



PERSPECTIVAS

REVISTA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS

VOL. 10, Nº 2, 2025, P. 182-223
ISSN: 2448-2390

O sistema conceitual da Nova Física: uma tradução comentada de Hans Thirring (1933)

DOI: 10.20873/rpvn10v2-50

Tradução, apresentação e notas

Rafael Velloso

E-mail: rvelloso@unicamp.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2601-6495>

Antonio Augusto Passos Videira

E-mail: guto@cbpf.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4369-9221>

Apresentação

Hans Thirring (1888–1976) foi um cientista natural austríaco, professor catedrático de física teórica na Universidade de Viena entre 1921 e 1938, e uma figura central na formação de jovens cientistas vienenses no período pós Primeira Guerra Mundial. Embora suas principais contribuições científicas estejam relacionadas à teoria da relatividade geral, Thirring também produziu nas décadas de 1920 e 1930 uma série de artigos e livros nos quais apresenta e discute, de maneira crítica, os (então) recentes resultados da nova física - a mecânica quântica. Entre essas obras, destaca-se o artigo publicado em 1933, *Die Wandlung des Begriffssystemes der Physik* (*A transformação do sistema conceitual da física*), cuja tradução para o português encontra-se ao final da presente introdução.

No referido artigo aqui traduzido, Thirring examina os impactos dos resultados

alcançados pela pesquisa em mecânica quântica ao longo da década de 1920 e nos primeiros anos da década de 1930, enfatizando aquilo que denomina uma “abundância de novos fatos” descobertos e sistematizados pela nova física. Embora seu texto contenha passagens elogiosas, pode-se afirmar que seu objetivo principal não é celebrar a mecânica quântica, mas, sim, oferecer ao público em geral uma avaliação crítica. Para o físico vienense, mesmo com os recentes avanços, certamente promissores, a teoria ainda carecia daquilo que, para ele, era essencial: um sistema conceitual capaz de atribuir significado aos seus próprios conceitos. A mera predição de fenômenos, embora importante, não deveria constituir um fim em si mesma. O objetivo da física consistiria, portanto, na elaboração de conceitos que nos permitissem descrever e compreender o “funcionamento das forças elementares e atômicas da natureza”.

Passados cem anos desde a consolidação da mecânica quântica como um campo de investigação, o artigo de Thirring – escrito em meio aos intensos debates que então ocorriam – revela-se um exemplo significativo das preocupações da comunidade científica da primeira metade do século passado diante desses desenvolvimentos. Além disso, o texto aborda questões que permanecem centrais nas discussões contemporâneas em história e filosofia da física, tais como: deve a mecânica quântica ser apenas uma ferramenta preditiva e descritiva, ou deve-se buscar uma teoria que forneça um significado ontológico para o microcosmo? Qual é o papel da matemática na teoria quântica? Ainda faz sentido pensar em representações para os processos quânticos?

Introdução

Hans Thirring¹, nascido em 23 de março 1888, era natural da capital do então Império Austro-Húngaro. Estudou matemática e física na Universidade de Viena de 1906 a

¹ Esta introdução retoma ideias e teses apresentadas anteriormente na apresentação que escrevemos para a publicação da tradução em português de um artigo de Guido Beck, antigo aluno de Hans Thirring. Cf. Videira; Velloso, 2002.

1911, ano que obteve o título de doutor. Durante o seu período de estudante, Thirring conheceu Erwin Schrödinger (1887-1961), um ano mais velho do que ele. Os dois mantiveram uma amizade ao longo de suas vidas. A partir do ano de 1910, Thirring ocupou o cargo de assistente de Friedrich Hasenöhl (1874-1915), que tinha sido seu professor, e era o responsável pela cátedra de física naquela altura. Hasenöhl, antigo estudante de Ludwig Boltzmann (1844-1906), era bastante conhecido, com resultados importantes em relatividade². Ainda como assistente, Thirring deu aulas sobre a interferência dos raios-X e a estrutura cristalina. Essas classes ocorreram durante o semestre de inverno de 1918-1919, logo após o fim da guerra, que foi considerado como especial devido ao afluxo dos antigos soldados. No semestre de inverno de 1920-1921, o tema de suas preleções foi a teoria da relatividade geral.

Anos antes, entre 1913 e 1915, Thirring publicou artigos sobre a antiga teoria quântica. Em 1913, por exemplo, Thirring aperfeiçoou os resultados sobre calor específico dos cristais, resultado esse que tinha sido obtido anteriormente por Max Born e Theodore von Kármán. Também em 1913, Thirring submeteu outros trabalhos sobre o mesmo tema. O interesse de Thirring por esse tema ocorreu devido à sua amizade com Schrödinger³.

A relação dos cursos oferecidos por Thirring como assistente compreende os seguintes temas: inverno de 1916-1917, equações diferenciais parciais da física matemática; semestre de verão de 1917, hidrodinâmica; semestre de inverno de 1917-1918, física dos cristais. Essa relação torna possível perceber que Thirring abordava nos seus cursos temas bastantes diversos. Sua formação em física era muito sólida, principalmente na chamada física clássica; os seus colegas, o viam como um físico com clara preferência pelos aspectos clássicos dessa disciplina⁴.

Ao longo da década de 1910, Thirring também se dedicou à teoria quântica dos

² Mehra e Rechenberg (1987), p. 77-81 e 133-141.

³ Mehra e Rechenberg (1987), p. 106.

⁴ Videira e Velloso (2024), p. 17-27.

eixos de um cristal. Sobre esse tema, ele publicou, em 1920, um dos seus últimos trabalhos relacionados à antiga teoria quântica. Nesse momento, o seu interesse já estava direcionado para a teoria da relatividade geral, área na qual se deu a sua contribuição científica mais conhecida: o efeito Lense-Thirring⁵, obtida com a colaboração de um estudante de física, Josef Lense (1890-1985), posteriormente professor de matemática aplicada na Universidade de Munique. Com esse resultado, Thirring consolidou sua presença no cenário científico da época, comprovado pelo convite, recebido anos depois, para editar dois volumes da célebre enciclopédia *Handbuch der Physik*. Thirring editou em 1928 o volume 3º, intitulado *Mathematische Hilfsmittel in der Physik* (Métodos matemáticos da física, em tradução livre). No ano seguinte, ele organizou o volume nº 4 *Allgemeine Grundlagen der Physik* (Fundamentos gerais da física, em tradução livre).

Além de ter organizado esses dois volumes, Thirring também foi responsável por contribuições para eles. Um capítulo foi escrito para tratar da eletrodinâmica dos corpos em movimento, a teoria especial da relatividade, área na qual ele era reconhecidamente um especialista. A segunda contribuição tratava do sistema conceitual das leis fundamentais da física de campos, área que também pertencia à chamada física clássica por ser anterior ao século XX. Segundo alguns historiadores da física⁶, esses dois capítulos exibem o enorme talento que Thirring possuía como expositor: uma notável capacidade de apresentar, clara e compreensivelmente, os mais diferentes tópicos de física, talento também exibido em sala de aula.

A morte de Hasenöhl no campo de batalha da Primeira Guerra Mundial, abriu uma vaga de catedrático. O primeiro cientista a ser contactado para sucedê-lo foi Arnold

⁵ Em 1917, Hans Thirring inicia o trabalho denominado *Wirkung rotierender Massen* (Efeito de massas rotativas, tradução livre), com o emprego de certas aproximações das equações de Einstein, o que permite a dedução de certos “efeitos centrífugos” próximo ao centro de uma casca massiva girando, ou seja, ao girar, há um arraste de referências inerciais no sentido de sua rotação. No mesmo período, Joseph Lense aplicou estes cálculos à astronomia, o que acarretou a denominação do efeito como Lense-Thirring. Apesar da dificuldade em se verificar essa previsão teórica na época, em 2004 foram realizados experimentos, com auxílio de satélites, que confirmaram a previsão teórica de Thirring e Lense, cf. Pfister, 2003, p. 2-3. Para mais informações sobre este efeito, cf. Zimmer & Kerber (Orgs.).

⁶ Mehra e Reichenberg (1987), p. 264, nota 53.

Sommerfeld (1868-1951), então em Munique, mas já um nome bastante conhecido da física. Sommerfeld, após negociações prolongadas, acabou por recusar o convite, uma vez que sentia que Viena não lhe proporcionaria as mesmas condições para a pesquisa que desfrutava na cidade bávara. Segundo Ludwig Flamm (1885-1964), físico e genro de Boltzmann, Sommerfeld teria alertado os dirigentes da Universidade de Viena que não era necessário contratar um especialista estrangeiro para o lugar de Hasenöhl, uma vez que este último havia formado alguns bons cientistas⁷. O escolhido foi Thirring, primeiramente em 1920 como catedrático extraordinário e, a partir do ano seguinte, como catedrático regular.

Na época de sua confirmação como catedrático na Universidade de Viena, Thirring já não era um pesquisador ativo e fecundo, seja em teoria quântica, seja em relatividade. Uma das razões para isso foi seu interesse por desenvolver patentes técnicas, interesse que talvez tenha surgido a partir de seus trabalhos no esforço de guerra austríaco e que complementavam o seu salário como professor, além da sua vontade de se dedicar à filosofia e à psicologia, para contribuir para a qualidade de vida das pessoas em geral. Thirring era pacifista, razão pela qual, anos mais tarde, enfrentou enormes problemas com o regime nazista, vigente em seu país a partir da anexação da Áustria em março de 1938.

Segundo o seu filho mais novo, Walter (1927-2014), Thirring pai via-se antes de tudo como um filósofo⁸. Apesar de seus muitos e diversificados interesses, Hans Thirring continuou como catedrático de física até 1938, ano em que, devido às suas crenças pacifistas, foi demitido do cargo de catedrático. Não houve outra razão para a sua demissão, já que ele era considerado ariano e não pertencia a nenhuma agremiação política de esquerda. Thirring recuperou o cargo após o fim da 2ª Guerra Mundial, após a sua reabilitação, desempenhando as funções de catedrático cargo até a aposentadoria compulsória

⁷ Ludwig Flamm. Hans Thirring zum seinem 70. Geburtstag am 23. März 1958. *Acta Physica Austriaca*, vol. 12, nº 1, pp. 1-8.

⁸ Walter Thirring. *The Great of Discovery – Great Encounters along the Way*. Singapore: World Scientific Press, 2008, pág. 9.

em 1958, além de contribuir para o processo de desnazificação da Universidade de Viena no pós-guerra.

Como catedrático de física teórica, Thirring pai não pareceu interessado em criar uma escola de física, mesmo naquela que foi, provavelmente, a sua principal especialidade: a teoria da relatividade. Segundo a declaração de antigo estudante seu em fins dos anos de 1910, Karl Herzfeld (1892-1978) a personalidade de Thirring não parecia atender as exigências necessárias para formar uma escola competitiva em física teórica, como as que surgiram em Munique ou Göttingen⁹. Além da personalidade, Thirring parecia preferir a física clássica, o que era evidente pelo modo o qual ele organizava seus cursos, um ciclo completo de física dado ao longo de oito semestres. Nas palavras de Herzfeld: “*Suas preleções eram arrumadas de tal modo que elas eram muito boas em física clássica, mas não havia praticamente nada de teoria quântica. Os estudantes eram muito bem treinados em física clássica.*”¹⁰

A preferência de Thirring pela física clássica não deve ser entendida como desconhecimento ou menosprezo pela teoria quântica. Um terceiro capítulo, escrito para uma outra enciclopédia de física, intitulado *Die Grundlagen der neueren Quantentheorie* (As ideias fundamentais da mais recente teoria quântica, em tradução livre), publicado em 1928, mostra que seu domínio nessa área estava longe de ser superficial ou insuficiente. A sua competência era grande o suficiente para ser absorvida por aqueles que assistiam suas preleções. Além de Guido Beck (1903-1988) e Weisskopf, outros estudantes que deixaram marcas interessantes em física quântica foram Otto Halpern (1899-1982) e Eugene Guth (1905-1990).

A participação de Thirring nos *Mathematischen Kolloquiums*

⁹ Michael Eckert. *Die Atomphysiker – Eine Geschichte der Theoretischen Physik am Beispiel der Sommerfeldschule*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 1993.

¹⁰ Cf. Herzfeld, <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4669>. Consultado em 10/06/2021.

Os primeiros 20 anos do século XX foram um período de profundas modificações epistemológicas, ontológicas e metodológicas na física¹¹. Se na virada dos séculos XIX-XX o “edifício” físico parecia quase finalizando, com a lei da radiação do corpo negro, que viria a dar ensejo à Teoria dos *Quanta*, proposta por Max Planck (1858-1947) em 1900 e a Teoria da Relatividade Restrita, proposta por Albert Einstein 1905 – acrescido das já conhecidas dificuldades impostas pelo eletromagnetismo –, novos e preocupantes problemas são identificados neste edifício “quase acabado”. Problemas estes que inauguram duas novas áreas da física, a saber, a relatividade e a mecânica quântica.

Como dito anteriormente, Thirring, além de contribuir teorica e experimentalmente para ambas as áreas, acompanhava e refletia sobre as consequências filosóficas que a relatividade e mecânica quântica acarretavam na física. Tais reflexões são encontradas em seus livros *Die Grundgedanken der neueren Quantentheorie* (1928) e *The elements of the new quantum mechanics* (1932), assim como em *Die Wandlung des Begriffssystemes der Physik* (1933) (A transformação do sistema conceitual da física, em tradução livre); este último apresentado no Colóquio de Matemática da Universidade de Viena no semestre de primavera de 1932¹². Nos três trabalhos percebe-se a maneira pela qual Thirring posicionava-se com relação aos resultados da mecânica quântica: se, por um lado, valorizava seus resultados matemáticos e experimentais, por outro criticava seu vazio de significado ao indicar a inexistência de fundamento filosófico na teoria quântica.

Antes de apresentar, em linhas gerais, o conteúdo do artigo aqui traduzido, é importante contextualizar a realização dos colóquios de matemática ocorridos na Universidade de Viena entre os anos de 1928 e 1936.

Os chamados *Mathematischen Kolloquiums* (1928-1936), organizados pelo matemático austríaco Karl Menger (1840-1921), em parceria com o Círculo de Viena, eram

¹¹ Balsas e Videira (2013); Beller (1999); Cassirer (1956); Chevalley (1994); Cushing (1994); Forman (2011); Fragozo e Videira (2012); Roque e Videira (2013); Schnädelbach (1991); Velloso e Videira (2024; 2025); Videira (2006; 2011; 2013); Velloso (2022).

¹² Cf. Stadler, 2015, p. 195-199.

uma espécie de fórum onde estudantes e professores apresentavam e discutiam trabalhos concernentes à lógica e matemática, mas, também, à epistemologia e filosofia. Preocupados com as profundas modificações no arcabouço epistemológico, ontológico, metodológico e axiológico das ciências da natureza, ocorridas ao longo dos primeiros 20 anos do século XX (em especial na física e na matemática), os colóquios tinham a função de ser um espaço onde professores e estudantes de áreas distintas discutiam a profundidade destas modificações, bem como suas consequências na produção de conhecimento. Tais discussões foram organizados na revista *Ergebnisse eines Mathematischen Kolloquiums* (Resultados de um colóquio matemático, em tradução livre), esta publicação também é um produto da própria organização dos encontros. Esta iniciativa de Menger soma-se às diferentes atividades que ocorriam, paralelamente, neste período da Universidade de Viena, como fruto da fecundidade intelectual vivenciada pela instituição, em que pese as crises sociais, políticas e financeiras vivenciadas em passado recente¹³. Exemplo de uma destas iniciativas é a divulgação, em 1929, do manifesto a *Concepção Científica de Mundo – O Círculo de Viena* (*Die wissenschaftliche Weltanschauung des Wiener Kreises*, no original em alemão)¹⁴.

É neste contexto que, em 1932, Thirring realiza a preleção *Die Wandlung des Begriffssystems der Physik*, transformada em capítulo de livro, com colaboração editorial de Menger, em 1933: *Krise und Neuaufbau in den exakten Wissenschaften* (Crise e Reconstrução nas Ciências Exatas)¹⁵. O livro também contou com capítulos de Hans Hahn – *Die Krise der Anschauung* (A crise da intuição), Hermann Mark - *Die Erschütterung der klassischen Physik durch das Experiment* (O abalo na física clássica através do experimento), Georg Nöbeling – *Die vierte Dimension und der krumme Raum* (A quarta dimensão e o espaço curvo) e Mark Menger – *Die neue Logik* (A nova lógica). Como é possível perceber pelos

¹³ Para mais informações sobre o contexto sócio-político de Viena no pós-guerra e o impacto na Universidade de Viena, Cf. Janik; Toulmin, 1991; Jungnickel; McCormmach, 1986; Velloso, 2025.

¹⁴ Para acesso à tradução para o português do Manifesto, Cf. Hahn; Neurath; Carnap, 1986.

¹⁵ Apesar de não haver tradução para o português, há uma versão em espanhol, organizada pela Universidad Nacional de La Plata (Argentina), de 1936, a saber, *Crisis y reconstrucción de las ciencias exactas*.

títulos das preleções, havia uma clara apreensão de como as alterações no cerne das ciências naturais exatas, em especial na física e na matemática, impactaram ontologicamente, epistemologicamente e metodologicamente o conhecimento científico, bem como as concepções filosóficas que as fundamentam; como, por exemplo, a questão da intuição, da noção de objetividade, inteligibilidade, visuabilidade etc.

Teoria Quântica: entre os sucessos experimentais e a insuficiência conceitual

Feita a breve exposição do contexto em que Thirring apresenta seu trabalho aqui traduzido, voltemos ao conteúdo do artigo em si. Apesar dos bons resultados obtidos pela teoria quântica e dos desenvolvimentos técnicos e tecnológicos possibilitados por ela, para o catedrático vienense ainda precisava ser construído algo que ele considerava fundamental: um sistema conceitual (*Begriffssystem*) que atribuísse significado às ideias quânticas. Sobre esta noção, Thirring oferece-nos uma definição:

[...] sistema de conceitos usados na física teórica, como força, impulso, velocidade, temperatura, entropia, intensidade de campo, superfície de onda, índice de refração, indução, etc. Somente com a ajuda desses conceitos somos capazes de descrever fenômenos físicos de forma precisa; eles são o vocabulário da linguagem científica do físico e são tão indispensáveis quanto as palavras comuns da nossa linguagem cotidiana para descrever qualquer fato da vida diária.¹⁶

Pela citação anterior, é possível perceber como Thirring concebe a estrutura conceitual da física: como uma espécie de conjunto linguístico, palavras que, apesar de estranhas para leigos, são utilizadas com naturalidade na comunidade física, por possuírem uma compreensão comum. Em uma outra metáfora, igualmente explicativa e ilustrativa, Thirring compara a física clássica com uma árvore, sendo seus galhos as diferentes áreas (mecânica, termodinâmica, óptica, eletromagnetismo, etc). Até mesmo a Teoria da Relatividade Geral, por mais “estranha” e de difícil compreensão que parecesse nos anos iniciais de sua formulação e apresentação, foi sendo, paulatinamente, aceita pela

¹⁶ Cf. Thirring, 1933, p. 16

comunidade, de maneira que de “estranha” tornou-se mais um galho desta árvore, sendo, inclusive, considerada parte da física clássica, algo que não era comum nos anos iniciais de sua formulação. Já a mecânica quântica, mesmo com todas as tentativas de incorporá-la a esta árvore chamada física clássica, cresceu como uma segunda planta, muito distinta da primeira, acarretando, inclusive, no questionamento se ela ainda seria, ou não, uma árvore. Esta noção de sistema conceitual tem como um de seus aspectos o caráter arbitrário e contingente das relações que construímos entre os diferentes conceitos físicos. Apesar de Thirring ser um realista com relação à existência dos fenômenos e de uma natureza independente de nós, com relação ao conteúdo teórico, i. e., os conceitos, o vienense afirma que estes são criações mentais nossas, logo, também constituídos de elementos subjetivos e antropomórficos. Vale afirmar que a física do início do século XX – seja aquela influenciada por Planck, ou por Ernst Mach e, posteriormente, pelo positivismo lógico –, buscava justamente o oposto desta afirmação de Thirring: a eliminação de qualquer elemento subjetivo, antropomórfico e, conseqüentemente, metafísico¹⁷. Ao contrário de muitos de seus homólogos, o físico vienense via não apenas como “natural” a existência de elementos não epistêmicos e contingentes nos conceitos físicos, como também considerava primordial a existência de uma base metafísica, a fim de fundamentar e relacionar os mais diferentes conceitos. No entanto, esta era uma tarefa da física teórica e da filosofia; à física experimental cabia a identificação, medição e averiguação dos fenômenos¹⁸.

Seja em Niels Bohr (1885-1962), Werner Heisenberg (1901-1976), Paul Dirac (1902-1984) ou até mesmo em seu amigo Schrödinger, Thirring identificava em todos esses nomes o mesmo problema: a dificuldade em construir um sistema conceitual para a então recente teoria quântica. Apesar de considerar que Heisenberg e Schrödinger foram fundamentais na compreensão de determinados fenômenos quânticos (como a

¹⁷ Cf. Planck, 1908; Mach, 1894.

¹⁸ Cf. Thirring, 1933, p. 17-18.

radiação emitida e absorvida por elétrons) que pareciam incompreensíveis, tal acepção teve como custo uma matematização ainda maior da física, tornando-a cada vez mais abstrata, de difícil de compreensível inclusive por seus próprios pares e cada vez mais distante daquele “*vocabulário da linguagem científica*” da física clássica.

Para o catedrático vienense, esta nova física que surge (muito matematizada, abstrata e de difícil compreensão), teria capacidade para ditar os rumos das agendas de pesquisas das gerações futuras. E suas deficiências com relação à ausência de um sistema conceitual que relacione os diferentes fenômenos quânticos, assim como uma compreensão da natureza da matéria, seriam, provavelmente, omitidas, ou escamoteadas, em razão do poderoso aparato matemático construído e sua capacidade descritiva e prescritiva.

Em suma, caso não fosse possível conceber um novo sistema conceitual abrangente para a física, Thirring era pessimista no que diz respeito ao futuro da sua ciência.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao prof. Dr. Silvio Seno Chibeni (CLE/Unicamp) pela revisão da tradução e comentários, que em muito contribuíram para melhorar o presente artigo. Velloso agradece o apoio financeiro da FAPESP, através da concessão de bolsa de pesquisa de pós-doutorado (nº 2025/08972-9). Videira agradece os apoios financeiros garantidos por uma bolsa de pesquisa do CNPq (nº 303507/2022-5) e uma bolsa do Programa Prociência (UERJ).

Referências Bibliográficas

- BALSAS, Álvaro; VIDEIRA, A. LUCIANO L. Truth by fiat: the Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics. *Revista Brasileira de História da Ciência*, v. 6, n. 2. Rio de Janeiro: 2013, p. 248-266.
- BELLER, Mara. *Quantum dialogue: the making of a revolution*. Chicago & Londres: University of Chicago Press, 1999.
- CASSIRER, E. *Determinism and indeterminism in Modern Physics*. New Haven: Yale University Press, 1956.
- CHEVALLEY, Catherine. Anschaulichkeit. In: CASSIN, B.; REDALL, S.; APTER, E. S. (org.). *Dictionary of untranslatables: a philosophical lexicon*. Princeton: Princeton University Press, 2004, p. 37.

- CUSHING, J. T. *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*. Chicago: University of Chicago Press, 1994.
- ECKERT, Michael. *Die Atomphysiker – Eine Geschichte der Theoretischen Physik am Beispiel der Sommerfeldschule*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 1993.
- FLAMM, Ludwig. Hans Thirring zum seinem 70. Geburtstag am 23. März 1958. *Acta Physica Austriaca*, vol. 12, nº 1, pp. 1-8.
- FORMAN, P. et al. *Weimar culture and quantum mechanics*. Selected papers by Paul Forman and contemporary perspectives on the Forman thesis. London: Hackensack, NJ: Imperial College Press; World Scientific, 2011.
- FRAGOZO, Fernando; VIDEIRA, A. A. P. Max Planck e a relevância metafísica do realismo para a ciência natural. *Revista Portuguesa de Filosofia*, v. 68, n. 1/2, 2012, p. 51-72.
- HALPERN, Otto; THIRRING, Hans. *The elements of the new quantum mechanics*. Londres: Methuen & CO. LTD., 1932.
- KOJEVNIKOV, Alexei. *The Copenhagen Network: The Birth of Quantum Mechanics from a Postdoctoral Perspective*. Cham. Springer, 2020.
- MACH, Ernst. *Die Mechanik in Ihrer Entwicklung*. Leipzig: F. A. Brockhaus, 1897.
- MEHRA, Jagdish; RECHENBERG, Helmut. *The Historical Development of Quantum Theory – Volume 5 Erwin Schrödinger and the rise of wave mechanics: Part 1 Schrödinger in Vienna and Zürich 1887-1925*. New York/Berlin/Heidelberg, 1987, pp. 248-255.
- PFISTER, H. On the history of the so-called Lense-Thirring effect. *Gen Relativ Gravit* 39, 2007, p. 1735–1748. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0521-4>. Acessado em: 15/06/2021.
- PLANCK, Max [1908]. Die Einheit des physikalischen Weltbildes. In: PLANCK, Max. *Wege zur physikalischen Erkenntnis*. Leipzig: S. Hirzel, 1944.
- ROQUE, Tatiana; Videira, A. A. P. A noção de modelo na virada do século xix para o século xx. *Scientiae Studia*, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 281-304, 2013.
- SCHNÄDELBACH, Hebert. *Filosofia en Alemania, 1831-1933*. Madri: Catedra Teorema, 1991.
- THIRRING, Hans. *Die Grundgedanken der neueren Quantentheorie*. Berlim: Springer, 1928.
- THIRRING, Hans. Die Wandlung des Begriffssystemes der Physik. In: *Krise und Neuaufbau in den exakten Wissenschaften*. Viena: Franz-Deuticke, 1933, p. 15-40.
- THIRRING, Walter. *The Great of Discovery – Great Encounters along the Way*. Singapore: World Scientific Press, 2008.
- VELLOSO, Rafael; VIDEIRA, A. A. P. Feyerabend como enciclopedista: as relações entre física e filosofia nos verbetes sobre Boltzmann, Planck, Heisenberg e Schrödinger. In: SIMÕES, Eduardo (org.). *Filosofia dos Físicos*, volume 1. São Paulo: Livraria da Física, 2024, p. 187 - 210.
- VELLOSO, Rafael; VIDEIRA, Antonio Augusto Passos. *Feyerabend e a Mecânica Quântica*. Teccogs: Revista Digital de Tecnologias Cognitivas, V. 27, P. 251-268, 2025.
- VELLOSO, Rafael. Niels Bohr e as lições filosóficas da Teoria Quântica: Princípios de Correspondência e Complementaridade. *Perspectivas*, v. 7, n. 2, 2022, p. 188-217.
- VELLOSO, Rafael. *Uma Filosofia Natural a partir da Física: a proposta de cientistas-filósofos vienenses de Mach a Feyerabend*. 2025. 195f. Tese (Doutorado em Filosofia) - Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

VIDEIRA, A. A. P; VELLOSO, Rafael. *Formalismo Matemático e Representação Física*. São Paulo: Associação Filosófica Scientiae Studia, 2022.

VIDEIRA, A. A. P. *A Inevitabilidade da Filosofia na Ciência Natural do Século 19: o Caso da Física Teórica*. Ijuí: Editora Unijuí, 2013.

VIDEIRA, A. A. P. Boltzmann, física teórica e representação. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 3, 2006, p. 269-280.

VIDEIRA, A. A. P. Metafísica, Físicos, Valores: Um ensaio sobre a crise dos fundamentos das ciências naturais na passagem do século XIX para o século XX. *Ensaio Filosóficos*, v. 4, 2011.

ZIMMEL, Brigitte; Kerber, Gabriele (Hrgs.). *Hans Thirring: Ein Leben für Physik und Frieden*. Wien/Köln/Weimar: Böhlau, 1992.

A Transformação do Sistema Conceitual da Física (1933)

Hans Thirring

As últimas décadas de pesquisa física trouxeram à tona uma abundância de novos fatos, em parte inesperados, sobre os quais o senhor [Herman] Mark falou na primeira palestra deste ciclo. Hoje, queremos nos ocupar com a questão de quais mudanças no sistema conceitual da física foram necessárias para levar em conta os novos fatos observados. No entanto, diante da extensão desse tema, devemos nos limitar a um relato bastante incompleto; o que posso oferecer aqui é, na melhor das hipóteses, o que um habilidoso caricaturista faz: com alguns traços, desenhar os aspectos mais marcantes da área em questão, embora os detalhes mais sutis tenham que ser deixados de lado.

Primeiro, algumas palavras sobre o significado do *sistema conceitual* na física: entendemos por isso o sistema de conceitos usados na física teórica, como força, impulso, velocidade, temperatura, entropia, intensidade de campo, superfície de onda, índice de refração, indução, etc. Somente com a ajuda desses conceitos somos capazes de descrever fenômenos físicos de forma precisa; eles são o vocabulário da linguagem científica do físico e são tão indispensáveis quanto as palavras comuns da nossa linguagem cotidiana para descrever qualquer fato da vida diária.

O conteúdo da teoria da natureza consiste em afirmações sobre relações entre os diversos conceitos. Assim, por exemplo, podemos formular a lei fundamental da mecânica de Galileu e Newton da seguinte forma: o produto da massa pela aceleração de um corpo é igual à força que atua sobre ele. O princípio da energia na mecânica é expresso da seguinte forma: a soma da energia cinética e da energia potencial é constante, etc. O que chamamos de lei natural são, portanto, certas afirmações sobre as relações que existem entre os diversos conceitos físicos. O físico deve escolher essas afirmações de tal forma que descreva os fenômenos físicos da maneira mais precisa, correta e simples possível; no entanto, não há regras pré-estabelecidas sobre a escolha dos conceitos utilizados. Ele pode criá-los conforme sua própria vontade e, dependendo de como os conceitos e as leis físicas formuladas com sua ajuda se mostram úteis, as leis naturais gradualmente tornam-se parte do patrimônio seguro da física ou desaparecem da literatura com o tempo.

Dessa arbitrariedade na escolha do sistema conceitual surge uma circunstância notável, que deveríamos ter em mente com mais frequência do que realmente fazemos: a física, que lida com os fenômenos da natureza inanimada, com as interações de força, matéria, radiação, etc., é, em relação ao seu objeto de estudo, uma espécie de ciência universal. Sob as mesmas condições externas, qualquer processo físico deve ocorrer da mesma forma não apenas na América e na Europa, mas também nos objetos mais distantes e semelhantes no espaço, assim como ocorre na Terra. Essa universalidade, esse alcance cósmico, refere-se apenas ao *acontecimento natural* em si, ou seja, ao *objeto* da ciência física. A física como um *edifício teórico*, por outro lado, é uma ciência profundamente humana, com características antropomórficas, que pode parecer completamente diferente em outras partes do mundo. Se, portanto, houver outros planetas habitáveis no espaço, o que é bastante provável, dada a existência de cerca de 10^{23} estrelas no universo, e se neles houver seres com um desenvolvimento mental semelhante ao dos humanos, é provável que cada uma dessas colônias mundiais tenha desenvolvido sua própria física, cujos conceitos diferem muito dos nossos, tanto que não consigamos nem mesmo imaginá-los. Pois os

conceitos fundamentais com os quais a ciência natural opera são incutidos em nós desde a infância e estão tão enraizados em nossa vida mental que nunca conseguimos nos emancipar completamente deles, embora, é claro, em ramificações mais sutis do sistema conceitual, longe do tronco original, possam surgir repetidamente novos conceitos. Um edifício físico construído por seres não terrestres poderia, no entanto, ser estruturado de maneira completamente diferente desde os fundamentos, em comparação com o nosso.

Por esse motivo, também não é totalmente correto imaginar que a atividade do físico consista em explorar as leis da natureza, de maneira similar a como um geógrafo explora regiões desconhecidas. A diferença está no fato de que as regiões inexploradas, digamos da Antártida, existem de forma fixa e acabada, independentemente da humanidade, e – exceto por mudanças climáticas – têm uma natureza específica e dada que deve se revelar de forma inequívoca ao pesquisador, assim que ele conseguir alcançá-las. As leis da natureza, por outro lado, não são dadas de forma fixa e acabada desde o início, mas são criadas pelo próprio físico. O que é dado de forma inequívoca pela natureza em si é o *curso dos fenômenos*. O físico experimental realiza um trabalho de pesquisa pura ao estudar o curso de certos processos físicos sob condições experimentais específicas. O teórico, por outro lado, que deve descobrir as leis dos processos, realiza um trabalho que ocupa uma posição intermediária entre a pesquisa pura e outra atividade que poderia ser comparada à invenção, à poesia ou à composição. Por um lado, ele exercita sua imaginação ao formular hipóteses sobre o mecanismo interno dos processos, que não é diretamente acessível à nossa observação (pense, por exemplo, no modelo atômico de Bohr). Por outro lado, ele cria ou inventa os conceitos com os quais a descrição dos processos naturais é realizada; em outras palavras: ele cunha o vocabulário para as leis da natureza. Para dar um exemplo, menciono que, nos tempos de Faraday e Maxwell, além dos conceitos facilmente compreensíveis de intensidade de campo elétrico e magnético, foram introduzidos conceitos mais abstratos, como deslocamento elétrico, indução magnética, tensões de Maxwell, etc., que se tornaram ferramentas muito necessárias para os físicos de hoje, pois

são justamente esses conceitos sobre os quais as equações diferenciais de Maxwell do campo eletromagnético fazem afirmações - sem eles, estaríamos em grande dificuldade para descrever os fenômenos eletromagnéticos. Digo explicitamente *nós*, pois na física dos habitantes de um planeta de Sirius, esses conceitos poderiam nem mesmo existir.

A física teórica é, portanto, um produto do espírito humano, e [é], até certo ponto, um produto do acaso, de maneira semelhante à forma como todo o mundo dos seres vivos em nosso planeta é um produto do acaso. Pois o sistema conceitual da física teórica, como Mach sempre enfatizou, surgiu através de uma espécie de seleção natural, da escolha do melhor. São adotados pela ciência os conceitos que se mostram úteis, enquanto os demais são descartados e, com o tempo, caem no esquecimento. No entanto, não é certo que a seleção sempre acerte o alvo em cada caso. É possível que tenhamos passado por boas ideias sem perceber e, por outro lado, pode acontecer que alguns conceitos sejam mantidos apenas por hábito, como móveis em uma casa que não são mais úteis. No geral, porém, pode-se dizer que os cientistas têm um bom instinto e que, a longo prazo, apenas os conceitos e teorias que realmente se mostram adequados para descrever a natureza permanecem.

De qualquer forma – seja com uma boa ou má seleção – o sistema conceitual está constantemente em fluxo e em desenvolvimento. Nossos conhecimentos crescentes sobre os fenômenos naturais exigem a introdução de novos conceitos no serviço da teoria. Naturalmente, observa-se uma tendência à abstração progressiva; com o aumento da complexidade da teoria, os conceitos se tornam cada vez mais abstratos e menos intuitivos.

Nos primórdios da física teórica, nos tempos de Galileu e Newton, operava-se principalmente com conceitos que surgiam da intuição direta e da percepção sensorial. Menção apenas os conceitos de velocidade, aceleração, inércia, força, massa, peso, energia, trabalho, temperatura, etc. Esses são conceitos aos quais até os não físicos podem atribuir um significado imediato. Com o refinamento crescente dos métodos matemáticos da física, mostrou-se útil introduzir mais conceitos que surgem dos conceitos elementares

originais por meio de operações matemáticas, ou seja, que são produtos de um processo de abstração. Na tabela a seguir, estão reunidos alguns exemplos escolhidos aleatoriamente de conceitos físicos das três áreas da mecânica, eletricidade e calor, com os conceitos elementares básicos no topo, enquanto os conceitos derivados por abstração adicional estão listados abaixo. Mesmo o leigo provavelmente conseguirá associar uma ideia clara aos conceitos acima da linha, enquanto os conceitos abaixo da linha certamente serão palavras vazias, sem conteúdo representável, para muitas pessoas altamente educadas, mas leigas em física.

Mecânica	Eletricidade	Calor
Velocidade	Carga	Temperatura
Massa	Intensidade de campo	Quantidade de calor
Força	Tensão	Calor específico
Densidade	Corrente	Volume específico
Energia	Resistência	Pressão
Momento de inércia	Indutância mútua	Politrópico
Tensor de tensão	Operador de resistência	Adiabático
Função de Lagrange	Potencial vetorial	Coeficiente termodinâmico
Função de Hamilton	Vetor de radiação	Entropia
Integral de ação	Tensões de Maxwell	Energia livre
Variáveis canônicas	Impulso de campo	Potenciais de matéria

Essa ramificação e sublimação do sistema conceitual por meio de abstrações progressivas não tem, em si, nada a ver com a crise da qual estamos falando. É um processo que ocorre na física exatamente como em outras ciências. Na matemática, em outros ramos das ciências naturais, na biologia e também nas ciências humanas, como filosofia,

direito, sociologia, o sistema conceitual se expande e se refina de maneira semelhante.

Cada uma dessas ciências pode ser comparada a uma pequena árvore da qual constantemente brota novos ramos e galhos, tornando-se cada vez mais ramificada à medida que cresce. O murchar de alguns galhos também encontra seu análogo na ciência, onde conceitos e hipóteses reconhecidos como inúteis são descartados e caem no esquecimento. O crescimento orgânico do sistema conceitual de uma ciência é um processo completamente normal, que ocorre constantemente, mesmo em tempos não críticos. A peculiaridade no desenvolvimento da física nas últimas décadas, no entanto, reside no fato de que nossa pequena árvore de repente assume formas bastante bizarras, que o crescimento orgânico não continua mais na linha anterior, mas segue caminhos bastante estranhos.

O início desse novo desenvolvimento, no que diz respeito ao lado experimental da física, ocorreu na década de 1890. Como o senhor Mark já observou na última palestra, por volta de 1895, acreditava-se que a física estava essencialmente completa e que, nessa área, basicamente apenas detalhes seriam aprendidos, mas dificilmente algo fundamentalmente novo. Como acontece frequentemente na vida, as coisas aconteceram de forma completamente diferente do que se esperava; justamente no momento em que se pensava que o romance teria chegado a um final feliz, surgiram novas complicações e situações emocionantes, das quais ainda não vemos uma saída.

A hora decisiva da física chegou em 1895, quando C. W. Röntgen, em Würzburg, fez a memorável descoberta de que a radiação secundária excitada por raios catódicos era capaz de penetrar corpos opacos e fazer brilhar uma tela fluorescente colocada atrás deles. O que essa descoberta significou para a medicina não precisa ser dito. Para a física, não foi tanto a descoberta de Röntgen em si que foi decisiva, mas o impulso que deu à pesquisa física posterior, um impulso que inaugurou uma nova era nessa ciência. A descoberta de Röntgen despertou o interesse dos físicos por substâncias que causam fluorescência. O físico francês [Antoine] Becquerel, em Paris, descobriu que sais de urânio

emitem espontaneamente uma radiação que causa fluorescência, e, seguindo os experimentos de Becquerel, o casal [Pierre e Marie] Curie conseguiu descobrir as maravilhas do rádio em 1898. O desenvolvimento posterior deve-se principalmente aos pesquisadores ingleses, especialmente [Ernest] Rutherford. Rutherford e [Frederick] Soddy foram responsáveis pela descoberta do decaimento atômico; Rutherford, por meio de experimentos com raios radioativos, chegou à concepção de seu modelo nuclear do átomo, sobre o qual [Niels] Bohr, aplicando a hipótese quântica de [Max] Planck ao modelo nuclear de Rutherford, começou a decifrar com sucesso os espectros. Enquanto isso, a descoberta de [Max von] Laue das interferências de raios-X trouxe novos dados empíricos, os *espectros de raios-X*, que, como mostrou [Arnold] Sommerfeld, se encaixavam perfeitamente na imagem das leis espectrais concebida por Bohr, e a partir daquela época, por volta de 1913, começou a inundação de novos conhecimentos, especulações, teorias e investigações experimentais relacionadas à chamada *teoria quântica*, que desde então mantém os físicos e, em parte, os químicos, constantemente ocupados. Paralelamente a esse desenvolvimento, ocorreu o da *teoria da relatividade*, que começou em 1905 e foi levada a um certo ponto de conclusão por seu criador, [Albert] Einstein, com a formulação da teoria geral da relatividade, já 10 anos depois. No geral, pode-se dizer que o período de 1895 até hoje foi extremamente fértil para os físicos, assim como para os químicos e técnicos, repleto de surpresas e emoções, e que ainda não podemos prever quando essa era de novas descobertas surpreendentes chegará ao fim.

Podemos classificar os novos conhecimentos obtidos nesse período de pesquisa nas últimas três a quatro décadas, independentemente da área específica da física, em três categorias, de acordo com o grau de seu caráter revolucionário. Aqui, surge uma circunstância notável: justamente aqueles dos novos fatos descobertos que são mais evidentes e também claramente contradizem os dogmas da chamada física clássica são, em termos puramente *conceituais*, os menos revolucionários; na verdade, eles revelam-se bastante inofensivos sob uma análise mais detalhada. A teoria da relatividade especial e

geral, que muitas vezes é vista pelo leigo surpreso como o ápice do absurdo e da ousadia intelectual, ocupa uma posição intermediária nesse aspecto, enquanto alguns fenômenos que parecem completamente insignificantes e estão no limite da possibilidade de observação na física quântica causaram uma revolução completa em nosso sistema conceitual e levaram a física teórica a um beco sem saída, onde ela ainda se encontra, sem que as mentes mais brilhantes de nossa ciência saibam como sair dela.

Como exemplo dos novos conhecimentos da primeira categoria, consideramos as lições altamente interessantes que obtivemos do estudo dos fenômenos radioativos. Os resultados obtidos nessa área abalaram e levaram ao absurdo um dos dogmas fundamentais da física e da química, no qual acreditava-se tão firmemente até a virada do século que qualquer um que ousasse duvidar dele seria ridicularizado. Esse dogma diz: os elementos químicos são substâncias uniformes com pesos atômicos definidos; a transformação mútua de elementos uns nos outros é, em princípio, impossível. Como sabemos hoje, ambas as partes dessas leis estão erradas. Ou seja, 1. uma transformação mútua de elementos uns nos outros é possível; hoje conhecemos, além das três séries de transformações radioativas, uma série de outras transformações de elementos que podem ser produzidas artificialmente, e 2. não é verdade que todos os elementos sejam substâncias uniformes; a maioria deles são, na verdade, *misturas de isótopos*, compostas de componentes com pesos atômicos diferentes, mas com o mesmo número de carga nuclear. Assim, um dos dogmas fundamentais da química do século XIX é categoricamente refutado por nossas novas percepções, como uma notícia falsa é corrigida por uma retificação factual de acordo com a lei da imprensa.

No entanto, os novos conhecimentos sobre isótopos e a transformação de elementos estão, em termos puramente conceituais, entre os resultados mais inofensivos que a física das últimas décadas nos trouxe. Eles trazem um enriquecimento do nosso conhecimento sem afetar drasticamente o nosso pensamento. Pois, no fundo, eles nos ensinam apenas que os átomos dos elementos não são os blocos de construção últimos e

indivisíveis da matéria, o que já poderia ser previsto a partir dos resultados da teoria dos íons. Os resultados da pesquisa sobre isótopos até simplificam significativamente nossa visão de mundo sobre a estrutura da matéria, ao possibilitar a representação de que todos os corpos materiais são, em última análise, compostos dos dois blocos de construção fundamentais, o elétron e o próton. Os novos conhecimentos sobre isótopos e a transformação de elementos são, portanto, mais agradáveis do que perturbadores. Se eles fossem os únicos resultados das últimas décadas de pesquisa física, poderíamos falar apenas de uma era de crescente esclarecimento e evolução, mas não de uma crise. Por essa razão, o senhor Mark, em sua palestra, com toda a razão, não incluiu esses resultados, por mais interessantes que sejam, entre os fatos experimentais que causaram um abalo na física clássica.

A situação já parece um pouco mais séria com a teoria da relatividade, que se baseia no resultado negativo do experimento de [Albert] Michelson, discutido na primeira palestra, e que, até certo ponto, também teve um efeito revolucionário em termos *conceituais*. No âmbito desta palestra, não podemos dedicar mais do que um quarto de hora à teoria da relatividade, portanto, é completamente impossível apresentar aqui, mesmo que de forma resumida, o esqueleto conceitual dessa teoria. O que nos interessa, no contexto de nossas considerações, é apenas a pergunta: "Como a teoria da relatividade influenciou o sistema conceitual da física?"

Muitos de vocês provavelmente sabem que as reflexões de Einstein levaram, em primeiro lugar, a uma revisão dos conceitos de espaço e tempo. [Hermann] Minkowski resumiu os resultados relacionados na seguinte tese: "O espaço por si só e o tempo por si só perderam sua independência conceitual; apenas uma união de espaço e tempo, que chamaremos de 'mundo', possui significado absoluto e independente".

Essa breve afirmação será completamente incompreensível para muitos de vocês. Antes de tentar esclarecer o significado dessa frase, gostaria de colocá-la em uma forma que seja, ao menos, imediatamente *compreensível* para os matemáticos. Formulado

analiticamente, a versão de Minkowski da teoria da relatividade especial é a seguinte: já na física clássica, as leis da natureza tinham que ser formuladas de tal forma que as equações permanecessem invariantes em relação a uma rotação do sistema de coordenadas, ou seja, em relação a uma transformação linear ortogonal das três coordenadas espaciais entre si. A teoria da relatividade exige agora o seguinte: se, além das três coordenadas espaciais x_1, x_2, x_3 , introduzirmos uma quarta coordenada $x_4 = ict$, as leis físicas devem ser tais que permaneçam invariantes em relação ao grupo de transformações lineares ortogonais de todas essas quatro coordenadas x_1, x_2, x_3, x_4 . Então, tanto o princípio da relatividade quanto o princípio da constância da velocidade da luz são satisfeitos. Essa é, em duas frases, a essência da teoria da relatividade especial, no que diz respeito ao conceito de espaço-tempo. No entanto, apenas em uma forma compreensível para os matemáticos. Como, então, explicar isso para o leigo não matemático? Vou tentar, mas peço desde já desculpas se a tentativa falhar.

Começamos com uma consideração simples, que ainda está completamente no terreno clássico, não relativístico. Na Figura 1, há uma linha horizontal e, acima dela, dois pontos A e B, separados por uma distância de 6 cm. Agora, fazemos as seguintes duas afirmações:

1. B está mais alto que A.
2. A distância entre A e B é de 6 cm.

Agora, vamos refletir sobre qual dessas duas afirmações tem o caráter de uma afirmação absoluta ou relativa. A afirmação 1, de que B está mais alto que A, é válida enquanto a linha contínua na figura realmente representa uma horizontal. No entanto, ela pode se tornar falsa se inclinarmos a figura ou - mesmo mantendo a figura completamente horizontal - se decidirmos referir os termos "mais alto" ou "mais baixo" não ao horizonte do nosso próprio local, mas ao horizonte de um lugar localizado em outro ponto da superfície da Terra. Suponha, por exemplo, que a linha tracejada seja paralela ao horizonte de um lugar localizado em algum lugar da Ásia, ao qual queremos referir nossa afirmação. Então, a afirmação 1 teria que ser invertida: "A está mais alto que B".

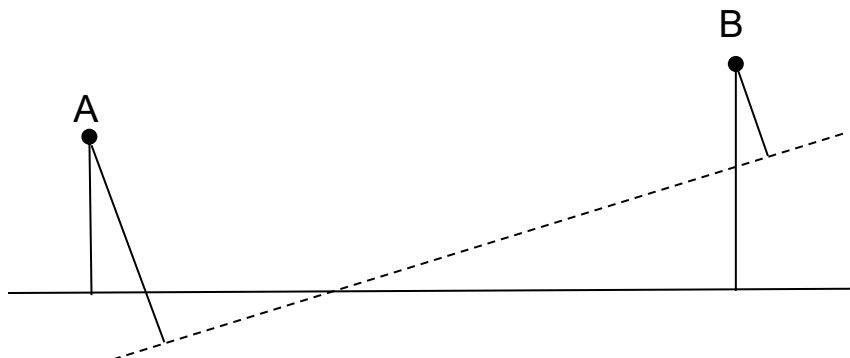


Fig. 1. Relatividade dos conceitos de distância horizontal e vertical.

A afirmação 1 é, portanto, relativa. Ela só é válida em um determinado sistema de referência. Por outro lado, a afirmação 2 é absoluta, uma afirmação invariante, que é válida em todos os sistemas de referência. Podemos expressar essa situação com as ferramentas da geometria analítica elementar, como as que aprendemos no ensino médio, da seguinte forma: fixamos a posição dos dois pontos indicando suas coordenadas retangulares, uma vez em relação a um sistema cujo eixo-x está no plano horizontal do nosso próprio local e, em seguida, em relação a um sistema de coordenadas $x' y'$, cujo eixo-x é paralelo ao plano horizontal do lugar distante mencionado. Então, valem as relações:

$$x_2 - x_1 \neq x'_2 - x'_1 \quad r^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 = \quad (1)$$

$$y_2 - y_1 \neq y'_2 - y'_1 \quad r^2 = (x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2,$$

que, em palavras, expressam o seguinte: a distância horizontal e vertical entre A e B são diferentes nos dois sistemas de referência, mas a distância medida em linha reta entre A e B deve ser independente do sistema de referência e sempre ter o mesmo valor r . Na matemática, isso é expresso da seguinte forma: as diferenças nas coordenadas não são invariantes em relação a uma rotação do sistema de coordenadas, mas a forma quadrática $(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 = r^2$ é um *invariante*. Isso vale para o caso bidimensional considerado aqui; no espaço tridimensional, as invariantes são formadas por uma expressão correspondente de três termos.

Ou, em outras palavras: os conceitos de distância horizontal e vertical não têm significado absoluto e independente; afirmações sobre eles só têm validade relativa, ou seja,

em relação a um determinado sistema de referência. Por outro lado, uma afirmação sobre a distância espacial entre dois pontos tem significado absoluto, independente do sistema de referência.

Essas são, como dissemos, considerações da geometria puramente clássica. Agora, passamos às afirmações análogas da teoria da relatividade especial. Como as equações da teoria da relatividade, como se pode ver pela substituição de Minkowski $x_4 = ict$, sempre incluem a velocidade da luz c , que tem o valor enorme de $3 \cdot 10^{10}$ cm/s, precisamos de mais espaço para nosso exemplo, de modo que operamos imediatamente com dimensões cósmicas. Imaginamos, portanto, observadores distribuídos em várias estrelas do espaço, onde, para abreviar, usaremos o nome da própria estrela fixa para o planeta habitável que eventualmente exista lá. Agora, imaginamos que em algum lugar do espaço ocorra um evento espacial e temporalmente bem definido, um chamado evento pontual. Por exemplo: hoje à noite, às 21 horas e 35 1/2 minutos, ocorre de repente uma erupção do Vesúvio, que chamaremos de evento A. Imagine ainda: 24 horas depois, explode um depósito de pólvora em um planeta de Sirius, que será o evento B. Em relação a esses dois eventos, a partir do ponto de vista da concepção de espaço-tempo pré-relativística, faríamos as seguintes afirmações: a distância espacial entre os locais dos dois eventos têm um valor definido, ou seja, a distância entre Sirius e a Terra é de $8,21 \cdot 10^{18}$ cm, e o intervalo de tempo entre os dois eventos foi $t = 24$ horas, não importa como se olhe para o assunto. Se o evento B ocorreu "mais acima" no espaço do que A, ou "mais abaixo", isso dependeria de como se define um plano horizontal no espaço e qual lado dele é considerado como acima e abaixo. Mas que A ocorreu antes de B e que o intervalo de tempo exato entre os dois eventos foi de 24 horas era, na concepção pré-relativística, uma afirmação de significado absoluto, assim como a afirmação de que a distância espacial $r = 8,21 \cdot 10^{18}$ cm. Ambas as afirmações são completamente independentes do sistema de referência escolhido.

Agora, o teórico da relatividade diz: com licença, meu senhor, aqui você está afirmando um pouco demais. Sua afirmação é independente da *posição* do sistema de

referência, mas não do seu *estado de movimento*. Para simplificar, vamos supor que Sirius e o Sol não tenham um movimento relativo significativo entre si. Então, os observadores em Sirius e na Terra certamente concordarão que o evento B ocorreu 24 horas depois de A.

No entanto, imagine ainda que as duas explosões A e B também tenham sido observadas de uma terceira estrela, digamos, de Procyon, da qual, para os propósitos de nossa consideração, vamos supor por um momento que ela esteja em um movimento relativo rápido em relação a Sirius e ao nosso sistema solar. De acordo com a teoria da relatividade, com base em cálculos que não posso apresentar aqui, ocorreria o seguinte: mesmo que o observador em Procyon leve em conta corretamente o tempo que os raios de luz levam para chegar de Sirius e da Terra até ele, ele obteria para o intervalo de tempo entre os eventos A e B um valor t' que não é de 24 horas; na verdade, se Procyon estivesse se movendo muito rapidamente, poderia até acontecer que, de acordo com seus cálculos, o evento B tenha ocorrido *antes* de A. E para a distância espacial entre os dois eventos, o observador em Procyon encontraria um valor r' que difere significativamente de $8,21 \cdot 10^{18}$ cm. E um terceiro observador, em Betelgeuse, obteria para a distância espacial e temporal entre os dois eventos valores completamente diferentes, digamos r'' e t'' . Parece, portanto, que há uma grande confusão, mas a teoria da relatividade ensina que, em relação a um ponto, haverá pleno acordo entre todos esses três observadores e qualquer número de outros que façam medições corretas. Pois, se formarmos a expressão

$$s^2 = r^2 - c^2 t^2 \quad (2)$$

então valerá:

$$r^2 - c^2 t^2 = r'^2 - c^2 t'^2 = r''^2 - c^2 t''^2 = \dots \quad (3)$$

Aqui, c novamente representa a velocidade da luz: $c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s.

Lembre-se de que, como explicado acima, mesmo no âmbito da geometria não relativística, certas expressões, como as próprias diferenças de coordenadas, ou seja, as distâncias horizontal e vertical, tinham valores que dependiam da posição do sistema de referência, enquanto a distância espacial em si era uma invariante em relação a rotações do

sistema de referência. De maneira análoga, de acordo com a teoria da relatividade especial, a distância espacial e temporal entre dois eventos dependerá não da *posição*, mas do *estado de movimento* do sistema de referência; apenas a expressão s^2 , composta de uma maneira específica a partir do intervalo espacial e temporal, é um invariante. Esse é, portanto, o significado da afirmação de Minkowski: "*O espaço e o tempo por si só perderam sua independência; apenas a união entre os dois, que chamamos de 'mundo', mantém um significado absoluto e independente.*"

Para evitar mal-entendidos, que são frequentemente cometidos, é importante enfatizar que, na teoria da relatividade especial, o conceito de tempo perde sua independência absoluta, mas o tempo não entra na união espaço-tempo da mesma forma que as três dimensões espaciais. Isso pode ser visto na fórmula $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$. O tempo perde sua independência absoluta, mas continua a desempenhar um papel especial, enquanto nenhuma das três dimensões espaciais é privilegiada em relação às outras.

A teoria da relatividade especial expandiu, portanto, o sistema conceitual da física teórica com o conceito de "mundo", que está acima dos conceitos de espaço e tempo. A teoria da relatividade geral forneceu, além disso, os seguintes conhecimentos: a essência da gravidade consiste em causar uma *curvatura* dessa variedade espaço-tempo quadridimensional, o "mundo". E a curvatura é tanto maior quanto mais forte for o campo gravitacional; a uma distância infinita de todas as massas, a curvatura seria infinitamente pequena. Vocês provavelmente sabem que Einstein encontrou muita resistência com essa concepção. Objeções foram levantadas de que a ideia de um espaço curvo e, mais ainda, de um tempo curvo, é absurda, que a teoria é internamente inconsistente, etc. Não tenho tempo aqui para entrar em debates sobre esse ponto e explicar em detalhes o que se entende concretamente pela curvatura do "mundo". Posso me poupar no tratamento dessa questão aqui, pois vocês aprenderão mais sobre isso na quarta palestra deste ciclo.

Gostaria apenas de caracterizar brevemente a posição da física teórica em relação a essa crítica: os físicos teóricos mais influentes do mundo, como todos os estudiosos,

discordam em muitos pontos e discutem suas diferenças de opinião com mais ou menos paixão. No entanto, entre todos aqueles que estudaram a teoria suficientemente a fundo, não há dúvida sobre a admissibilidade e a justificação lógica das representações da teoria da relatividade. Na verdade, muitos físicos já há algum tempo sustentam a opinião: “A teoria da relatividade é, na verdade, correta demais para ser interessante”. Portanto, quando o crítico da teoria da relatividade, geralmente de outra área, vem e diz: “Bem, professor, sua ciência se aventurou em um terreno bastante escorregadio e filosoficamente muito questionável com a teoria da relatividade”, só podemos responder: “Caro colega - eu gostaria de não ter outras preocupações!” Falaremos sobre essas preocupações maiores dos físicos em breve; gostaria apenas de concluir o capítulo sobre a teoria da relatividade com a seguinte observação:

Embora os fenômenos da natureza sejam dados de forma inequívoca, sua descrição pela física pode, como mencionado no início, variar de maneira fundamentalmente diferente. A teoria da relatividade, por exemplo, opera no tratamento do problema planetário com conceitos que eram completamente estranhos à teoria newtoniana, como curvatura do mundo, tensor de curvatura, linha geodésica no R_4 , etc. Logo, o conceito de gravidade nem precisa aparecer, ele é absorvido no conceito de curvatura do mundo. Nesse contexto, é importante mencionar que [Heinrich] Hertz já havia tentado, há quatro décadas, eliminar o conceito de força da mecânica, que, em última análise, é supérfluo.

Na teoria da relatividade, portanto, um novo sistema conceitual foi aplicado, que se ramifica diretamente do tronco daquela pequena árvore mencionada anteriormente, bem próximo da raiz. Não estamos lidando com uma nova ramificação em um galho existente, mas com um galho completamente novo, diretamente ligado ao tronco.

Apesar disso, a revolução na física causada pela teoria da relatividade, vista em retrospecto, ocorreu de forma bastante inofensiva. Einstein, digamos, derrubou uma asa do edifício da física clássica, mas também a reconstruiu cuidadosamente, pedra por pedra, apenas no estilo moderno da objetividade, e não deixou um monte de escombros

nesta área. O conceito de um mundo curvo pode, de fato, causar certas dificuldades ao senso comum, muitas vezes mal utilizado, mas isso se deve apenas à falta de intuitibilidade. A teoria da relatividade especial e geral é, no entanto, para todos que realmente a entendem, um edifício logicamente bem fundamentado, que, além de aproximar melhor a experiência, é pelo menos equivalente à mecânica e à teoria da gravitação de Newton, um edifício teórico completo em si mesmo. O entendimento de que o espaço cósmico é curvo é, de uma forma mais sublime e abstrata, apenas do mesmo tipo do entendimento que surgiu para a humanidade há séculos, de que a superfície da Terra é esférica. Essa última representação também foi combatida como absurda pelos contemporâneos; pense apenas no fato de que o “senso comum” da época argumentou que nossos antípodas teriam o sangue subindo à cabeça se ficassem constantemente de cabeça para baixo.

Em conclusão, talvez possamos dizer: aquela parte da crise causada pelo resultado negativo do experimento de Michelson parece ter sido completamente superada pela teoria da relatividade; nessa área, a reconstrução parece já estar concluída.

Agora, passamos para a terceira categoria de revoluções na física e entramos em um terreno realmente escorregadio. Sempre há uma sensação de desconforto quando se fala sobre essas coisas para não físicos. Muitos autores acham, não sem razão, que esse campo controverso ainda não deveria ser popularizado hoje. [Arthur S.] Eddington diz em uma de suas excelentes obras “Diante do edifício da teoria quântica, deveria ser colocada uma placa de aviso: Fechado para reforma e renovação completa, a entrada é estritamente proibida para não autorizados”.

Apesar dessa proibição de Eddington, gostaria de lhes possibilitar uma breve olhada no canteiro de obras da teoria quântica, que está em um estado um tanto caótico, pois o pior que pode acontecer é que vocês saiam tão confusos quanto antes, o que os colocaria em uma situação semelhante à dos próprios físicos. Essa é, na verdade, a diferença entre a teoria da relatividade e a teoria quântica: a teoria da relatividade parece terrivelmente difícil para os não iniciados, mas pode ser compreendida pelos

especialistas, pelo menos em princípio, sem grandes dificuldades. A teoria quântica, por outro lado, permanece um mistério impenetrável até para seus criadores.

A dificuldade reside, em poucas palavras, no fato de que até hoje não foi possível encontrar o sistema conceitual adequado para tratar os fenômenos quânticos. Os conceitos, emprestados da física macroscópica, simplesmente não permitem uma transferência para os processos atômicos em si, que são o objeto da teoria quântica. A física quântica lida, como se sabe, com os processos de interação entre radiação e átomos individuais: os processos de emissão de radiação, ou seja, a formação de espectros, bem como a absorção de radiação, a dispersão, a difração, o efeito Compton, sobre o qual o senhor Mark falou na última palestra - todos esses processos elementares de interação entre radiação e matéria pertencem ao domínio da física quântica.

É claro desde o início que, para descrever os átomos e seus processos, certos conceitos físicos parecem deslocados e, portanto, tornam-se sem sentido. Por exemplo, afirmações do tipo: “O átomo de hidrogênio é verde, tem uma temperatura de 500° e possui um coeficiente de elasticidade de tantas unidades absolutas” seriam completamente sem sentido. É claro que os conceitos emprestados da física macroscópica, que por sua própria natureza sempre se referem a um coletivo de átomos, não podem ser aplicados ao indivíduo isolado. Não se pode, por exemplo, falar da taxa de mortalidade de um único indivíduo. Por outro lado, há, naturalmente, conceitos físicos dos quais se poderia esperar que fossem aplicados sem problemas aos átomos, pois aparentemente não há razão para que percam seu significado em dimensões atômicas. Menciono, como exemplo, apenas o conceito de velocidade. Podemos medir a velocidade de estrelas fixas e planetas, assim como a velocidade de um dirigível, de uma bala de rifle, de uma partícula de poeira solar e de uma partícula visível apenas no ultramicroscópio. Parece, portanto, que não há razão para não podermos falar da velocidade de um elétron. De fato, medimos indiretamente a velocidade dos elétrons em um feixe de raios catódicos e podemos medi-la com tanta precisão que foi possível verificar a variação de massa em altas velocidades, conforme

exigido pela teoria da relatividade. Portanto, parece perfeitamente lógico que, em princípio, deveria ser permitido falar da velocidade orbital de um elétron no átomo de hidrogênio.

Outro caso em que também não era evidente desde o início por que a aplicação dos conceitos relevantes em dimensões atômicas seria inadmissível é a geração de um campo de ondas eletromagnéticas por uma carga elétrica em movimento. Se movimentarmos uma carga elétrica suficientemente rápido ao longo de uma linha vertical para cima e para baixo, ela gerará um campo de ondas eletromagnéticas, que pode ser calculado com grande precisão. Esse processo corresponde essencialmente ao que ocorre na antena vertical de um transmissor de rádio. Deveríamos esperar o seguinte: se eu diminuir a carga e o período de oscilação, o campo de ondas ficará mais fraco e o comprimento de onda mais curto, naturalmente. As relações mudariam, portanto, *quantitativamente* de maneira correspondente. No entanto, *qualitativamente*, não haveria diferença, pois as leis fundamentais da eletrodinâmica não fazem suposições sobre a escala de grandeza dos processos.

Agora, há, de fato, fenômenos que levaram a crer, por um tempo, que as leis de Maxwell sobre a ação de um campo de ondas sobre uma carga e sobre a geração de um campo de ondas por uma carga oscilante poderiam ser aplicadas sem problemas ao átomo individual e forneceriam o resultado correto. Entre esses fenômenos estão, por exemplo, o fenômeno da dispersão normal e o efeito Zeeman normal. Em relação a certos fenômenos, tudo parecia, portanto, estar de acordo e se comportar exatamente como a eletrodinâmica clássica exige; ocorre a “interação clássica” mencionada na primeira palestra.

No final do século passado, no entanto, como foi detalhado na primeira palestra, as medições da distribuição de energia no espectro de radiação térmica de um corpo negro mostraram certas discrepâncias entre a observação e a teoria. Para explicar essas discrepâncias aparentemente insignificantes, Max Planck concebeu em 1900 aquela ideia

revolucionária e genial, que tinha uma abrangência que nem mesmo seu criador havia previsto e que estava destinada a inaugurar uma nova era na física. A *hipótese quântica*, formulada por Planck em 1900, dizia o seguinte: um átomo que emite radiação não pode liberar uma quantidade arbitrariamente pequena de energia, mas apenas quantidades que são múltiplos inteiros de um quantum mínimo, que é proporcional à frequência da radiação. Se designarmos a frequência (número de oscilações por segundo) por ν , e a energia liberada por E , então, de acordo com Planck,

$$E = n \cdot h \cdot \nu \quad (4)$$

onde n é um número inteiro e h é uma constante universal (a constante de Planck), cujo valor é:

$$h = 6,55 \cdot 10^{27} \text{ erg.seg}$$

A ideia de que a radiação não pode ser arbitrariamente fraca, ou seja, que tem uma estrutura descontínua, atômica, era completamente estranha à teoria clássica.

Mais tarde, percebeu-se também que há casos em que não apenas pequenas discrepâncias entre a teoria clássica e a experiência ocorrem, mas em que a coisa toda simplesmente não funciona. Menciono apenas como exemplo que, de acordo com a teoria de Bohr sobre os espectros de hidrogênio, que foi confirmada nos mínimos detalhes pela experiência, o elétron do átomo de hidrogênio orbita nas chamadas “órbitas estacionárias” sem emitir radiação, ou seja, sem gerar um campo de ondas, o que está insolúvelmente em contradição com as leis fundamentais da eletrodinâmica.

Além disso, há os experimentos mencionados pelo senhor Mark em sua palestra, que revelam a misteriosa natureza dual da luz, de modo que os raios às vezes têm caráter de onda e às vezes de partícula. A partir de todos os fenômenos de interferência e polarização da luz, acreditava-se há muito tempo que os raios de luz eram *ondas* e, mais especificamente, ondas eletromagnéticas. Portanto, se um átomo emite luz, de acordo com as representações da teoria ondulatória, ondas esféricas deveriam se espalhar concentricamente a partir do átomo, de modo que o campo de ondas se tornasse cada vez mais fraco à medida que se afastasse; a energia deve, de fato, diminuir com o quadrado da distância.

No entanto, há experiências que parecem necessariamente levar à conclusão de que, no ato de absorção, toda a energia emitida pelo átomo, que se imaginava espalhada sobre a superfície de uma esfera ao redor do átomo, de repente *aparece localizada em um único ponto do campo*. Isso ocorre mesmo que o átomo emissor esteja, por exemplo, em uma estrela a muitos milhares de anos-luz de distância. Em resumo, os experimentos em questão ocorrem exatamente como se os raios de luz fossem minúsculas partículas de dimensões atômicas, emitidas em linha reta da fonte de luz em uma direção específica. No entanto, com essa última representação, não podemos explicar o fenômeno da interferência. Os físicos se viram, portanto, na situação embaraçosa de ter que admitir que os raios de luz, que acreditavam ter compreendido completamente por mais de cem anos, hoje são tão misteriosos quanto animais míticos, como os centauros: metade cavalo, metade humano.

A situação tornou-se ainda mais complicada, mas, também, mais interessante, quando os experimentos de Germer e Davisson, inspirados por uma ideia genial de [Louis] de Broglie, mostraram que, inversamente, os raios de partículas também possuem caráter ondulatório. Esses experimentos, originalmente realizados na América, foram posteriormente repetidos na Inglaterra e na Alemanha; entre as mais belas imagens relacionadas estão as reproduzidas na Fig. 6, p. 13, de Mark e Wierl¹⁹ [figura que é reproduzida a seguir, mas que não é disponibilizada no original].

¹⁹ Na versão digital, a figura 6 encontra-se na página 747. Mark, H. und Wierl, L. (1930) Atomformfaktorbestimmung mit Elektronen. Zeitschrift für Physik, 60, 741-753.

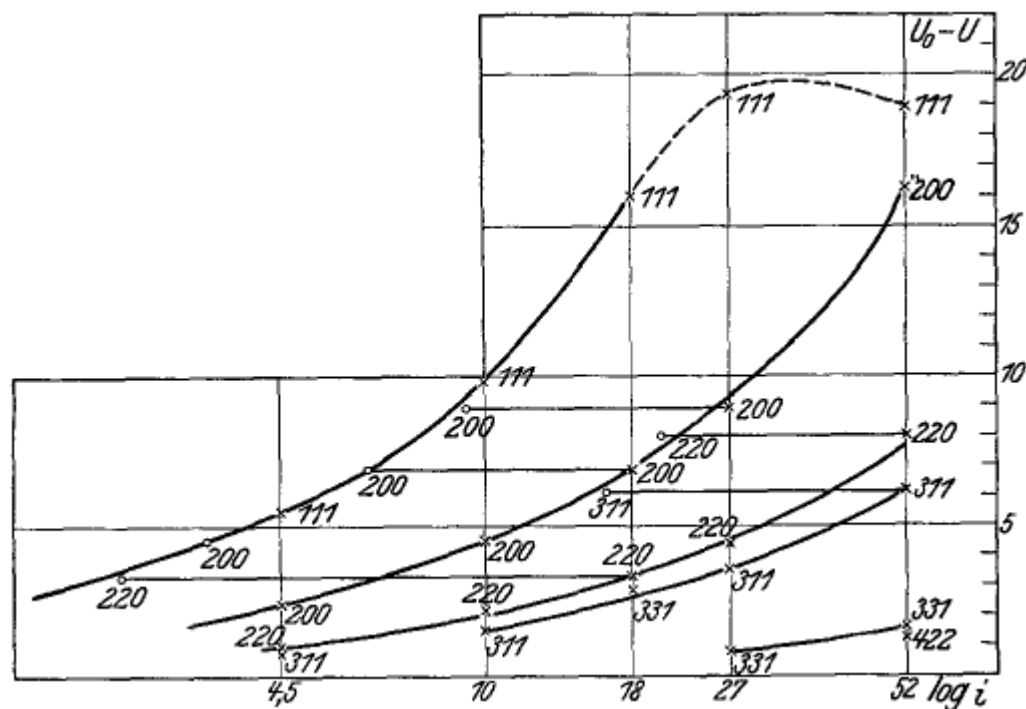


Fig. 6: Diagrama de densidade de intensidade. Abscissa: logaritmo das leituras do eletrômetro; ordenada: leitura do fotômetro para o fundo (U_0) menos a leitura no máximo.

O resultado desses experimentos é extremamente surpreendente, pois os raios catódicos sempre foram considerados como raios puramente corpusculares, algo *fundamentalmente diferente* dos raios de ondas, em oposição à luz - da mesma forma que a chuva é fundamentalmente diferente do som produzido pelas gotas de chuva batendo. A descoberta da difração de elétrons, que, sem dúvida, é a descoberta física mais importante das últimas décadas, mostra agora que essa diferença fundamental entre as ondas elementares nem sempre existe, mas pode, sob certas circunstâncias, ser obscurecida em ambas as direções.

Diante desse conjunto de fatos, o sistema conceitual da física clássica falha, assim como o da eletrodinâmica relativística (menciono de passagem que, entre os físicos teóricos, hoje em dia, a teoria da relatividade já é frequentemente incluída na física clássica. A grande divisão entre “clássico” e “não clássico” está hoje além da teoria da relatividade, no limiar da física quântica). Os conceitos clássicos, portanto, falharam e esgotaram-se, e

era hora de uma reforma do sistema conceitual. Tal reforma foi iniciada em 1925, simultaneamente e independentemente, por dois físicos geniais, [Werner] Heisenberg e [Erwin] Schrödinger. Dos pensamentos da teoria de Heisenberg, queremos apenas conhecer um teorema fundamental que é relativamente acessível ao entendimento geral e que é conhecido como a “relação de incerteza de Heisenberg”. Falamos anteriormente sobre o fato de que mesmo os minúsculos elétrons, invisíveis a olho nu, podem ter sua velocidade medida com uma precisão relativamente alta. Poderíamos imaginar, em princípio, que, com o refinamento progressivo dos instrumentos ópticos (com uma espécie de “ultra-ultra-microscópio”), seria possível tornar visíveis elétrons individuais, determinar sua posição e, portanto, medir suas coordenadas espaciais. A relação de incerteza de Heisenberg afirma o seguinte: mesmo que conseguíssemos realizar tais medições, seria *fundamentalmente impossível medir simultaneamente a posição e a velocidade* de um elétron (ou de um próton ou de qualquer outra partícula elementar) com precisão arbitrária. Quanto mais precisamente medimos sua velocidade, menos precisa será a determinação da posição, e vice-versa. Em fórmulas, essa situação é expressa da seguinte forma: seja x uma coordenada do elétron, ou seja, sua distância medida em uma direção específica a partir de um ponto de partida escolhido arbitrariamente. Seja ainda v sua componente de velocidade na mesma direção e m sua massa. O produto $m v$ é conhecido como a *quantidade de movimento* ou o *momento* da partícula. Vamos designar por Δx e Δmv , respectivamente, o erro cometido na medição da coordenada e do momento, ou seja, a diferença entre o valor real e o valor medido. Então, de acordo com Heisenberg, vale a relação:

$$\Delta x \cdot \Delta mv \geq h, \quad (5)$$

onde h é a constante de Planck, já mencionada várias vezes. Resolvendo a equação (5) para Δx e Δmv , obtemos

$$\Delta x \geq \frac{h}{\Delta mv} \quad \Delta mv \geq \frac{h}{\Delta x} \quad (6)$$

da qual conclui-se que, de fato, a imprecisão na determinação do momento (ou seja, da velocidade) aumenta à medida que o erro na determinação da posição diminui, e vice-versa.

As raízes dessa relação peculiar estão, por um lado, na estrutura atômica da radiação, já conhecida por Planck, e, por outro, no efeito Compton, que revelou a *ação de impacto* da radiação sobre os elétrons. O agente físico com o qual realizamos medições mais precisas de posição e velocidade é a luz ou radiações ainda mais curtas, como ultravioleta, raios-X ou raios gama. Como as ondas eletromagnéticas, de acordo com Planck, só podem ocorrer em múltiplos inteiros de um quantum mínimo $h\nu$, a radiação tem, de certa forma, uma estrutura atômica, granular, de modo que uma tentativa de refinar cada vez mais as medições esbarra em um limite intransponível imposto por essa granularidade, semelhante ao tamanho do grão de uma placa fotográfica, que impõe um limite final para a ampliação utilizável de uma fotografia. Que isso leve exatamente à relação de incerteza de Heisenberg dada pela fórmula (5) pode ser explicado da seguinte forma: de acordo com Planck, a energia de um único quantum de radiação é $h\nu$. Einstein acrescentou posteriormente a importante percepção de que o momento (a “força de impacto”) de cada quantum de radiação é dado por $\frac{h\nu}{c}$, onde c é a velocidade da luz. Como o *efeito* Compton mostra, quando um quantum de radiação atinge um elétron, ocorre de fato uma transferência de momento, ou seja, o elétron sofre um recuo, e seu momento muda por uma quantidade Δmv , que é proporcional a $\frac{h\nu}{c}$, ou seja, aumenta quanto maior for a frequência ν ou menor for o comprimento de onda da radiação em questão. Dessa forma, conclui-se que a posição e o momento (velocidade) de um elétron nunca podem ser medidos simultaneamente com precisão arbitrária. Se quisermos determinar sua *posição* com muita precisão, ou seja, medir sua coordenada x com o menor erro possível Δx , devemos usar uma radiação de comprimento de onda *o mais curto* possível, pois o erro na determinação da posição é limitado inferiormente pelo tamanho do comprimento de onda. No entanto,

ao observar com radiação de comprimento de onda muito curto, o próprio processo de observação altera a velocidade do elétron, introduzindo um erro na medição do momento, e, de acordo com a fórmula de Einstein mencionada, esse erro é tanto maior quanto menor for o comprimento de onda da radiação. Se, por outro lado, quisermos medir a velocidade com a maior precisão possível, devemos usar radiação de comprimento de onda o maior possível, para não distorcer o resultado da medição por um impacto Compton, o que, por sua vez, torna a determinação da posição correspondentemente menos precisa.

A partir da fórmula de Heisenberg (5), percebe-se que a estrutura atômica da radiação afeta a precisão das medições realizadas com qualquer tipo de radiação de uma maneira mais complexa do que a estrutura atômica da matéria afeta a medição de comprimentos de corpos. O fato de que os corpos materiais são compostos de átomos, cujo diâmetro está na ordem de cerca de 10^{-8} cm, simplesmente significa que o comprimento de um corpo, por exemplo, de uma régua de precisão, nunca pode ser determinado com uma precisão maior do que um décimo de milionésimo de milímetro, mesmo com um refinamento ilimitado de nossos métodos de medição. A estrutura atômica da matéria estabelece, portanto, um *limite inferior absoluto* para o erro de medição em medições de comprimento de corpos materiais. A relação de incerteza de Heisenberg (5), que se baseia na natureza quântica da radiação, é, no entanto, menos radical; ela permite, em princípio, qualquer precisão para a determinação da posição e da velocidade *individualmente*, ou seja, erros de medição arbitrariamente pequenos, mas nega a possibilidade de uma determinação simultaneamente completamente precisa da posição e da velocidade.

Além da relação de incerteza aqui explicada, Heisenberg desenvolveu em 1925 uma teoria matemática extremamente interessante, a chamada *mecânica quântica*, com a qual é possível, em princípio, calcular comprimentos de onda, estados de polarização e intensidades das linhas espectrais a partir das supostas propriedades do átomo emissor da radiação. A mecânica quântica de Heisenberg parte do princípio completamente

adequado e óbvio de que a teoria deve conter apenas relações entre quantidades que podem, em princípio, ser observadas, como o comprimento de onda da radiação, etc., enquanto quantidades “semi-metafísicas”, como as coordenadas e velocidades dos elétrons individuais, cuja medição nunca pode ser realizada na prática, não devem entrar na teoria. Infelizmente, a teoria de Heisenberg impõe exigências enormes à capacidade de compreensão do estudante, de modo que não podemos nos aprofundar nela aqui. Preferimos nos limitar a algumas indicações sobre a *mecânica ondulatória* de Schrödinger, o que podemos fazer com mais facilidade, pois, apesar de seus pontos de partida completamente diferentes, as duas teorias de Heisenberg e Schrödinger concordam plenamente em termos dos resultados físicos concretos.

Schrödinger, um filho de Viena do qual todos podemos nos orgulhar, encontrou em 1925 [sic], por meio de uma intuição incrivelmente genial, sua famosa *equação de onda*, que há seis anos domina quase soberanamente o campo da teoria quântica. A equação de Schrödinger é a equação diferencial para as ondas de de Broglie mencionadas anteriormente; sua aplicação levou a sucessos e novas ideias inesperados, mas o objetivo que realmente importante, ou seja, o esclarecimento conceitual do enigma quântico, ainda está longe de ser alcançado. Na verdade, parece que estamos mais longe do objetivo do que nunca. A equação de Schrödinger é uma *fórmula mágica* típica; calcula-se com ela e, se soubermos como tratá-la corretamente, obtemos resultados que concordam com a experiência, mas não a entendemos. Vou tentar indicar, o mais brevemente possível, o que é fundamentalmente incompreensível e misterioso na teoria de Schrödinger. Em primeiro lugar, falta nas ondas de Schrödinger ou de de Broglie o sujeito para o predicado “oscilar”. Nas ondas sonoras, sabemos que as partículas de ar oscilam, ou seja, realizam movimentos de vai e vem. Nas ondas eletromagnéticas, havia sido introduzido originalmente um éter hipotético, cuja única função era servir como sujeito para o verbo *oscilar*. Posteriormente, tornou-se mais objetivo e percebeu-se que não era necessário um algo concreto e oscilante como o éter, mas que as ondas eletromagnéticas podiam ser muito

bem representadas como oscilações, ou seja, mudanças periódicas de *intensidade do campo* elétrico e magnético. Nas ondas de de Broglie, no entanto, não se encontra, curiosamente, nem mesmo um sujeito *abstrato* adequado. Schrödinger havia tentado uma interpretação das ondas que parecia bastante plausível em certo sentido, mas continha certas contradições internas, de modo que atualmente é rejeitada pela maioria dos físicos. Pior talvez do que a questão não resolvida do sujeito das oscilações é o fato de que as ondas que aparecem como soluções das equações de Schrödinger não são oscilações no sentido físico real, ou seja, processos que variam periodicamente no espaço e no tempo. Elas não ocorrem no espaço tridimensional do mundo real, mas no chamado *espaço de configuração* do sistema, ou seja, em um espaço fictício, imaginário, que tem três vezes mais dimensões do que o número de partículas em interação no sistema considerado. No caso de um único átomo de urânio, isso já seria um espaço de cerca de 280 dimensões, e para sistemas com vários átomos, um espaço com um número ainda maior de dimensões.

A equação de Schrödinger foi ainda ampliada e generalizada nos últimos anos por uma teoria do talentoso físico inglês [Paul] Dirac. Dirac conseguiu colocar a equação de Schrödinger em uma forma relativisticamente invariante, o que mostrou, surpreendentemente, que o “spin do elétron”, introduzido em 1924 por [George] Uhlenbeck e [Samuel] Goudsmit como uma hipótese ousada, ou seja, a rotação intrínseca do elétron em torno de seu próprio eixo, segue necessariamente da equação de onda. A teoria do spin do elétron, muito bem confirmada pela experiência, não seria mais, portanto, uma suposição adicional introduzida ad hoc como antes, mas faria parte integrante das leis fundamentais da teoria geral. Isso é, sem dúvida, um sucesso significativo da teoria de Dirac. Uma outra consequência notável dessa teoria é que, de acordo com suas fórmulas, ocasionalmente seria de se esperar uma inversão espontânea da carga das partículas elementares, de modo que, por exemplo, teríamos que lidar com elétrons positivos e prótons negativos. Agora, parece que certas observações feitas nos últimos meses no laboratório de [Robert] Millikan em *Pasadena* e, independentemente, no laboratório de Rutherford em

Cambridge, indicam que, além dos elétrons negativos, também existem elétrons positivos. Embora essa descoberta ainda não esteja definitivamente confirmada, parece que aqui, de maneira altamente notável, uma teórica completamente inacreditável de início foi posteriormente confirmada pelo experimento.

Além desse sucesso, que data apenas do período mais recente, o estado atual da física é caracterizado pelo fato de que a teoria quântica atingiu um certo ponto morto e que as tentativas iniciadas nos últimos três ou quatro anos de colocá-la em movimento novamente permaneceram sem resultados. A nova formação de conceitos iniciada por Heisenberg, por um lado, e por de Broglie, Schrödinger e Dirac, por outro, ainda não se mostrou suficiente para fornecer uma descrição satisfatória em todos os aspectos do funcionamento das forças elementares e atômicas da natureza. No entanto, já foram alcançados progressos significativos em nosso conhecimento nesse estágio de desenvolvimento; a aplicação da fórmula mágica de Schrödinger realmente proporcionou novas ideias importantes, permitiu prever novos fatos experimentais. Menciono apenas de passagem que, com a ajuda da equação de Schrödinger, o problema da molécula de hidrogênio H_2 , que havia apresentado dificuldades consideráveis para a antiga teoria de Bohr, pôde ser tratado com sucesso, e que, a partir de considerações sobre a simetria das soluções, chegou-se à conclusão de que deve haver dois tipos diferentes de moléculas de hidrogênio, denominadas para-hidrogênio e orto-hidrogênio. Essa diferença foi posteriormente verificada experimentalmente por [Karl-Friedrich] Bonhoeffer e [Paul] Harteck. Além disso, com base na teoria de Schrödinger, agora começamos a compreender gradualmente a natureza das chamadas valências homopolares; foram feitos progressos no campo da mecânica estatística, obtiveram-se esclarecimentos sobre o mecanismo da condução elétrica em metais, etc. Em resumo, a fórmula mágica mostrou-se um guia excelente e já está sendo frutífera, mesmo antes de termos aprendido a entender seu significado corretamente.

No entanto, é certo que, no campo da física quântica, o sistema conceitual

adequado ainda não foi encontrado. As transformações até agora não foram suficientes - caberá à imaginação e à perspicácia dos teóricos futuros encontrar os conceitos com os quais se possa descrever de forma consistente o funcionamento das forças elementares e atômicas da natureza.

Literatura

A. Apresentações abrangentes com interpretação filosófica:

BAWINK, B. Ergebnisse und Probleme der Naturwissenschaften, 5. Aufl., Leipzig, S. Hirzel, 1933 (628 S.).

BOHR, N. Atomtheorie und Naturbeschreibung. Vier Aufsätze mit einer einleitenden Übersicht, Berlin, Julius Springer, 1931.

EDDINGTON, A. S. Das Weltbild der Physik und ein Versuch seiner philosophischen Deutung. Deutsch v. M. Rausch v. Trautenberg u. H. Diesselhorst, Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1931 (VIII + 356 S.).

FEIGL, H. Theorie und Erfahrung in der Physik (Wissen und Wirken, Bd. 58), Karlsruhe, G. Braun, 1921 (242 S.).

PLANCK, M. Wege zur physikalischen Erkenntnis, Reden und Vorträge, Leipzig, S. Hirzel, 1933 (X + 280 S.).

REICHENBACH, H. Atom u. Kosmos, Berlin D. Buchgemein., 1930 (322 S.).

RUSSELL, B. Philosophie der Materie. Deutsch von K. Grelling (Sammlung, Wissenschaft und Hypothese“, Bd. 32), Verlag B. G. Teubner, Berlin und Leipzig, 1929 (XI + 433 S.).

B. Teoria da Relatividade:

BLOCH, W. Einführung in die Relativitätstheorie (Aus Natur und Geisteswelt, Bd. 618), Berlin und Leipzig, B. G. Teubner, 1918.

BOREL, E. Zeit und Raum von Euklid bis Einstein, Stuttgart, Frankh.-sche Verlagshandlung, 1932.

BORN, M. Die Relativitätstheorie Einsteins und ihre physikalischen Grundlagen. 3. Aufl., Berlin, Julius Springer, 1922.

EDDINGTON, A. S. Raum, Zeit und Schwere, Ein Umriss der allgemeinen Relativitätstheorie, Deutsch von W. Gordon, Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1923 (Samml. Wissenschaft, Bd. 70).

EINSTEIN, A. Über d. spezielle u. allgem. Relativitätstheorie (Sammlg. Vieweg, Heft 38), 11. Aufl., Braunschweig, Friedr. Vieweg & Sohn, 1921.

HOPF, L. Die Relativitätstheorie (Samml. Verständliche Wissenschaft, Bd. 14), Berlin, Julius Springer, 1931.

SCHLICK, M. Raum u. Zeitl. d. gegenw. Physik, 4. Aufl., Berlin, J. Springer, 1922.

THIRRING, H. Die Idee d. Relativitätstheorie, 2. Aufl., Berlin, J. Springer, 192.

C. Física com ênfase especial em teoria atômica:

BOHR, N. Über d. Bau d. Atome, Nobelvortrag, Berlin, J. Springer, 1922.

BORN, M. Der Aufbau der Materie, Drei Aufsätze über moderne Atomistik u. Elektroentheorie, 2. Aufl., Berlin, J. Springer, 1922 (VI + 86 S.).

BORN, M. Moderne Physik, Sieben Vorträge über Materie und Strahlung. Ausgearbeitet v. F. Sauter, Berlin, J. Springer, 1933 (VII + 272 S.).

BRAGG, Sir W. Was ist Materie? 6 gemeinverständl. Vorträge, gehalten in der Royal Institution, Deutsch von Finkelstein, Leipzig, Akad. Verlagsgesellsch., 1931 (VIII + 191 S.) (Vom Standpkt. d. Experimentalphysik.)

C. G. Darwin, The New Concept of Matter, London, G. Bell & Sons Ltd. 1931.

GERLACH, W. Materie, Elektrizität, Energie, Grundlagen und Ergebnisse der experimentellen Atomforschung, 2. Aufl., Dresden und Leipzig, Theodor Steinkopf, 1926.

HAAS, A. Atomtheorie, Berlin, Walter de Gruyter, 1929.

HAAS, A. Das Naturbild der neuen Physik, 3. Aufl., Berlin, Walter de Gruyter, 1932 (129 S.).

HAAS, A. Die Welt der Atome, Zehn gemeinverständliche Vorträge, Berlin, Walter de Gruyter, 1926.

HAAS, A. Physik für Jedermann (im Erscheinen 1933).

HAAS, A. Quantenchemie, Eine Einleitung in vier Vorträgen, Leipzig, Akadem. Verlagsgesellschaft, 1929.

HALPERN, O.; THIRRING, H. The Elements of the New Quantum Mechanics, London, Methuen & Co. 1932 (Mathemat. Darstilg. f. Fortgeschrittenere).

KRAMERS, H. A.; HOLST, H. Das Atom und die Bohrsche Theorie seines Aufbaus. Gemeinverständlich dargestellt. Deutsch von F. Arndt, Berlin, Julius Springer, 1925.

MARCH, A. Moderne Atomphysik, Eine allgemein verständliche Einführung, Leipzig, J. A. Barth, 1931.

REICHE, F. Die Quantentheorie, ihr Ursprung und ihre Entwicklung, Berlin, Julius Springer, 1921.

RUSSELL, B. ABC der Atome, Deutsch von W. Bloch, Stuttgart, Franckische Verlagsbuchhandlung, 1925.

WEYL, H. Was ist Materie? Berlin, Julius Springer, 1924.

D. Física e Cosmos:

EDDINGTON, A. S. Sterne und Atome, Berlin, Julius Springer, 1928.

JEANS, J. H. Der Weltenraum und seine Rätsel, ebenfalls 1931 (315 S.).

JEANS, J. H. Sterne, Welten und Atome, Deutsch von R. Nutt, Stuttgart-Berlin, Deutsche Verlagsanstalt, 1931 (384 S.).

NERNST, W. Das Weltgebäude im Lichte der neueren Forschung, Berlin, Julius Springer, 1921.

Recebido em: 11-12-2025

Aprovado em: 05-01-2026

Rafael Velloso

Pós-doutorando no Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência na Universidade Estadual de Campinas (CLE/Unicamp).

Antonio Augusto Passos Videira

Professor titular no Instituto de Filosofia e Ciências Humanas na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (IFCH/UERJ) e pesquisador colaborador no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).