMS), do PPGECI do Instituto de Física da UFMS, do PPgFIL-UFMS, do PPGFIL-UFT e do PIEC do Instituto de Física da USP. Finalista do Jabuti Acadêmico 2025 com a obra "Filosofia da Física: Problemas de Ontologia e Epistemologia da Física Moderna". Coordena o Grupo de Pesquisa "Physikós - Estudos em História e Filosofia da Física e da Cosmologia" e é co-responsável de pesquisa da cooperação internacional entre o GP-Physikós/UFMS e o Departamento de Filosofía y Lógica e Filosofía de la Ciencia da Universidad de Sevilla (Espanha). É membro fundador do GT de Filosofia das Ciências Físicas da ANPOF, membro do Grupo de Pesquisa "Estudos Sociais e Conceituais de Ciência, Tecnologia e Sociedade" (UERJ), do "TeHCo - Grupo de Teoria e História dos Conhecimentos" do Instituto de Física da USP e do "LLC - Grupo de Pesquisa Lógica, Linguagem e Ciência" da UFT. É colaborador do *Hands on CERN* do Departamento de Física Nuclear e Altas Energias do Instituto de Física da UERJ.

Título	Lógica Trivalente para enunciados de mecânica quântica *Os trabalhos de Heisenberg e Weizsäcker sobre física, lógica e linguagem*
Formato	14 x 21 cm
Tipografia	Minion Pro e Korolev Compressed
Licença	CC BY-NC-SA

editora UFMS

Este livro, produzido pela Editora UFMS, é financiado com recursos públicos e tem como finalidade a ampliação do acesso ao conhecimento. A obra está alinhada ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 4 (ODS 4 – Educação de Qualidade), ao promover uma educação inclusiva, equitativa e de qualidade, com a participação de docentes e discentes. Ademais, contribui para a preservação ambiental, ao favorecer a redução do uso de papel e da pegada de carbono.

Publicado *on-line* em: https://repositorio.ufms.br

Campo Grande
20°29'44.3"S 54°36'48.7"W
Feito no Brasil
2026

Lógica Trivalente para Enunciados de Mecânica Quântica propõe uma investigação rigorosa e original sobre as relações entre física, lógica e linguagem. A partir dos trabalhos de Werner Heisenberg e Carl Friedrich von Weizsäcker, a obra examina os limites da lógica clássica diante dos fenômenos quânticos e discute como indeterminação, negação e verdade assumem novos sentidos no domínio microscópico.

Mais do que uma análise histórica, este livro oferece uma reflexão filosófica profunda sobre os fundamentos conceituais da mecânica quântica e sobre o próprio estatuto da racionalidade científica.

ISBN 978-85-7613-837-2
9 788576 138372