



**UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO**
UFRJ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS E DAS
TÉCNICAS E EPISTEMOLOGIA-HCTE**

DANIELLE PONTES DE MENEZES

**UMA HISTÓRIA SOBRE A ESTRUTURA E O COMPORTAMENTO DO ÁTOMO
NO SÉCULO XX EUROPEU: DE KELVIN A DIRAC**

Rio de Janeiro

2020

DANIELLE PONTES DE MENEZES

UMA HISTÓRIA SOBRE A ESTRUTURA E O COMPORTAMENTO DO ÁTOMO NO
SÉCULO XX EUROPEU: DE KELVIN A DIRAC

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Benevenuto Guisard Koehler

Rio de Janeiro

2020

CIP - Catalogação na Publicação

M543h Menezes, Danielle Pontes de
Uma história sobre a estrutura e o comportamento do átomo no século XX europeu: de Kelvin a Dirac / Danielle Pontes de Menezes. -- Rio de Janeiro, 2020. 121 f.

Orientador: Carlos Benevenuto Guisard Koehler.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Decania do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Programa de Pós-Graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia, 2020.

1. Átomo. 2. Teoria quântica. 3. História da ciência. I. Koehler, Carlos Benevenuto Guisard, orient. II. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

DANIELLE PONTES DE MENEZES

UMA HISTÓRIA SOBRE A ESTRUTURA E O COMPORTAMENTO DO ÁTOMO NO
SÉCULO XX EUROPEU: DE KELVIN A DIRAC

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia.

Aprovada em 22 de outubro de 2020.

Carlos Benevenuto Guisard Koehler, D.Sc., HCTE/UFRJ

Tânia de Oliveira Camel, D.Sc., FIOCRUZ

Maria Letícia Galuzzi Nunes, D.Sc., HCTE/UFRJ

Gastão Galvão de Carvalho Souza, D.Sc., UERJ

À minha amada família e à Doce Irmã Maria Angélica.

AGRADECIMENTOS

À minha amada mãe Cristina, parceira de todos os momentos da vida, inspiração e exemplo. Ao meu amado pai Ruy, pela compreensão silenciosa e carinhosa. À minha amada avozinha Iára, pelo carinho e cumplicidade. Ao meu tio Ricardo, por me incentivar a entrar no mestrado.

Aos amados tia Adélia e tio Djalma, por me receberem amorosamente em sua casa.

Aos meus colegas de curso, sempre tão prestativos e também por tornarem o cotidiano acadêmico mais alegre. Aos meus professores por contribuírem fortemente para a minha formação e despertarem em mim o desejo de me tornar uma intelectual. À Professora Letícia Galuzzi, pelos ensinamentos carinhosos. Ao Robson, por toda a prontidão em ajudar.

À Doce Irmã Maria Angélica, pela assistência espiritual, com a qual eu tenho me tornado uma pessoa melhor.

Ao meu querido orientador Carlos Benevenuto Guisard Koehler, por resgatar em mim o ser científico, por todos os elogios, pelo carinho, pelas aulas, por tanto conhecimento transmitido com excelência e pelas inúmeras recomendações de leitura.

Muito obrigada!

“Fé inabalável só o é a que pode encarar frente a frente a razão, em todas as épocas da Humanidade”. (Allan Kardec)

“Mas seja Deus um ente, seja Deus uma força, seja Deus o átomo inicial e o hidrogênio primeiro, tem de ser um Deus de paz”. (André Marinho)

RESUMO

O presente trabalho aborda aspectos da história da física, no que tange ao estudo e à pesquisa feitos por eminentes cientistas, sobre a estrutura e o comportamento do átomo, no século XX europeu. O objetivo anelado consiste em apresentar o caminho percorrido por tais cientistas, de modo a demonstrar as relações científicas e pessoais estabelecidas entre eles. Por caminho percorrido entende-se: a contribuição científica efetiva; a circunstância pessoal dos cientistas; aspectos biográficos; o contexto que influenciou os cientistas; o entrelaçamento estabelecido entre os cientistas, bem como a coleção de afetos envolvendo suas interações. A metodologia utilizada consiste em revisão bibliográfica, tanto de fontes primárias, como de fontes secundárias. A seleção dos cientistas abordados implica naqueles que assinalaram com eloquência o período em que viveram e contribuíram fortemente para o desenvolvimento da teoria atômica, bem como para a compreensão da realidade descrita pela teoria quântica, no nível subatômico.

De um modo geral, os cientistas pilares da teoria atômica e da mecânica quântica possuíam caracteres humanísticos em comum como o sentimento de companheirismo entre os colegas e o espírito agregador e acolhedor dos mais velhos em relação às novas gerações. A teoria atômica e a mecânica quântica foram edificadas com muito trabalho, muito estudo, muita dedicação, mas também com leveza, alegria e amizade.

Palavras-chave: Átomo. Teoria quântica. História da ciência.

ABSTRACT

The present work deals with aspects of the history of physics, with respect to the study and research carried out by eminent scientists, on the structure and behavior of the atom, in the European 20th century. The aim is to present the path taken by such scientists, in order to demonstrate the scientific and personal relationships established between them. The path taken means: the effective scientific contribution; the personal circumstances of scientists; biographical aspects; the context that influenced scientists; the intertwining established between scientists, as well as the collection of affections involving their interactions. The methodology used consists of a bibliographic review, both from primary and secondary sources. The selection of the approached scientists implies those who eloquently marked the period in which they lived and contributed strongly to the development of atomic theory, as well as to the understanding of the reality described by quantum theory, at the subatomic level.

In general, the pillars of atomic theory and quantum mechanics had humanistic characteristics in common, such as the feeling of companionship among colleagues and the aggregating and welcoming spirit of the elderly in relation to the new generations. Atomic theory and quantum mechanics were built with a lot of work, a lot of study, a lot of dedication, but also with lightness, joy and friendship.

Keywords: Atom. Quantum theory. History of science.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - William Thomson ou Lord Kelvin.....	19
FIGURA 2 - J. J. Thomson.....	25
FIGURA 3 - Aparato de vidro usado por J. J. Thomson para determinar o raio e / m dos elétrons.....	27
FIGURA 4 - Ernest Rutherford.....	36
FIGURA 5 - J. J. Thomson e Ernest Rutherford no ano de 1934.....	39
FIGURA 6 - Max Planck.....	44
FIGURA 7 - Albert Einstein.....	54
FIGURA 8 - Os maiores nomes da ciência reunidos no Quinto Congresso de Solvay.....	62
FIGURA 9 - Einstein e Bohr no Quinto Congresso de Solvay.....	63
FIGURA 10 - Niels Bohr e Albert Einstein descansando no Quinto Congresso de Solvay.....	63
FIGURA 11 - Niels Bohr.....	65
FIGURA 12 – Louis De Broglie.....	76
FIGURA 13 – Erwin Schrödinger.....	82
FIGURA 14 - Werner Heisenberg.....	89
FIGURA 15 - Encontro entre Heisenberg e Bohr em 1936.....	98
FIGURA 16 - Paul Dirac.....	102

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO.....	14
2.0 CONTEXTO POLÍTICO-SOCIAL.....	17
3.0 LORD KELVIN E O ÁTOMO DE VÓRTICE.....	19
3.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO.....	19
3.2 O CONTEXTO CIENTÍFICO E FILOSÓFICO DA TEORIA DO ÁTOMO DE VÓRTICE.....	20
3.3 A CONTRIBUIÇÃO DE LORD KELVIN À CIÊNCIA.....	22
3.4 O DESENLACE DA TEORIA DO ÁTOMO DE VÓRTICE.....	23
4.0 J. J. THOMSON: O ÁTOMO É DIVISÍVEL.....	25
4.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO.....	25
4.2 A CONTRIBUIÇÃO DE J. J. THOMSON À CIÊNCIA.....	26
4.3 O LABORATÓRIO CAVENDISH.....	30
5.0 ERNEST RUTHERFORD E O ÁTOMO NUCLEAR.....	36
5.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO.....	36
5.2 O CONTEXTO CIENTÍFICO BRITÂNICO QUE INFLUENCIOU RUTHERFORD.....	37
5.3 O ENTRELACAMENTO RUTHERFORD-THOMSON.....	38
5.4 A CONTRIBUIÇÃO DE RUTHERFORD À CIÊNCIA.....	40
6.0 MAX PLANCK: O CALOR RADIANTE É DESCONTÍNUO.....	44
6.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO.....	44
6.2 O CONTEXTO CIENTÍFICO GERMÂNICO QUE INFLUENCIOU PLANCK.....	45
6.3 A CONTRIBUIÇÃO DE PLANCK À CIÊNCIA.....	46
6.4 O PENSAMENTO FILOSÓFICO EM TORNO DA TEORIA DOS <i>QUANTA</i>	49
6.5 PLANCK COMO REFERÊNCIA DE HOMEM E CIENTISTA.....	52
7.0 ALBERT EINSTEIN E O EFEITO FOTOELÉTRICO.....	54

7.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO.....	54
7.2 PECULIARIDADES DO CAMINHO CIENTÍFICO DE EINSTEIN.....	55
7.3 A CONTRIBUIÇÃO DE EINSTEIN À CIÊNCIA.....	57
7.4 O ENTRELACAMENTO EINSTEIN-CÍRCULO DE COPENHAGE.....	60
8.0 NIELS BOHR E O MODELO ATÔMICO SEMIQUÂNTICO.....	65
8.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO.....	65
8.2 O ENTRELACAMENTO BOHR-RUTHERFORD E BOHR-THOMSON.....	66
8.3 A CONTRIBUIÇÃO DE BOHR À CIÊNCIA.....	68
8.4 O INSTITUTO BOHR.....	72
9.0 LOUIS DE BROGLIE: NATUREZA ONDULATÓRIA DO ELÉTRON.....	76
9.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO.....	76
9.2 A CONTRIBUIÇÃO DE DE BROGLIE À CIÊNCIA.....	77
9.3 O CONTEXTO CIENTÍFICO FRANCÊS QUE INFLUENCIOU DE BROGLIE.....	79
10.0 ERWIN SCHRÖDINGER: A REVOLUCIONÁRIA EQUAÇÃO DA FUNÇÃO DE ONDA Ψ.....	82
10.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO.....	82
10.2 A CONTRIBUIÇÃO DE SCHRÖDINGER À CIÊNCIA.....	83
10.3 A CIRCUNSTÂNCIA PESSOAL DE SCHRÖDINGER.....	85
10.4 O ENTRELACAMENTO SCHRÖDINGER-PLANCK E SCHRÖDINGER-EINSTEIN.....	86
11.0 WERNER HEISENBERG: A INCERTEZA É UMA DAS POUCAS CERTEZAS..	89
11.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO.....	89
11.2 A CONTRIBUIÇÃO DE HEISENBERG À CIÊNCIA.....	90
11.3 O ENTRELACAMENTO HEISENBERG-BOHR.....	92
11.4 O CLUBE DO URÂNIO.....	98

11.5 ALGUNS APONTAMENTOS QUÂNTICOS.....	99
12.0 PAUL DIRAC: TEORIA DA TRANSFORMAÇÃO.....	102
12.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO.....	102
12.2 A PAIXÃO PELA MATEMÁTICA.....	103
12.3 A CONTRIBUIÇÃO DE DIRAC À CIÊNCIA.....	103
12.4 O ENTRELAÇAMENTO DIRAC-CÍRCULO DE COPENHAGE.....	107
12.5 A CIRCUNSTÂNCIA PESSOAL DE DIRAC.....	108
13.0 CONCLUSÕES.....	109
REFERÊNCIAS.....	114
ANEXO.....	120

1 INTRODUÇÃO

Há cerca de 13,5 bilhões de anos, a matéria, a energia, o tempo e o espaço surgiram naquilo que é conhecido como o Big Bang. A história dessas características fundamentais do nosso universo é denominada física. Por volta de 300 mil anos após seu surgimento, a matéria e a energia começaram a se aglutinar em estruturas complexas, chamadas átomos, que então se combinaram em moléculas. A história dos átomos, das moléculas e de suas interações é denominada química. Há cerca de 3,8 bilhões de anos, em um planeta chamado Terra, certas moléculas se combinaram para formar estruturas particularmente grandes e complexas chamadas organismos. A história dos organismos é denominada biologia. Há cerca de 70 mil anos, os organismos pertencentes à espécie *Homo sapiens* começaram a formar estruturas ainda mais elaboradas chamadas culturas. O desenvolvimento subsequente dessas culturas humanas é denominado história. (HARARI, 2017).

Ao longo da história, temos retirado das teorias científicas correntes da época, nossa concepção a respeito de nós mesmos e de nosso lugar no Universo. A ciência modifica a nossa imagem de mundo.

A presente dissertação vai tratar da história das ciências, mais precisamente da ciência denominada física, quando esta se propõe a explicar a matéria, mais precisamente o comportamento e a estrutura do átomo.

Sendo assim, uma recorrente indagação pode surgir: por que estudar história? Harari (2017) justifica o estudo da história afirmando que diferente de física ou economia, a história não é um meio de fazer previsões exatas. Estudamos história não para conhecer o futuro, e sim para ampliar nossos horizontes, entender que nossa situação presente não é natural nem inevitável e que, conseqüentemente, existem mais possibilidades diante de nós do que imaginamos. Por exemplo, estudar como os Europeus dominaram a África nos permite entender que não existe nada de natural ou inevitável na hierarquia racial e que o mundo poderia muito bem ser organizado de outra forma.

Agora, já se pode compreender o porquê de se estudar história. A indagação seguinte seria: como produzir um trabalho científico que aborde a história, mais especificamente a história das ciências, mais especificamente a história da física, quando esta decide que é possível explicar a estrutura e o comportamento da matéria, isto é, o universo atômico e subatômico.

Em Holton (1979), encontramos um roteiro atribuído à ideia de produzir um trabalho científico de excelência, quando a temática abordada é a história das ciências, a saber: quando o historiador da ciência estuda o produto do trabalho científico – um ensaio publicado, uma anotação de laboratório, a transcrição de uma entrevista, uma troca de cartas – está tratando de um evento. Tal evento pode apresentar diferentes vieses, cada qual correspondente a um aspecto diferente, relacionado com o objeto da pesquisa. Entre os diferentes aspectos que constroem um trabalho de história da ciência, pode-se encontrar:

1. O entendimento do conteúdo científico do evento num determinado momento.
2. A trajetória temporal do conhecimento científico.
3. O aspecto pessoal envolvido no evento.
4. O contexto da descoberta.
5. O desenvolvimento psicobiográfico do cientista.
6. O ambiente sociológico e a influência de colegas.

O objetivo anelado pela presente dissertação consiste em apresentar o caminho percorrido por cientistas que se dedicaram a pesquisar o átomo, no século XX europeu, de modo a destacar que a ciência pode se construir a partir de relações profissionais e também pessoais, bem como compartilhamento de conhecimento e intercâmbio de ideias. Por caminho percorrido entende-se: a contribuição científica efetiva; a circunstância pessoal dos cientistas; aspectos biográficos; o contexto histórico que influenciou os cientistas; o entrelaçamento estabelecido entre os cientistas, bem como a coleção de afetos envolvendo suas interações.

Foi estabelecido como premissa a seleção de um conjunto de cientistas que assinalaram com eloquência o período em que viveram e contribuíram fortemente para o desenvolvimento da teoria atômica, bem como para a compreensão da realidade descrita pela teoria quântica, no nível subatômico.

. São eles:

- Lord Kelvin (1824-1907)
- J. J. Thomson (1856-1940)
- Ernest Rutherford (1871-1937)
- Max Planck (1858-1947)
- Albert Einstein (1879-1955)
- Niels Bohr (1885-1962)

- Louis de Broglie (1892-1987)
- Erwin Schrödinger (1887-1961)
- Werner Heisenberg (1901-1976)
- Paul Dirac (1902-1984).

Embora Lord Kelvin tenha desenvolvido o seu trabalho de ciência e pesquisa no século XIX, é de grande importância incluí-lo na seleção de cientistas abordados, visto que o seu estudo permite uma melhor compreensão do pensamento científico na virada para o século XX.

O trabalho foi motivado pelo afã de melhor compreender o pensamento científico e o contexto em que o modelo atômico quântico atual foi elaborado, transbordando em uma nova leitura de mundo. Além disso, acredita-se ser de oportuna utilidade, a produção textual que visa à contribuição para o melhor esclarecimento do mundo atômico e subatômico. O interesse por compreender a constituição da matéria se remonta a priscas eras. Trata-se de uma indagação intrínseca ao ser humano e sobretudo aos cientistas. E por fim, seria possível despertar o interesse e incentivar as gerações futuras a traçarem um caminho científico, tanto pela apuração do gosto pela ciência, como também pela confiança e certeza de que é possível construir um trabalho de pesquisa científica, no Brasil e no Mundo, desde que as condições materiais sejam asseguradas.

Hoje, quase todos os humanos partilham do mesmo sistema científico, quanto à estrutura dos átomos. A sociedade avançou pelas trilhas da ciência. Contudo, nem sempre foi dessa forma. Conforme Harari (2017), somente por volta do fim do século XIX os cientistas se depararam com algumas observações que não se enquadravam muito bem nas leis de Newton, e estas levaram às revoluções seguintes na física – a teoria da relatividade e a mecânica quântica.

Nesse bátrito histórico, a teoria atômica e a proposta de modelos que explicassem o átomo, culminaram no desenvolvimento da teoria quântica. O conhecimento sobre a mecânica quântica ainda não foi completamente dominado pelo *Homo sapiens*, ainda há muito a se investigar sobre esta temática considerada “esquisita”, pelos próprios cientistas. A física quântica é diferente. Sendo a física desse minúsculo micromundo dentro dos átomos, ela descreve o funcionamento interno de tudo o que vemos e ao menos fisicamente somos. Segundo Heisenberg (1958), o melhor caminho para adentrar os problemas da física moderna pode ser através da descrição histórica do desenvolvimento da teoria quântica. É verdade que a teoria quântica é apenas um pequeno segmento da física atômica e, novamente, a física atômica é um pequeno segmento da ciência moderna.

Indubitavelmente, as conquistas da ciência e da tecnologia, assim como o avanço tecnológico proveniente das pesquisas sobre a matéria em nível quântico, conforme assevera Franco (2018) muito vêm contribuindo para tornar o mundo melhor, libertar a humanidade de pandemias terríveis, proporcionar saúde e longevidade, facultar comunicações com a rapidez antes inimaginável, compreender muitos enigmas que fascinaram os antepassados e dirimir dúvidas a respeito de muitas superstições.

2 CONTEXTO HISTÓRICO

A Europa dos primeiros anos do século XX foi o cenário, onde a estrutura do átomo foi estudada, pesquisada e formulada, culminando no desenvolvimento da teoria quântica.

O contexto histórico dos anos 1890s, com destaque para os ambientes de Inglaterra, França e Alemanha - países expoentes da ciência mundial - precedeu o desenvolvimento da teoria quântica.

A Inglaterra vivia a sua era vitoriana (1837-1901), isto é, se reverenciava ao império da Rainha Vitória, cujo nome fazia jus ao grande progresso e estabilidade atingida pelo país nesse período. A Inglaterra concedia o grau de cavaleiro a cientistas ingleses eminentes, conforme faz ainda na atualidade. Foram nestes anos que a teoria da evolução de Darwin começou a ser aceita. Na literatura, Oscar Wilde se destacava, através de suas peças.

A França ainda estava sofrendo as consequências da derrota na guerra franco-prussiana (1870-1871). Os cientistas, conforme explica Segrè (1980), esperavam que, através das ciências, se pudesse apressar a recuperação da França. Napoleão III costumava receber cientistas eminentes na corte, provando que a ciência era valorizada, mesmo naquela época. Na arte, o impressionismo conheceu o seu apogeu.

A Alemanha unificada ou Império Alemão, cujo imperador e rei da Prússia era Guilherme II, constituía a mais poderosa nação da Europa continental e era dominada por militares. Guilherme II foi um incentivador das ciências, de modo que um cientista renomado tinha acesso a ele, quando desejasse. O pensamento filosófico era grandemente influenciado por Friedrich Nietzsche.

Quanto à tecnologia e condições materiais de vida e conforto, a teoria quântica veio a desenvolver-se em um mundo, onde não havia avião, nem telefone e a eletricidade era precária, assim como o saneamento. A principal forma de comunicação era o correio e a iluminação

urbana era provida por gás. Não havia poluição e muito menos consciência de preservação do meio ambiente.

Pode-se citar como desenvolvimentos científicos relevantes: os raios X, o elétron e a radioatividade.

Quanto aos laboratórios de ciências, eram classificados, segundo a capacidade da bateria que o laboratório possuía.

Os laboratórios daquela época precisavam de eletricidade para as experiências, mas não podiam extrair eletricidades dos geradores, pela simples razão de que praticamente não havia geradores; assim, mantinham as baterias nos porões. Uma bateria era constituída por uma série de pilhas elétricas; quanto maior o número dessas pilhas, mais elevado o status do estabelecimento. (SEGRÉ,1980).

As publicações científicas costumavam abordar temas como: liquefação de gases; mensuração de calores específicos; ondas eletromagnéticas; fenômenos da óptica; dissociação iônica; íons em solução; termodinâmica e equilíbrio químico. Segundo Segrè (1980), não se pensava, seriamente, em se construir modelos atômicos, pois, além de supor-se não ser viável, o átomo ainda não tinha atingido pleno reconhecimento.

Entre os químicos do século XIX havia divergência quanto à hipótese dos átomos. É natural inferir que, se os químicos utilizavam fórmulas químicas, a hipótese de Avogadro¹ e as leis da eletrólise de Faraday², conseqüentemente defendiam a hipótese atômica. Por outro lado, havia, por exemplo, o químico alemão Wilhelm Ostwald (1853-1932) que apresentou a “doutrina energética”, na qual todos os fenômenos podiam ser explicados através da ação recíproca da energia, sem a necessidade de átomos.

Entre os físicos, Ernest Mach (1838-1916) destacou-se por posicionar-se cético, quanto à hipótese dos átomos, uma vez que como positivista só aceitava aquilo que pudesse ser previsto e medido. Até mesmo Max Planck (1858-1947) mostrava-se hostil, como ele mesmo dizia,

¹ Atualmente descrita como: Volumes iguais, de quaisquer gases, nas mesmas condições de pressão e temperatura, contêm o mesmo número de partículas, ou seja, 22,4 litros de qualquer gás possuem $6,02 \times 10^{23}$ moléculas (condições de 1 atm e 0°C).

² Primeira lei da eletrólise: durante uma eletrólise, a massa de uma substância liberada em qualquer um dos eletrodos, assim como a massa da substância decomposta, é diretamente proporcional à quantidade de eletricidade Q que passa pela solução. Segunda lei da eletrólise: quando uma mesma quantidade de eletricidade atravessa diversos eletrólitos, as massas das espécies químicas liberadas nos eletrodos, assim como as massas das espécies químicas decompostas, são diretamente proporcionais aos seus equivalentes químicos.

quanto à hipótese do átomo. Ele só veio aceitar a teoria atômica definitivamente, quando esta foi necessária para a fundamentação teórica da sua lei da radiação.

Em 1908, Ernest Rutherford descreveu o longo e enfadonho trabalho de contagem de partículas alfa isoladas através do método da cintilação, ou seja, contar átomos um a um, utilizando um microscópio de baixa potência, através dos reflexos no sulfeto de zinco provocados pela chegada de partículas alfa. Ao contar átomos, foi possível determinar o número de Avogadro, a carga do elétron e descobrir outras constantes universais. Assim, convenceu-se os mais céticos da compreensão real do átomo, derrubando as convicções mais conservadoras.

3 LORD KELVIN E O ÁTOMO DE VÓRTICE

3.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO

FIGURA 1 - William Thomson ou Lord Kelvin

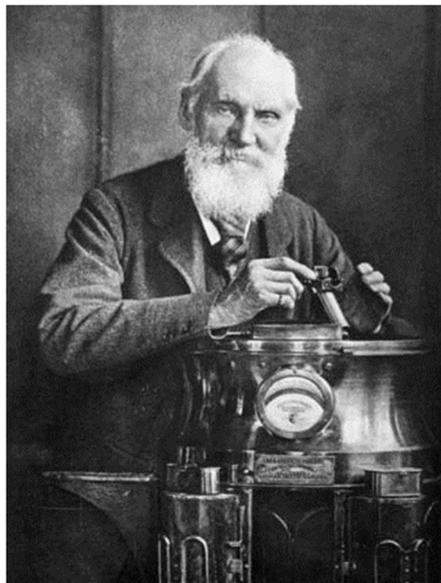


Foto retirada de <https://academic-eb-britannica.ez29.capes.proxy.ufrj.br/levels/collegiate/article/William-Thomson-Baron-Kelvin/106465#biblio>
Acesso em 22abr2019.

William Thomson, na figura anterior, ou Barão Kelvin de Largs, também conhecido como Sir William Thomson nasceu em 1824, em Belfast, Irlanda. Faleceu em 1907, em Netherhall – perto de Largs -, Escócia – sua origem era escocesa.

Estudou na Universidade de Glasgow e também em Cambridge. Foi engenheiro, matemático e físico. Trabalhou no laboratório do químico e físico Henri Victor Regnault (1810-1878), em Paris. Foi um cientista muito premiado e autor de um número elevado de publicações.

Contribuiu para a ciência nos seguintes temas: segunda lei da termodinâmica; desenvolvimento da escala de temperatura absoluta (escala Kelvin); teoria dinâmica do calor; análise matemática da eletricidade e do magnetismo; determinação geofísica da idade da Terra; hidrodinâmica; telégrafo submarino. Na presente dissertação, nos interessaremos por seu trabalho no qual investiga a natureza do éter e a constituição da matéria.

3.2 O CONTEXTO CIENTÍFICO E FILOSÓFICO DA TEORIA DO ÁTOMO DE VÓRTICE

A questão da existência de um meio sutil capaz de suportar e propagar fenômenos ondulatórios por todo o espaço, e sua relação com a natureza íntima da matéria, foi uma das questões cruciais, se não a mais crucial, para as ciências físicas durante o século XIX. As origens do problema podem ser remontadas ao antigo *pneuma* dos estoicos³ (um *plenum* criador de forças e vida), em sua disputa contra a concepção de um mundo constituído apenas por “átomos e vazio”, conforme defendiam os epicuristas⁴ e demais atomistas. (KOEHLER, 2008).

Filosoficamente, o éter significa um meio de resposta para o problema de transmissão da ação física, que consistiu em temática amplamente abordada no século XIX. Havia correntes de pensamento, no continente europeu, que defendiam que a ação física se transmitia “à distância”. Em contraponto, havia correntes, na Grã-Bretanha, que admitiam que essa ação se transmitia de forma “contígua”, tendo algum meio de suporte, como o éter. O éter seria o intermediário de fenômenos elétricos, ópticos, magnéticos e eletromagnéticos.

Segundo Lopes (2009), a questão dos anéis vórtices era discutida por matemáticos e físicos na Inglaterra. Nesta teoria, toda a matéria do Universo era constituída de um fluido perfeito, incompressível, e as propriedades da matéria eram devidas à movimentação deste fluido – o éter. Os movimentos eram regidos pelas leis da hidrodinâmica e por consequência toda a física poderia ser solucionada com uma série de equações diferenciais.

³ Os estoicos preconizavam o cultivo da temperança frente à dor e as agruras da vida. Defendiam a teoria contínua da matéria, isto é, o *pneuma* e a substância estão intimamente ligados e se interpenetram. A matéria é divisível ao infinito e, portanto, suas partes se comunicam entre si. Eles recusavam a existência do vazio e a exigência desse para que o movimento fosse possível. O movimento se daria no pleno, considerado por eles um meio elástico.

⁴ Epicurismo é um sistema filosófico, que prega a procura dos prazeres moderados para atingir um estado de tranquilidade e de libertação do medo, com a ausência de sofrimento corporal pelo conhecimento do funcionamento do mundo e da limitação dos desejos. Wikipédia, acesso em 28out2019.

De acordo com Camel (2004), o ano de 1851 representa um grande divisor na carreira de William Thomson, após o qual, a pesquisa para uma teoria física consistente do éter e da matéria tornou-se sua constante preocupação. No centro dessa pesquisa, assentava-se a noção de ar-éter (aether) preenchendo todo o espaço. O termo aether implicava uma unidade do éter com a matéria normal, um fundamento comum a ambos e uma contínua transição de um para outro. Embora o papel do éter como veículo de ondas de luz e de calor radiante tenha se tornado um assunto comum da filosofia natural, seus atributos elétricos, magnéticos e termodinâmicos não o tinham, especialmente em relação à matéria em si. Nos anos cinquenta, Lord Kelvin tinha explorado vários modos de conceber o espaço entre as menores partes da matéria, preenchido com um meio material e contínuo sofrendo movimentos rotatórios, “vorticoso”, ao redor de átomos materiais e moléculas.

O trabalho de Lord Kelvin sobre átomos de vórtice se desenvolveu em decorrência de sua fascinação por hidrodinâmica e de sua postura crítica em relação ao atomismo, conforme afirmou Kragh (2002). Kelvin defendia o fluido perfeito, isto é, sem viscosidade e sem compressibilidade, para o seu átomo de vórtice. Antes dele, os estudiosos da hidrodinâmica construíram modelos matemáticos, sem mencionar construções microscópicas particulares.

Segundo Kragh (2002), Kelvin rejeitava a visão da matéria newtoniana ou daltoniana, como sendo composta de átomos indivisíveis, como pontos, interagindo à distância através de um vácuo por meio de forças de curto alcance. Kelvin foi mais atraído pela teoria do contínuo ou doutrina do *Plenum* Universal, acreditando que as propriedades da matéria bruta podiam ser explicadas pela substituição das partículas discretas por tensões em um éter fluido e elástico. Em outras palavras, a matéria podia ser concebida como a manifestação de movimentos ou redemoinhos em um fluido.

Além disso, segundo Camel (2004), Lord Kelvin fora motivado pelos anéis de fumaça de Tait e pelo artigo de Hermann von Helmholtz (1821-1894) de 1858, sobre o movimento de vórtice num fluido perfeito. Em tal artigo, foram estabelecidos os fundamentos matemáticos do modelo do átomo de vórtices, no qual átomos eram formados por um conjunto de tubos vórtices fechados no éter – infinito, incompressível, homogêneo e sem atrito. Era uma proposta hidrodinâmica sobre a permanência de certas características do movimento de vórtice em um líquido perfeito. O Efeito Faraday⁵ também foi importante, visto que demonstrou que um campo magnético é o efeito macroscópico das rotações em escala microscópica.

⁵ Fenômeno resultante da polarização da luz.

Sendo assim, em 18 de fevereiro de 1867, Kelvin apresentou sua Teoria do Átomo de Vórtice. De acordo com Abrantes (1998), Lord Kelvin sentia a necessidade de inventar modelos mecânicos para dar inteligibilidade a uma teoria matematizada. De acordo com Camel (2004), trata-se de uma teoria atômica unificadora, inserida numa abordagem dual que permeou a Física Britânica do século XIX: o contínuo, representado pelas teorias de um éter dinâmico interveniente dos fenômenos luminosos, elétricos, magnéticos e eletromagnéticos; e o discreto representado pelas teorias de partículas em movimento.

3.3 A CONTRIBUIÇÃO DE LORD KELVIN À CIÊNCIA

Lord Kelvin anunciou a sua hipótese dos átomos de vórtice, em uma conferência na Royal Society de Edimburgo. As variações de densidade foram substituídas por variações em vorticidade (velocidade angular) em um fluido com densidade constante. Desse modo, Thomson pôde propor uma teoria utilizando o átomo de vórtice hidrodinâmico, contudo sem utilizar o conceito de partícula.

Lord Kelvin construiu seu modelo atômico a partir do movimento de vórtice num éter concebido como um *plenum* universal. A Teoria do Átomo de Vórtice foi uma tentativa para integrar discreto e contínuo através de átomos de éter. (CAMEL, 2004).

Basicamente, Kelvin descreveu os átomos como linhas de vórtice entrelaçadas no éter. Foi uma tentativa de unificar concepções antagônicas de átomos e éter, através do desenvolvimento da teoria dos átomos formados por vórtices de éter.

Kragh (2002) explica que Kelvin submeteu-se ao seguinte questionamento: se toda a matéria é contínua e de heterogeneidade molecular, então consiste em finitos vórtices ou outros movimentos relativos de partes contíguas de um corpo. Kelvin respondeu afirmativamente ao seu próprio questionamento, entretanto não desenvolveu novos trabalhos, a partir deste ponto.

Conforme explica Camel (2004), para Lord Kelvin, todos os corpos eram compostos por átomos de vórtice em um fluido perfeito e as colisões dos átomos que eram invocadas como responsáveis pela elasticidade dos gases poderiam ser compreendidas, a partir da visualização de dois anéis de fumaça colidindo. Lord Kelvin desejava fundamentar com seus átomos de vórtice a nova Teoria Cinética dos Gases e possivelmente uma teoria de sólidos elásticos e líquidos. Tratava-se da abordagem de questões relacionadas com o movimento, a velocidade, a energia e o volume desses anéis no fluido.

Kelvin defendia o átomo elástico, seu modelo era de um éter giroestático, caracterizando a teoria elástica do éter, conforme seu artigo "Steps toward a Kinetic Theory of Matter", apresentado no encontro da Associação Britânica, em Montreal, no ano de 1884.

Uma vez que linhas ou tubos de vórtice são estáveis e permanentes, vórtices ligados (linked) ou embaraçados (knotted) e topologicamente diferentes poderiam explicar a variedade dos elementos químicos. Ao mesmo tempo, o experimento com os anéis de fumaça mostrou que colisões entre anéis de vórtice produziam vibrações e, portanto, insinuavam uma possível explicação para os espectros. É possível perceber que a teoria do átomo de vórtice se edifica sobre a certeza do éter. Conclui-se que William Thomson assumiu indiretamente um certo grau de realismo⁶ para o átomo de vórtice. (CAMEL, 2004).

Conforme explicou Michael Grabham, em carta endereçada ao editor do periódico "The Lancet", e publicada no mesmo em 4 de outubro de 1913, Kelvin considerava o éter como um agente todo-penetrante, possuindo certos atributos definidos dos quais radiação e gravitação eram evidências, e sustentava que qualquer teoria da evolução ou condensação de éter dentro da matéria gravitacional, iria matematicamente, entrar em conflito com a condição precedente que tal meio não deve exercer sobre a perfeita mobilidade da matéria imersa nele.

Físicos britânicos foram atraídos pela Teoria do Átomo de Vórtice e sua concepção de modelo atômico.

3.4 O DESENLAÇE DA TEORIA DO ÁTOMO DE VÓRTICE

De acordo com Abrantes (1998), teorias estão, constantemente, introduzindo novos termos que são, muitas vezes, rejeitados mais à frente e o éter é um exemplo desses termos.

Alvejado por questões filosóficas críticas, o próprio Lord Kelvin identificou dois problemas que confrontavam a visão de mundo mecanicista. O primeiro problema tratava da falha ao explicar o mecanismo do movimento da Terra através do éter. O segundo problema fazia referência à dificuldade do conceito de equipartição de energia para a construção de modelos moleculares. O físico e filósofo Ernst Mach (1838-1916) corroborou sustentando que a visão mecânica era uma contingência histórica. Mach estendeu sua crítica à filosofia mecanicista para um ataque ao atomismo. Ele enfatizou o status hipotético da teoria atômica,

⁶ O realismo científico entende que a ciência cria teorias científicas que visam descrever com veracidade as entidades e os fenômenos que ocorrem no universo.

sustentando que átomos eram meramente símbolos para a representação de fenômenos, partículas físicas não reais, conforme explica Harman (1982).

Embora no início a teoria se justificasse metodologicamente e fosse considerada promissora, não foi capaz de fazer previsões. Sem ser verificável, não foi provada, nem refutada. (CAMEL,2004).

No século XX, a concepção de um éter foi abandonada. Este abandono foi enfatizado pelos problemas que estariam na gênese da teoria da relatividade restrita de Einstein. Este descartou a teoria do éter e revolucionou as concepções clássicas de espaço e tempo. Ao propor que a luz fosse particulada, Einstein procurou convergir o eletromagnetismo e a visão de mundo mecânica. Os postulados fundamentais da teoria eram princípios universais que se aplicavam a ambos mecânica e eletrodinâmica. Einstein havia sido influenciado pela crítica de Mach à visão mecanicista, então propôs transformar eletrodinâmica e mecânica em uma teoria física mais geral e fundamental.

Tanto a teoria quântica, como a teoria da relatividade foram influenciadas pelas discussões filosóficas do século XIX, sobre a visão de mundo mecanicista.

O conceito de éter foi essencial para a construção e consolidação da física clássica, tendo sido as tentativas de levá-lo aos limites de suas possibilidades um fator determinante para sua derrocada final, limites que levaram ao alvorecer de uma nova física e a uma nova concepção de Universo e de Natureza. (KOEHLER, 2008).

Apreciador de modelos atômicos, o físico britânico J. J. Thomson adotou o modelo, publicando artigos sobre o tema, em 1879 e 1882, bem como seu primeiro livro, em 1883, intitulado “Treatise on the motion of vortex rings”.

Posteriormente, J. J. Thomson se desvencilhou da concepção do átomo de vórtice e concebeu seu modelo de átomo divisível. J. J. optou pela característica discreta do átomo, em detrimento da característica contínua do éter.

4 J. J. THOMSON: O ÁTOMO É DIVISÍVEL

4.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO

FIGURA 2 - J. J. Thomson



Foto retirada de <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1906/thomson/biographical/> Acesso em 08abr2019.

Joseph John Thomson, na figura anterior, nasceu, em 1856, em Cheetham Hill, na Inglaterra. Faleceu em 1940, em Cambridge, Inglaterra. Foi professor na Universidade de Cambridge. Passou alguns anos trabalhando em Princeton e Yale, Estados Unidos. Foi presidente da Royal Society de Londres. Cientista por diversas vezes premiado, foi o vencedor do Prêmio Nobel de 1906 e em 1908 tornou-se Sir Joseph John Thomson. Segundo Rayleigh (1942), ao som dos risos dos adultos próximos, quando perguntado o que seria quando crescesse, J. J. já sonhava que um dia iria trabalhar com “Pesquisa Original”. Era uma espécie de intuição aliada à aptidão, vocação e forte vontade. Na sua vida familiar, não havia qualquer tipo de relação com a ciência, ou qualquer tipo de influência neste sentido.

Thomson configura um ícone quando o assunto é a história do desenvolvimento dos modelos atômicos, bem como as teorias atômicas da matéria. Embora sua contribuição para a ciência tenha ido muito além. A física e a teoria atômica da matéria sofreram muitas transformações da época de Thomson para os dias atuais. Embora, preferisse o trabalho teórico, J. J. pertenceu à primeira geração que ensinou física como uma matéria prática e independente da matemática.⁷

⁷ Extraído do comentário de George Thomson, filho de J.J. Thomson, em seu artigo “Centenary of J. J. Thomson”, de 1956.

Produziu um número elevado de publicações, tais como: “Treatise on the Motion of Vortex Rings”; Application of Dynamics to Physics and Chemistry”; “Notes on Recent Researches in Electricity and Magnetism”; “Discharge of Electricity through Gases”; “Conduction of Electricity through Gases” e “Elements of the Mathematical Theory of Electricity and Magnetism”.

Dentre tantos prêmios, artigos e diferentes linhas de pesquisa, J. J. ganhou o prêmio Adams, com um longo ensaio sobre movimento de vórtice. Ele se interessou pelo tema, por sua possível conexão com a teoria atômica e possíveis modelos para os átomos da química. Este interesse o levou ao seu primeiro trabalho sobre descarga elétrica. Pareceu-lhe uma indicação de que a dissociação química estaria, necessariamente, associada a cargas elétricas e que a condutividade de gases era um exemplo disso.⁸ O seu trabalho sobre o elétron é o mais conhecido na história da ciência e é o de maior interesse para a presente dissertação, além da sua contribuição para o desenvolvimento da teoria atômica.

4.2 A CONTRIBUIÇÃO DE J. J. THOMSON À CIÊNCIA

De acordo com George Thomson⁹, em abril de 1897, J. J. conferiu uma palestra na Royal Institution, na qual ele descreveu como havia determinado a proporção e / m^{10} para os raios catódicos. Era a constatação do elétron, isto é, toda matéria, qualquer que seja a sua fonte ou natureza, contém partículas do mesmo tipo, que possuem muito menos massa do que os átomos dos quais elas fazem parte. Originalmente, J. J. chamou estas partículas de corpúsculos. O elétron já tinha aparecido antes em duas teorias de concepções diferentes: a de Lorentz em 1890 e a de Larmor em 1900. O termo elétron foi sugerido por Stoney em 1891 como uma unidade de carga atômica e em 1894 através de Fitzgerald, para significar uma singularidade no éter eletromagnético. Perrin em 1895 evidenciou a natureza discreta dos raios catódicos.

J. J. partiu da observação da natureza dos raios catódicos, que ocorrem quando uma corrente elétrica atravessa um vaso, onde tinha sido feito vácuo. Segundo Davis (2007), J. J. demonstrou experimentalmente que os raios que emanavam do cátodo de um tubo de descarga brilhante eram correntes de partículas negativamente carregadas, com o reconhecimento que

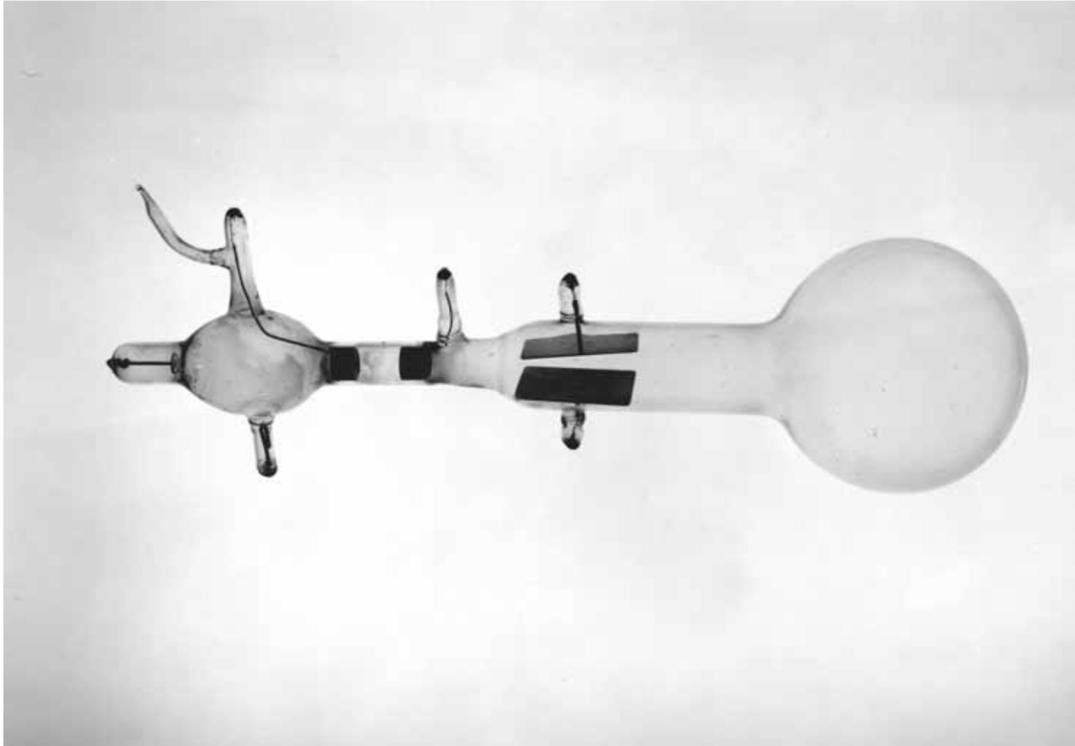
⁸ Extraído do comentário de George Thomson, filho de J.J. Thomson, em seu artigo “Centenary of J. J. Thomson”, de 1956.

⁹ George Thomson era filho de J. J. Thomson e publicou o artigo denominado “Centenary of J. J. Thomson”, de 1956.

¹⁰ m é a massa da partícula e e sua carga elétrica.

estas partículas eram partes componentes do que se tinha anteriormente considerado como átomos indivisíveis. Segue figura do aparato utilizado para experimentação.

FIGURA 3 - Aparato de vidro usado por J. J. Thomson para determinar o raio e / m dos elétrons.



Retirado de Davis (2007).

George Thomson (1956) explica que com a aplicação de uma técnica experimental onde se obtinha de melhor maneira o experimento realizado à vácuo, J. J. foi capaz de propor que os raios catódicos eram compostos de partículas. E ainda complementou, constatando que estes raios eram compostos das mesmas partículas, ou corpúsculos, independentemente do tipo de gás que transportava a descarga elétrica ou de que tipos de metais eram utilizados como condutores. Alguns átomos possuem muito elétrons, no entanto, a massa total dos elétrons nunca ultrapassa 1/1000 da massa do átomo. Assim, o elétron foi aceito pela comunidade científica da sua contemporaneidade.

Segundo Davis (2007), a identificação do elétron foi um marco na ciência. Então, descobriu-se que os raios catódicos eram compostos de corpúsculos carregados negativamente – subsequentemente denominados elétrons. Foi a demonstração, pela primeira vez na ciência, de que partículas menores do que os átomos existiam. Até então, defendia-se que o átomo era indivisível. Foi um disruptura científica. Este fato propiciou que outros cientistas se dedicassem ao estudo da natureza da matéria e da teoria atômica e o mais importante era o marco inicial da indústria eletrônica.

Davis (2007) destaca que a identificação do elétron por J. J. permitiu tanto a evolução da ciência, como da tecnologia. No que concerne à evolução da ciência, seguiu-se a identificação de tantas outras partículas atômicas, como os prótons, nêutrons, quarks, neutrinos, mésons, etc. No que concerne à evolução da tecnologia, abriu-se um leque de aplicações, através da indústria eletrônica: válvula termiônica, transistor, microscópios eletrônicos, circuitos integrados, lasers de estado sólido, células solares, monitores de tela plana e flexíveis, LEDs, etc.

Mais tarde, em 1899, J. J. fez uma determinação de ambos e e e/m , para o mesmo tipo de íons produzidos por luz ultravioleta. Ele mostrou que e/m para esses íons era aproximadamente o mesmo, tal qual dos raios catódicos e que e era o mesmo para os íons dos raios X. Ele mostrou também que as partículas negativas emitidas de um fio quente tinham aproximadamente o mesmo e/m ¹¹. Em seguida, veio a construção do seu modelo atômico, sobre o qual, J. J. dedicou árduas horas de trabalho. Thomson (1956) explica que J. J. propôs que o átomo fosse constituído de uma distribuição uniforme de eletricidade positiva. Sobre o número de elétrons em um átomo, J. J., 10 anos após a identificação dos elétrons livres, publicou um artigo, em que por três métodos independentes, ele chegou à conclusão de que o número de corpúsculos em um átomo não estava longe do peso atômico químico.¹²

Ao construir sua teoria atômica, J. J. preocupou-se em assegurar a análise matemática da estabilidade do átomo e assim a plausibilidade do modelo. Goldstein (2013) explica que para J. J., o átomo em equilíbrio tinha n corpúsculos e eles eram organizados em intervalos angulares iguais em anéis dentro de uma esfera eletrificada positivamente e cada corpúsculo carregando uma carga de eletricidade negativa. Este modelo permitia que o átomo fosse eletricamente neutro e era capaz de explicar suas propriedades químicas.

Goldstein (2013) afirma que J. J. demonstrou que o átomo não é a mais simples unidade da matéria, mas que possui uma estrutura. A teoria atômica de Thomson foi apelidada, popularmente, de “pudim de passas”, mas não pelo próprio. Desconhece-se a origem do apelido. Neste modelo, o átomo era um domínio de espaço preenchido, com numerosos corpúsculos negativos, cuja carga total é neutralizada, de alguma forma pela eletrificação positiva no espaço.

¹¹ Um valor de e mais preciso foi encontrado através dos experimentos do físico experimental norte-americano Robert Andrews Millikan (1868-1953).

¹² Informações extraídas do texto de George Paget Thomson, encontrado na Enciclopédia Britannica.

Em 1904, J. J. publicou um artigo de suma importância para a compreensão da sua teoria atômica. O artigo foi denominado: “On the structure of the atom: an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure”. Neste artigo, J. J. começa enunciando a sua teoria da seguinte forma:

A visão de que os átomos dos elementos consistem em um número de corpúsculos negativamente eletrificados imersos em uma esfera de eletrificação positiva uniforme, sugere, entre outros problemas matemáticos interessantes, aquele discutido neste artigo, o do movimento de um anel de n partículas negativamente eletrificadas colocadas dentro de uma esfera eletrificada uniformemente. (THOMSON, 1904, tradução nossa).¹³

Nota-se que J. J. preocupava-se com a explicação matemática da sua teoria. Ele achava importante introduzir o viés matemático que corroborasse com sua visão e proposta de modelo atômico. Assim, ao longo do seu artigo, ele se dedica à solução matemática para os seguintes problemas originados em sua teoria: “os problemas que temos que resolver são (1) o que seria a estrutura de um átomo, por exemplo, como os corpúsculos se organizariam dentro da esfera; e (2) quais propriedades esta estrutura conferiria ao átomo”. (THOMSON, 1904).

As soluções encontradas por Thomson (1904) foram: “Quando os corpúsculos são obrigados a mover-se em um único plano, é indicado pelos resultados que obtemos - os corpúsculos se organizarão em uma série de anéis concêntricos”. E ainda “as propriedades conferidas ao átomo por sua estrutura de anel são análogas, em muitos aspectos, àsquelas possuídas pelos átomos dos elementos químicos, e, em particular, as propriedades do átomo dependerão de seu peso atômico de um modo muito análogo ao expresso pela lei periódica”.

Em seu livro “Recollections and Reflections”, datado de 1936, J. J. descreveu uma grande dificuldade que acometeu o seu trabalho experimental que culminou na identificação do elétron. Para constatar que as partículas que formavam os raios catódicos eram eletricamente negativas, o experimento exigia que se utilizasse a técnica de se obter vácuo, porém naquela época, esta técnica não estava completamente desenvolvida. Segue a descrição:

Minha primeira tentativa de desviar um feixe de raios catódicos consistiu em passá-lo por duas placas metálicas em paralelo presas dentro de um tubo de descarga, e produzir um campo elétrico entre as placas. Não houve deflexão.

¹³ O texto em inglês encontra-se no Anexo, item 1.

Eu poderia, contudo, detectar uma leve cintilação no feixe quando a força elétrica era aplicada. Isto me confirmou o que eu pensava, que é a explicação da ausência de deflexão elétrica dos raios. Se há qualquer gás entre as placas será ionizado pelos raios catódicos, quando eles o atravessarem, e então produzir ambas partículas elétricas positivas e negativas. A placa carregada positivamente atrairá para si partículas eletrificadas negativamente, que as neutralizarão no espaço entre as placas. Similarmente, o efeito da placa eletrificada negativamente será neutralizado pelas partículas eletricamente positivas. Assim, carregando as placas, não será produzida força elétrica entre elas. A cintilação momentânea foi devida à neutralização das placas não ser instantânea. A ausência de deflexão sobre a vista é devida à presença de gás - a pressão muito alta - assim o que se deve fazer é obter o maior vácuo possível. Era mais fácil falar do que fazer. A técnica de produzir alto vácuo naqueles dias estava em estágio elementar. (THOMSON, 1936).

Contornada a dificuldade experimental, o resultado, isto é, a constatação de que as partículas que formavam os raios catódicos eram eletricamente negativas, permitiu que m / e fosse medido. Além disso, também ficou provado que a massa das partículas independe do tipo de gás utilizado no tubo de descarga. Sobre isso J. J. relatou: “Estes experimentos eram de natureza exploratória, o aparato era de característica muito simples e não era projetado para resultados numéricos mais acurados. Foi suficiente, contudo, para provar que e / m para as partículas de raio catódico era da ordem de 10^7 ”. (THOMSON, 1936).

Para J. J., os resultados eram tão surpreendentes que a busca por valores mais precisos se mostrava irrelevante.

4.3 O LABORATÓRIO CAVENDISH

Lord Rayleigh (1942) relata um fato interessante sobre o ano de 1884, evidenciando a admiração de J. J. por William Thomson. No ano supracitado, se tornou conhecido que ele próprio Lord Rayleigh (1842-1919), matemático e físico inglês, estava renunciando à cátedra Cavendish. Sir William Thomson ou Lord Kelvin já havia sido abordado para ocupar a vaga, em 1871, quando a cadeira foi fundada, e novamente com a morte de Maxwell em 1879. Então, ele foi novamente abordado pela terceira vez, J. J. Thomson sendo o motor ativo na coleta de assinaturas. A opinião informada em Cambridge foi praticamente unânime em desejá-lo. No entanto, Kelvin ainda não estava disposto a deixar Glasgow. Assim, o conselho de eleitores

para preencher a nomeação decidiu a favor de J. J. Thomson, para ocupar a cátedra disponível. Sobre essa conquista profissional, J. J. disse: “Ainda não consigo entender minha posição, pois nunca considerei minha candidatura uma questão séria”¹⁴.

Kelvin foi um dos muitos visitantes ilustres do Laboratório Cavendish. J. J. sempre os convidava, apresentando o visitante a algum estudante de pesquisa, que se tornava responsável por explicar o trabalho em andamento. Alguns dos visitantes pareciam ter vergonha de fazer perguntas, mas Kelvin foi uma exceção impressionante, inquirindo sobre os mínimos detalhes. Um aluno chegou a expressar: "Kelvin não fica satisfeito até saber para que servem cada bloco de parafina e cada pedaço de lacre"¹⁵.

Na época em que o elétron foi descoberto, J. J. era Professor Cavendish da Universidade de Cambridge.

Em que pese o fato de J. J. ter trabalhado arduamente e ofertado uma enorme quantidade de publicações, na opinião de seu filho George, a maior contribuição de J. J. à ciência e à humanidade não foi como pesquisador, mas sim como professor do Laboratório Cavendish, formando jovens cientistas. J. J. reuniu um grupo de jovens ávidos por fazer ciência, entre 1895 e 1914¹⁶, vindos de todas as partes do mundo, e depois de trabalhar sob sua orientação, muitos então formados como professores foram aceitos no exterior. Sete¹⁷ Prêmios Nobel foram concedidos àqueles que trabalharam com J. J.. O Professor Thomson permitia que os seus alunos pesquisassem e publicassem de forma original, com independência e autonomia, de modo que os resultados finais alcançados corroboravam para o sucesso da Escola sob sua orientação.

Duas circunstâncias distintas, a abertura da Universidade para estudantes de pós-graduação de outro lugar, e as regulamentações alteradas para a Bolsa de Exibições de 1851, foram causas contribuintes para a explosão de atividades no Laboratório Cavendish. Aconteceu que entre os recém-chegados havia vários homens de habilidade bastante excepcional, e estes, combinados com os graduados de Cambridge, formaram uma equipe que raramente pode ser encontrada na história do mundo trabalhando em qualquer assunto científico no mesmo prédio da Universidade, ao mesmo tempo. (LORD RAYLEIGH, 1942).

¹⁴ Trecho extraído de uma carta enviada ao físico Arthur Schuster (1851-1934), datada de 26 de dezembro de 1884.

¹⁵ Retirado de Lord Rayleigh (1942), página 52.

¹⁶ Informações extraídas do texto de George Paget Thomson, encontrado na Enciclopédia Britannica.

¹⁷ Idem.

Em 1894, no ensejo da Bolsa de Exibições de 1851, se deu a chegada do neozelandês Ernest Rutherford¹⁸ à Cavendish. Ainda na Nova Zelândia, Rutherford já havia lido tudo o que J. J. havia escrito e decidido que ele era o homem com quem gostaria de trabalhar. Embora Rutherford tivesse inicialmente medo de não ter causado uma boa impressão, J. J. de fato, sentiu seu valor imediatamente. De acordo com Lord Rayleigh (1942), Rutherford veio da Nova Zelândia com um esquema de pesquisa preparado, o que levou ao seu detector magnético de ondas elétricas. Ele começou a trabalhar imediatamente nisso e, em alguns meses, levou à detecção de ondas a uma distância de algo como uma milha e meia entre o Laboratório Cavendish e o Observatório em Madingley Road.

Havia momentos de descontração no Laboratório Cavendish, a hora do chá era um hábito diário instituído por Rutherford, quando ainda era aluno. Era considerada a melhor hora do dia, não por causa do chá propriamente dito ou pelos biscoitos que o acompanhavam, mas pela interação social que proporcionava. Segundo Lord Rayleigh (1942), J. J. estava sempre bem informado por qualquer assunto, como política, ficção, drama, esporte universitário, tinha algo a dizer sobre quase qualquer assunto que pudesse aparecer. A conversa geralmente não era sobre física, pelo menos não em seus aspectos técnicos, embora frequentemente recorresse às personalidades ou idiossincrasias de homens científicos em outros países, conhecidos pessoalmente por alguns dos presentes e com reputação por todos. J. J. era um líder agregador, um bom contador de histórias, mas também um bom ouvinte, e sabia como atrair membros até tímidos do convívio. Além do chá no Laboratório, J. J., juntamente com a senhora Thomson, ofereciam, em sua casa, cafés-da-manhã, festas e jantares, com o intuito de confraternizarem com os acadêmicos.

Para Lord Rayleigh (1942), que o conheceu pessoalmente, J. J. conservava características intrínsecas como boa disposição física, bom humor, fácil acesso, nunca parecia estar com pressa e estava geralmente pronto e até ansioso para parar e discutir qualquer coisa de interesse público ou científico, se alguém o encontrasse na passagem. Distraído, era capaz de contar a mesma história duas vezes, na mesma ocasião, para a mesma audiência. Nas tardes de domingo, costumava ser encontrado andando sozinho nos campos e ruas de Cambridge. Aos sábados, muitas vezes chegava ao laboratório vestido para jogar golfe e no meio-dia pegava o trem para Royston, onde jogava com qualquer conhecido que por acaso estivesse lá, ou até mesmo sozinho. Certa vez ele convidou Rutherford, então recém-chegado da Nova Zelândia,

¹⁸ Ernest Rutherford (1871-1937) foi um físico e químico neozelandês e será estudado no próximo capítulo.

para jogar golfe com ele. J. J. não era exatamente um bom jogador, mas estava interessado no aspecto dinâmico do assunto. Uma vez deu uma palestra sobre golfe na Royal Institution, quando usou a força transversal em um feixe de raios catódicos, em um campo magnético, para ilustrar o efeito dinâmico de rotação na trajetória de uma bola de golfe.

Além do apreço pelo golfe, J. J. era um torcedor entusiasmado do jogo de rugby. Os frequentadores de Cavendish tanto gostavam de assistir as partidas, como gostavam da companhia ímpar de J. J. para assistir as partidas. Ele descrevia um bom movimento de passe - quando a bola passava rapidamente de asa para asa e vice-versa até que a linha do inimigo fosse cruzada - como 'a coisa mais emocionante em qualquer jogo que eu já vi'. Agora, quando tal movimento ocorria e os jogadores corriam para o campo, seria possível assistir J. J. correndo ao longo, fora das cordas, acompanhando o movimento e determinado a "subir" quando a tentativa fosse marcada. Quando percebia que estava sendo observado, franzia as sobrancelhas, como se momentaneamente tivesse vergonha de ser pego agindo como um jovem estudante, mas logo se afastava, simpaticamente. J. J. contrariava o estereótipo do "grande cientista", cuja vida inteira estava centrada em seus trabalhos científicos e que não tinham interesses fora dele. J. J. demonstrava amplo interesse por todas as especificidades da atividade humana. Se por um lado desafiava o estereótipo de "gênio", por outro a rapidez e a infalibilidade da sua aritmética mental chamavam a atenção. Era capaz, de cabeça, realizar aplicações numéricas de processos algébricos bastante complicados em seu trabalho, dispensando o uso de réguas de cálculo. Lord Rayleigh (1942) declarou:

Sua mente trabalhava incessantemente. Se uma ideia lhe ocorresse no laboratório, ele se inclinava bastante para a frente, esfregava as mãos vigorosamente e disparava pela sala, na medida do tamanho permitido. Talvez tenha sido esse impacto de uma nova ideia que de repente o fizesse mudar de movimento de uma caminhada para um salto quando passava pela King's Parade com as mãos nos bolsos do velho sobretudo, às vezes rindo para si mesmo. Talvez possamos rir de suas pequenas peculiaridades; mas sabíamos que ele era um grande homem, e todos o amávamos. (RAYLEIGH, 1942).

O *modus operandi* da pesquisa científica acadêmica britânica passou por um lento processo de transformação no século XIX, que foi consolidado no século XX. Os laboratórios de pesquisa eram instalados em porões e sótãos abandonados, até aproximadamente 1870, quando os primeiros laboratórios foram estabelecidos de forma mais adequada à pesquisa científica. No caso específico do Laboratório Cavendish, havia o prédio e os equipamentos

oferecidos por um doador, bem como orçamento prevendo os honorários dos estudantes. Porém, não havia orçamento para a manutenção dos equipamentos de laboratório. Muitas vezes o próprio professor arcava com as despesas, para garantir a continuidade de sua pesquisa, e não podia contar com o auxílio da Universidade. A ciênciaurgia por desenvolvimento, a operação de um laboratório mais complexo já não cabia no orçamento de um professor. A forma de pensamento dos estudantes contribuiu para esta mudança. Sobre o comportamento dos estudantes, J. J. observou: “Eles esperam receber um aparelho adequadamente projetado que funcione; antigamente, tínhamos que fazê-lo funcionar nós mesmos, da melhor maneira possível, quaisquer que fossem suas deficiências naturais”¹⁹. Entretanto, a ação governamental começou a suportar o desenvolvimento da ciência, muito mais para atender às necessidades da Primeira Guerra Mundial, do que pelo desejo dos acadêmicos de melhores condições de pesquisa. Por exemplo, o uso de gases, durante a guerra, exigia estudos científicos adequados. Era a transição da ciência pura para a ciência aplicada.

Em 1919, após a Primeira Guerra Mundial, a Teoria da Relatividade de Einstein estava na vanguarda, foi quando, então, J. J. aprofundou seu conhecimento sobre este assunto. Contudo, nunca foi motivo de grande interesse e muito menos alvo de seu trabalho, embora tenha compreendido e aceitado os resultados e a interpretação da teoria da relatividade.

Foi também em 1919, que J. J. renunciou ao cargo de Professor Cavendish. Embora, continuasse seu trabalho de pesquisa em Cavendish. Automaticamente, a posição foi oferecida à Rutherford, seu sucessor natural. Tratava-se de uma situação embaraçosa e delicada que se inseria na relação entre J. J. e Rutherford. O elo de amizade, sentimento, respeito e admiração estabelecido entre ambos contornou qualquer possível constrangimento, conforme ficou registrado, na história da ciência, através de carta, escrita em Saville Club, 107 Piccadilly, W., no ano de 1919, por Rutherford à J. J., da qual segue um trecho:

Meu querido professor,

Eu estive pensando sobre o assunto Cavendish, mas é claro que há uma série de fatores que entram na questão. Antes de tomar qualquer decisão, há vários pontos importantes sobre os quais gostaria de suas opiniões e opinião franca.

Suponha que eu me levantei e fui eleito, sinto que nenhuma vantagem do cargo poderia compensar qualquer perturbação futura de nossa longa e contínua

¹⁹ O texto em inglês, extraído de Lord Rayleigh (1942), página 197, encontra-se no Anexo, item 2.

amizade ou qualquer atrito possível, se aberto ou latente, que pudesse surgir se não tivéssemos uma clara relação mútua. \neg de pé em relação ao laboratório e às disposições de pesquisa. É por esses motivos que considero muito desejável discutir a posição em seus vários aspectos. Em primeiro lugar, devo dizer que, se eleito, agradeceria sua presença no Laboratório e ficaria muito feliz se você nos ajudasse, na medida do possível, em ajudar a pesquisa e os pesquisadores do Cavendish. (RUTHERFORD, 1919, tradução nossa).²⁰

A resposta à carta supracitada não é conhecida, mas em 23 de março de 1919, J. J. remeteu, à Rutherford, uma carta esclarecendo a situação com objetividade, como se pode conferir, no seguinte trecho:

“Querido Rutherford,

Estou ansioso para deixar a posição em relação ao Laboratório Cavendish a mais clara possível, mesmo correndo o risco de repetir o que disse antes. A intenção é tornar os dois Professores tão independentes quanto se seus laboratórios estivessem em prédios separados e assim que os fundos necessários forem obtidos, a Universidade, tenho certeza, tomará medidas para obter um novo laboratório. Enquanto isso, algumas salas da nova ala do laboratório atual são designadas para o uso da nova cátedra, mas essas somente estarão sujeitas ao seu controle. Falando por mim, nunca sonhei em interferir de alguma forma com o resto do laboratório ou expressar uma opinião sobre questões de política. Eu deveria tratá-lo como faria em um laboratório separado a uma milha de distância”²¹. (THOMSON, 1919, tradução nossa).

Sob a direção de Rutherford, o Laboratório Cavendish manteve sua brilhante reputação e mais, com a aprovação de J. J.. Este costumava analisar, de forma bondosa, as qualidades e defeitos das pessoas de seu convívio, sobretudo de seus alunos; em relação à Rutherford, J. J. afirmava que reconheceu o seu valor, imediatamente.

Naquele tempo, J. J. não poderia prever o que aconteceria no século XXI, porém, com base no trabalho primoroso de seu pupilo, verificou a possibilidade de desenvolver, comercialmente, um sistema de comunicação sem fio. Não obteve sucesso, a comunidade científica não considerava a comunicação sem fio como algo que pertencesse à realidade. De

²⁰ O texto em inglês encontra-se no Anexo, item 3.

²¹ O texto em inglês encontra-se no Anexo, item 4.

acordo com Lord Rayleigh (1942), J. J. disse em uma transmissão de 1934: “Como ilustração da dificuldade de prever a extensão das aplicações de uma nova descoberta, posso mencionar que, quando uma empresa estava sendo formada para o fornecimento de redes sem fio, Lord Kelvin me disse que ele pensou que as possibilidades de sua aplicação poderiam justificar uma capitalização de 100.000 libras, mas certamente não mais”.

Foi enquanto trabalhava com J. J., no Laboratório Cavendish, em 1910, que Ernest Rutherford conduziu a pesquisa que o levou à sua compreensão da estrutura interna do átomo. E assim, o modelo atômico de Rutherford superou o modelo atômico de J. J. Thomson.

5.0 ERNEST RUTHERFORD E O ÁTOMO NUCLEAR

5.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO

FIGURA 4 - Ernest Rutherford

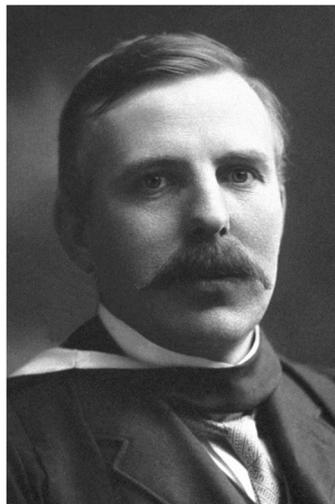


Foto retirada de <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1908/summary/> Acesso em 13mai2019.

Ernest Rutherford, na figura anterior, ou Barão Rutherford de Nelson, de Cambridge, nasceu em 1871, em Nelson, na Nova Zelândia, filho de imigrantes – pai escocês e mãe inglesa. Faleceu no ano de 1937, em Cambridge, Inglaterra. Formou-se em matemática e física. Estudou na Universidade da Nova Zelândia. Teve a oportunidade de integrar o Trinity College, em Cambridge, como estudante pesquisador no Laboratório Cavendish, coordenado por J. J. Thomson. Posteriormente, substituiu J. J. Trabalhou na Universidade McGill, no Canadá. Foi professor de física na Universidade de Manchester. Dentre diversas publicações e premiações, destaca-se que o Prêmio Nobel em Química de 1908 foi concedido à Ernest Rutherford, por suas investigações na desintegração dos elementos e na química das substâncias radioativas.

Em 1898, reconheceu a evidência de raios α e β na radiação do urânio e indicou algumas das suas propriedades. Embora tenha proposto o esquema nuclear de estrutura do átomo, seu objetivo era o estudo da radioatividade, de modo que evidenciou, através das suas pesquisas, que os núcleos de átomos radioativos sofriam transformações espontâneas em núcleos mais simples, com liberação de energia, e que núcleos normalmente estáveis poderiam sofrer transformações semelhantes em colisões com partículas energéticas.

5.2 O CONTEXTO CIENTÍFICO BRITÂNICO QUE INFLUENCIOU RUTHERFORD

Andrade (1958) explica que nos primeiros anos do século XIX, o filósofo natural autodidata britânico John Dalton (1766-1844) propôs os fundamentos da sua teoria atômica, construindo um sistema para a ciência química, no qual cada elemento era constituído de átomos homogêneos de massa fixa e cada composto era feito da combinação dos átomos de diferentes elementos, em proporções numéricas simples. Era a compreensão de que havia um peso atômico para cada elemento. Subsequentemente, entre 1815 e 1816, o físico e químico britânico William Prout (1785-1850) propôs que os átomos elementares eram formados de átomos de hidrogênio. A hipótese de Prout foi experimentalmente refutada, porém, a partir desta lei, foi evidenciado, através de trabalhos com isótopos, que todos os átomos de um dado elemento possuíam a mesma massa. Em 1901, o matemático e físico inglês Barão Rayleigh (1842-1919) completou que os pesos atômicos se aproximavam de números inteiros. Em 1844, o britânico Michael Faraday (1791-1867) argumentou que o átomo não era uma partícula dura, com limites bem definidos, ou “bolas de bilhar”, como se afirmava até então. Ele atacou o conceito de átomo como partícula impenetrável. Já o croata Bosovich (1711-1787) defendia que o átomo era um mero centro de força, e não partículas de matéria. O físico e matemático britânico Clerk Maxwell (1831-1879), em 1875, assumiu partículas duras finitas, quando expôs a teoria cinética dos gases. O físico e químico britânico William Crookes (1832-1919), em 1886, propôs que átomos de massas diferentes podiam ter as mesmas propriedades químicas, era o início da ideia de isótopos. Em 1891, o físico irlandês Johnstone Stoney (1826-1911) presumiu uma unidade de eletricidade na natureza, nomeando-a de elétron. Em 1903, o experimento dos raios catódicos do físico alemão Lenard (1862-1947) permitiu inferir que a maior parte do átomo era composta de espaços vazios. O cientista japonês Nagaoka (1865-1950), em 1904, propôs que um grande número de elétrons se posicionavam em intervalos iguais em volta de um círculo, no centro do qual havia uma partícula massiva carregada positivamente.

Pode-se observar que havia muita discussão, inclusive de viés intuitivo, em torno da estrutura da matéria. Diversos cientistas, tanto físicos, como químicos destacaram suas convicções e também suas contribuições sobre a estrutura do átomo.

No entanto, foi em 1904-1905, através de J. J. Thomson que a ciência recebeu um modelo de estrutura do átomo formalmente delineado, explicado, relevante e aceito.

E ainda mais, foi, apenas, em maio de 1911 que Ernest Rutherford publicou, na *Philosophical Magazine*, seu artigo intitulado “The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom”. “Este artigo deu o átomo nuclear ao mundo”, conforme assentiu Andrade (1958).

5.3 O ENTRELAÇAMENTO RUTHERFORD-THOMSON

Conforme mencionado anteriormente, em 1894, Rutherford concorreu a uma bolsa de estudos na Inglaterra. Essas bolsas de estudo tinham sido instituídas pelo Príncipe Consorte, o marido da Rainha Vitória, que desejava dedicar recursos para a educação de súditos do Império Britânico. Rutherford foi o segundo colocado, mas o vencedor desistiu. De acordo com Segrè (1980), quando Rutherford recebeu o anúncio da premiação, estava na fazenda da família, colhendo batatas. Leu o telegrama que trazia a notícia e disse: “Esta é a última batata que colho em minha vida”.

Em seu laboratório, J. J. convidou Rutherford para trabalhar na investigação da ionização produzida por raios X. Cambridge estava passando por uma espécie de reestruturação, abrindo espaço para treinamento experimental e inaugurando laboratórios para estudantes estrangeiros. Rutherford foi o primeiro aluno estrangeiro a ingressar nesta nova fase de Cambridge.

Em carta enviada à Mary Newton²², um antigo amor de juventude da Nova Zelândia, Rutherford deixou registrado:

Fui até o laboratório e ali encontrei Thomson, mantendo com ele um longo bate-papo. Trata-se de um homem de conversa bastante agradável, nada fossilizado. Quanto à aparência, é um sujeito de altura média, moreno e ainda muito jovem – sempre mal barbeado e de cabelos relativamente compridos.

²² Posteriormente, Rutherford casou-se com Mary Newton.

Seu rosto é um pouco longo e magro. Tem uma cabeça boa e um par de sulcos verticais bem acima do nariz. Falamos sobre generalidades e sobre trabalho de pesquisa, e ele pareceu apreciar o que eu ia fazer. Convidou-me para almoçar, em Scroop Terrace, onde o encontrei junto com a esposa, mulher alta e morena, um tanto pálida, mas bastante eloquente e amável; fiquei conversando durante mais de uma hora após terminado o jantar e depois voltei para a cidade. Esqueci de mencionar a grande coisa que vi: o único menino²³ da casa, de uns três anos e meio, um guri robusto, com um ar saxão, mas o mais bonito que já conheci em termos de aparência e tamanho. (Eve, Rutherford, p.15., *apud* Segrè, 1980).

A seguir, uma figura de Rutherford, à direita, com J. J., à esquerda.

FIGURA 5 - J. J. Thomson e Ernest Rutherford no ano de 1934.



Foto retirada de Regato J.A. pp. 12.

No ano de 1900, Rutherford demonstrou ansiedade à J. J., quanto a conseguir uma posição profissional, ao término de sua bolsa de estudos, visto que Rutherford contava com a responsabilidade do casamento. J. J. tranquilizou o seu pupilo com a seguinte declaração: “Oh, sempre há muito espaço no topo”²⁴. Na sequência, ele obteve uma colocação de professor, na

²³ O menino em questão era G. P. Thomson, o futuro descobridor da difração do elétron.

²⁴ Retirado de Lord Rayleigh (1942), página 146.

Universidade McGill, em Montreal, no Canadá. Foi o encerramento de um ciclo do Laboratório Cavendish. Rutherford e J. J. correspondiam-se constantemente. Para concorrer à colocação em Montreal, Rutherford solicitou uma carta de recomendação à J. J., que por sua vez escreveu:

Nunca tive um aluno que mostrasse tanto entusiasmo ou capacidade para pesquisas originais quanto o Senhor Rutherford e tenho certeza de que, se ele for o escolhido, instalará uma importante escola de física em Montreal. Eu consideraria afortunada qualquer instituição que usufruísse dos serviços do Senhor Rutherford como professor de física. (Eve, p. 55., *apud* Segrè 1980).

Em 1903, foi eleito membro da Royal Society pouco depois. J. J. criticou o conselho da Royal Society, por considerar tardia a nomeação de Rutherford.

5.4 A CONTRIBUIÇÃO DE RUTHERFORD À CIÊNCIA

Rutherford provou que a radioatividade era uma propriedade do átomo. Utilizando equipamentos construídos por ele mesmo para sua própria pesquisa, observou que raios X produziam partículas carregadas tanto positivamente, como negativamente, em igual número. Adicionalmente, conseguiu medir a velocidade destas partículas. Conforme explica Oliphant (1937), Rutherford demonstrou que dois tipos de radiação eram emitidos por urânio: um componente de ionização forte, que era facilmente absorvido e ele os denominou de raios α . E um outro componente mais penetrante e menos ionizável, que ele chamou de raios β .

Os raios α eram as partículas preferidas de Rutherford e seu laboratório dominava a técnica de detectar partículas simples pelo método da cintilação. Sobre o método de cintilação, Rutherford (1911) discorreu: “O desenvolvimento do método de cintilação de contagem de partículas α únicas oferece vantagens incomuns na investigação, e as pesquisas de H. Geiger por este método já adicionaram muito ao nosso conhecimento da dispersão de raios α pela matéria”.

Em 1907, Rutherford deixou o Canadá e retornou à Inglaterra, como Professor da Universidade de Manchester. O primeiro passo consistiu em obter uma quantidade significativa de rádio para iniciar sua pesquisa com a radioatividade. Àquela época, o rádio era produzido apenas pela Áustria. Rutherford conseguiu que a Academia de Ciências de Viena o emprestasse 350 miligramas de rádio. De acordo com a explicação de Segrè (1980), o rádio emprestado permaneceu em poder de Rutherford durante toda a Primeira Guerra Mundial. No final da

guerra, o Governo inglês quis confiscá-lo como propriedade do inimigo, mas Rutherford insistiu que o rádio devia ser comprado como se se tratasse de um negócio comum. Com o resultado da venda, pôde ele ajudar o empobrecido Instituto de Viena, que tinha ficado arruinado com a guerra e receber a gratidão dos cientistas austríacos.

Conforme já mencionado anteriormente, no final da Primeira Guerra, J. J. se aposentou e Rutherford assumiu o Laboratório Cavendish.

Durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), presidiu o Conselho de Assistência Acadêmica na Inglaterra, que tinha o intuito de auxiliar as vítimas dos nazistas, quando Hitler começou a perseguição aos judeus.

Diferente da maioria dos cientistas que colaboraram na construção da teoria do átomo, Rutherford foi um experimentalista, para melhor enfatizar, um grande experimentalista. No início do século XX, poucos cientistas trabalhavam com o tema radioatividade, Rutherford foi um dos pioneiros e ocupou posição de destaque. A intuição era uma característica marcante do seu método de investigação científica.

Rutherford consolidou a sua imagem como orientador de jovens físicos que retornavam da guerra para o seu laboratório e já não precisava manipular os experimentos pessoalmente. Ao realizar a ronda pelo laboratório, os estudantes respondiam de modo veloz e “em posição de sentido”. Era uma profunda demonstração de respeito e admiração. As aulas de Rutherford não eram conhecidas por sua dinamicidade ou eloquência, pois, dado a digressões, frequentemente dispersava-se do tema e dos cálculos.

Sobre a díade teoria versus experimento, Rutherford (1911) afirmou: “Devemos primeiro examinar, teoricamente, os encontros individuais com um átomo de estrutura simples, que é capaz de produzir grandes deflexões de uma partícula α , e então comparar as deduções da teoria, com os dados experimentais disponíveis”. Significa uma espécie de planejamento científico, Rutherford era um cientista completo. Embora, fosse, predominantemente, experimentalista, sabia trabalhar de acordo com a teoria e também analisar os dados. E mais, era hábil em trabalhar com metodologia que envolvesse todo o processo de pesquisa.

Daí decorreu a observação experimental, ainda em Manchester, do desvio de partículas carregadas por folhas de metal finas. Esta experiência foi descrita por Rutherford de forma que se considerasse um átomo que contém uma carga $+-Ne$ no seu centro e que fosse circundada

por uma esfera de eletrificação $+Ne$ distribuída uniformemente, através de uma esfera de raio R . Assim, Rutherford explicou:

Considere um átomo que contém uma carga $+Ne$ em seu centro, cercado por uma esfera de eletrificação contendo uma carga $-Ne$, supostamente, distribuída, uniformemente, ao longo de uma esfera de raio R . e é a unidade de carga fundamental, que neste artigo é tomado como 4.65×10^{-10} E.S. unidade. Devemos supor que para distâncias menores que 10^{-12} cm, a carga central e também carga sobre a partícula α pode ser suposta estar concentrada em um ponto. Deve ser mostrado que as principais deduções da teoria são independentes se a carga central deve ser positiva ou negativa. Por conveniência, o sinal será assumido como sendo positivo. A questão da estabilidade do átomo proposto não precisa ser considerada nesta fase, pois isso, obviamente, depende da estrutura minuciosa do átomo e do movimento das partes carregadas constituintes. (RUTHERFORD, 1911).

O experimento foi descrito na Enciclopédia Britannica da seguinte forma:

Uma fonte radioativa capaz de emitir partículas α (isto é, partículas carregadas positivamente, idênticas ao núcleo do átomo de hélio e 7.000 vezes mais massivas que elétrons) foi colocada dentro de uma blindagem protetora de chumbo. A radiação foi focada em um feixe estreito depois de passar, através de uma fenda em uma tela de chumbo. Uma fina seção de folha de ouro foi colocada na frente da fenda, e uma tela revestida com sulfeto de zinco para torná-la fluorescente serviu como um contador para detectar partículas α . Como cada partícula α atingia a tela fluorescente, produziria uma explosão de luz chamada cintilação, que era visível através de uma visão microscópica ligada à parte de trás da tela. A tela em si era móvel, permitindo que Rutherford determinasse se alguma partícula alfa estava ou não sendo defletida pela folha de ouro. Observou-se que a maioria das partículas α passava diretamente através da folha de ouro, o que implicava que os átomos são compostos de grandes quantidades de espaço aberto. Algumas partículas α foram defletidas levemente, sugerindo interações com outras partículas carregadas positivamente dentro do átomo. Ainda, outras partículas α foram desviadas em grandes ângulos, enquanto algumas até se recuperaram em direção à fonte.²⁵(Enciclopédia Britannica).

²⁵ O texto em inglês encontra-se no Anexo, item 5.

Da órbita hiperbólica descrita pelas partículas α , Rutherford percebeu que a probabilidade de deflexão para uma partícula atirada em direções aleatórias, configurava um centro carregado. Ele assumiu que o centro carregado era proporcional ao peso atômico. Rutherford também considerou o desvio de raios β . O mérito de Rutherford está no fato de ter percebido a relevância de que muitos poucos raios α se espalhavam através de ângulos muito largos, 90° e mais, por folhas finas. Era o início de um novo átomo.

Conforme explica Oliphant (1937), com a ajuda de H. W. Geiger e E. Marsden, Rutherford mostrou que, ocasionalmente, uma partícula α retornava, movendo-se em direção oposta à sua trajetória inicial. Este fato observado exigia uma enorme quantidade de força. Rutherford se baseou na premissa de que esta força era elétrica. Calculou que a partícula α ao ser dispersada pela fina placa de ouro deve penetrar três milhões de milionésimos de um centímetro do centro de dispersão. Isto significa que o centro de dispersão deve ser dez mil vezes menor em diâmetro do que o átomo. Então, Rutherford concluiu que deveria se tratar de uma distribuição angular de partículas α dispersas por um pesado e eletricamente carregado centro. H. W. Geiger e E. Marsden conseguiram comprovar experimentalmente a conclusão a que Rutherford havia chegado. Assim, foi estabelecido o conceito imagético nuclear do átomo.

Em outras palavras, Rutherford, em conjunto com seus colaboradores, pesquisava a trajetória percorrida por partículas α em direção a uma folha fina de metal – uma variedade de superfícies metálicas foi testada. O fato observado foi que as partículas α se desviavam em largos ângulos e algumas voltavam. A conclusão de Rutherford foi de que havia uma colisão das partículas α com uma massa positivamente carregada. Precisamente, Rutherford desenvolveu um modelo em que o átomo consistia em uma carga central, positiva e relativamente larga, circundada por uma esfera de carga negativa. Segundo Regato (1979), o termo núcleo foi usado apenas mais tarde.

Em uma espécie de analogia imagética, o modelo atômico de Rutherford foi comparado a um minúsculo sistema solar, onde os elétrons circundavam o núcleo atômico, como se delineassem órbitas planetárias. O modelo de Rutherford ficou conhecido na ciência como átomo nuclear ou modelo planetário do átomo.

Em seu livro “Radioactive substances and their radiations”, publicado em 1913, Rutherford enunciou o seu modelo atômico mais precisamente, como sendo uma carga positiva concentrada no centro, circundada por uma distribuição de elétrons, que pode estar distribuída através de um volume esférico ou em anéis concêntricos em um único plano.

Com o trabalho de Rutherford iniciava-se a física nuclear, e conseqüentemente o estudo da energia nuclear, trazendo ambos benefícios e temeridades inerentes a esta forma de energia. Já naquela época, no meio científico havia quem acreditasse na grande liberação da energia nuclear, porém Rutherford era avesso ao tema, uma vez que defendia que “algum tolo idiota pode explodir o mundo em pedaços”, conforme revelou Oliphant (1937), cientista que trabalhava no Cavendish Laboratory. A predição de Rutherford não fora exagerada.

Apesar de ter proporcionado uma explicação possível da natureza, o modelo atômico de Rutherford foi contestado. Conforme explica Villeneuve (2005), o espectro de emissão do hidrogênio era conhecido por ter uma emissão regular de linhas, e Johannes Rydberg mostrou, em 1888, que estas linhas poderiam ser ajustadas a uma simples fórmula algébrica. O modelo de sistema planetário não atendia a estas condições.

Em 1912, Rutherford recebeu Niels Bohr na Universidade de Manchester. Então, a estrutura do modelo nuclear de Rutherford foi adaptada à teoria dos *quanta* de Max Planck, de modo que se obteve a teoria da estrutura atômica, modelo de Rutherford-Bohr, que por sua vez recebeu um conjunto de melhorias indicadas por diversos cientistas e persiste até os dias de hoje. Tal modelo é capaz de explicar quase todas as propriedades gerais da matéria.

6 MAX PLANCK: O CALOR RADIANTE É DESCONTÍNUO

6.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO

FIGURA 6 - Max Planck

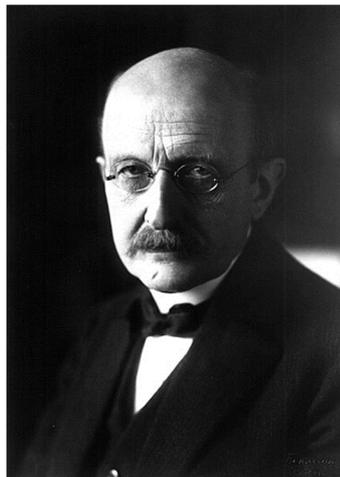


Foto retirada de: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Max_Planck_\(1858-1947\).jpg](https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Max_Planck_(1858-1947).jpg) Acesso em 10jul2019.

Max Karl Ernst Ludwig Planck, na figura acima, nasceu em 1858, na cidade de Kiel, na Alemanha, e faleceu em 1947 em Gottingen, Alemanha. Filho de um professor de direito da Universidade de Kiel, possuía formação luterana, foi admirador da filosofia de Kant e dedicou-se ao piano. Aos 16 anos entrou na Universidade de Munique como estudante de física e de matemática. Já como cientista, pertenceu à Academia de Berlim e à Universidade de Berlim. Dedicou-se, predominantemente, aos seguintes temas: termodinâmica, teoria da radiação, relatividade e filosofia da ciência. Recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1918. Segundo Kubbinga (2018), o Comitê do Prêmio Nobel justificou Max Planck como cientista laureado, em 1918, enfatizando “o reconhecimento ao serviço que ele prestou ao avanço da física por sua identificação dos *quanta* de energia”. Ainda segundo Kubbinga (2018), o cientista Albert Einstein corroborou destacando a importância das inovações de Planck para a teoria de Bohr da relação entre o espectro e a estrutura atômica.

6.2 O CONTEXTO CIENTÍFICO GERMÂNICO QUE INFLUENCIOU PLANCK

Quando Planck decidiu-se pela ciência, o pensamento científico comum da época é que a física já era uma ciência desenvolvida, segura, madura e definitiva, que pouco mudaria com o passar dos anos. Cada capítulo da física poderia ser reduzido à mecânica. O prenúncio de uma nova era foi configurado com o desenvolvimento do eletromagnetismo de Maxwell e também com o desenvolvimento da termodinâmica, que não poderiam ser reduzidos à mecânica. Ainda assim, trabalhava-se na evidência de três pilares: mecânica, eletromagnetismo e termodinâmica.

No século XIX, o território da Alemanha era constituído pela Confederação Germânica, formada por 39 Estados, na qual predominavam a Áustria e a Prússia. Max Planck foi testemunha da invasão prussiana e austríaca na sua cidade natal, Kiel, em 1864. Enquanto se dedicava a sua formação acadêmica e colocação profissional, foi testemunha da ascensão do Império Alemão, isto é, uma Alemanha unificada e a nação mais poderosa da Europa continental, até o seu declínio.

O contexto político, econômico e social da cidade de Berlim, de algum modo, favoreceu a motivação das pesquisas de Planck. De acordo com Kubbinga (2018), Berlim estava em meio à discussão se a cidade deveria ser iluminada por gás ou eletricidade. E se por eletricidade, qual

tipo de lâmpada deveria ser utilizado. Planck interessou-se prontamente pelas isotermas²⁶ de radiação de alta precisão, quando estas tornaram-se disponíveis.

6.3 A CONTRIBUIÇÃO DE PLANCK À CIÊNCIA

Trabalhando em Berlim, Planck demonstrou interesse pelo estudo do espectro térmico e da lei de Kirchhoff. A lei de Kirchhoff diz que: Num recipiente vazio, limitado por paredes inteiramente refletoras e contendo um número arbitrário de corpos emissores e absorventes, chega o momento em que se atinge um estado no qual todos os corpos têm a mesma temperatura, e a radiação – com todas as suas propriedades, inclusive sua distribuição espectral de energia – depende não da natureza dos corpos, mas exclusivamente da temperatura.²⁷

A lei de Kirchhoff culminou no conceito de distribuição normal do espectro de energia. Planck, utilizando a teoria eletromagnética da luz, proposta pelo físico e matemático britânico James Clerk Maxwell (1831-1879), iniciou algumas suposições:

Supus que a cavidade estava cheia de osciladores ou ressonadores lineares simples, sujeitos a forças mínimas de amortecimento e com diferentes períodos próprios; supus também que a troca de energia entre osciladores, causada pela radiação emitida de um para o outro, acabaria por levar, com o tempo, ao estado estacionário de distribuição normal da energia, correspondente à lei de Kirchhoff. (PLANCK, 2012).

Em meio as suas suposições e a uma ampla série de pesquisas, Planck concluiu uma simplificação, na qual a energia do oscilador poderia ser substituída pela energia da radiação. Diante de tal simplificação e também de algumas alternativas fracassadas sobre o problema da distribuição da energia no espectro normal da emissão térmica, Planck resolveu associar a ciência da termodinâmica aos seus estudos. A termodinâmica era um capítulo no qual Planck já havia se debruçado incisivamente, ao longo de sua carreira científica. Nas suas palavras: “Termodinâmica, assunto em que eu me sentia à vontade e em terreno firme. Meus estudos anteriores sobre o segundo princípio da termodinâmica me forneciam uma boa base, pois desde

²⁶ Linha sobre a qual a temperatura se mantém constante.

²⁷ Definição obtida de PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012, página 30.

o início tive a ideia de colocar a entropia do oscilador, e não a temperatura, em correlação com sua energia”²⁸

De acordo com Planck (1972), se a entropia significa desordem, alguém deveria ser capaz de encontrar a desordem na irregularidade. Mesmo em um campo de radiação estacionário as vibrações do ressonador mudam sua amplitude e fase. Desse modo, utilizando-se dos conceitos da termodinâmica e da ferramenta do cálculo diferencial e integral - derivada segunda da entropia de um oscilador em relação a sua energia - Planck calculou o valor da grandeza de irreversibilidade da troca de energia entre o oscilador e a radiação que o excita, resultando que a recíproca desse valor é proporcional à energia. Tal proporção consistia em uma nova fórmula para a radiação, apresentada por Planck na sessão de 19 de outubro de 1900 da Sociedade de Física de Berlim.²⁹ De acordo com Planck (1972), a nova fórmula, que era bem simples, parecia perfeitamente compatível com a lei de distribuição da energia de radiação sobre todo o *range* do espectro normal.

Segundo Planck (1972), desde que a entropia de um ressonador seja determinada como se a energia fosse distribuída em um momento sobre todos os ressonadores, isto deveria ser avaliado através de probabilidades, dentro da teoria da radiação eletromagnética. Ainda segundo Planck (1972), a energia constante do ressonador vibrando em estado estacionário pode ser considerada como uma média temporal ou uma média instantânea das energias de um grande número de ressonadores idênticos, que estão no mesmo campo estacionário de radiação, tão suficientemente longe uns dos outros que não exercem influência mútua.

A nova fórmula foi testada experimentalmente e nenhum cientista conseguiu refutá-la. Entretanto, Planck considerava que obteve a fórmula da radiação de maneira intuitiva. Planck não estava satisfeito, queria a interpretação física da sua equação. Conseguiu este feito memorável, por meio da continuação dos seus estudos, e introduzindo uma constante universal: “que chamei de h ”³⁰. Conforme ele explicou: “como ela apresentava as dimensões de uma ação (uma energia multiplicada por um tempo), propus o nome de *quantum* elementar de ação.”³¹

Nas palavras de Werner Heisenberg, “em 1900, Max Planck propôs que o calor radiante não é uma corrente contínua e indefinidamente divisível; ele é descontínuo, comportando

²⁸ Trecho extraído de PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012, página 32.

²⁹ PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012, página 34.

³⁰ PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012, página 35.

³¹ Idem.

unidades análogas entre si”³². Ao mesmo tempo que a proposta do *quantum* elementar de ação, um novo conceito da radiação, se portou como uma nova forma de descrever a estrutura atômica, contradisse claramente os princípios da física. “A emissão e a absorção de energia não são processos contínuos, mas se realizam por múltiplos dessa constante (constante de Planck)”³³.

Conforme mencionado anteriormente, em 14 de dezembro de 1900, na Sociedade Alemã de Física, Max Planck revelou a compreensão dos *quanta*, culminando na Teoria dos *Quanta* e lançando as bases de uma nova física, a física da mecânica quântica. Conforme explicou Kirilyuka (2000), a compreensão dos *quanta* significa que a energia de corpos sólidos é intrinsecamente descontínua e expressa em porções discretas, ou *quanta*, que por sua vez foi expresso como o produto entre a frequência de radiação emitida ou absorvida e a agora constante universal, conhecida como constante de Planck. Considerando ainda a explicação de Kirilyuka (2000), Planck especificou a ideia da descontinuidade fundamental ou quantização da energia emitida e absorvida, na forma de ondas eletromagnéticas, por qualquer oscilador microscópico individual dentro de um corpo negro.

Planck decifrou o enigma da radiação do corpo negro³⁴, através da identificação do “*quantum* elementar de ação”, e da identificação de uma constante universal, a constante de Planck. A quantização da energia emitida ou absorvida ε é proporcional a sua frequência, ν , com a constante, h , sendo o coeficiente universal que relaciona as duas grandezas, $\varepsilon = h\nu$, conforme explicita Kirilyuka (2000).

Segundo Cassinello (2017), a energia da luz emitida em um salto de uma órbita de energia ε_2 , mais afastada do núcleo, a outra órbita de energia ε_1 , mais próxima do núcleo, é proporcional à diferença de energias: $\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$. E a frequência dessa luz é: $\nu = \varepsilon/h$. O número pelo qual se deve multiplicar a frequência para transformá-la em energia é h , a constante introduzida por Planck em 1900 em sua revolucionária hipótese – formulada “como um ato de desespero” – de que a energia é transferida em pacotes discretos.

³² Opinião extraída da contracapa de PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012.

³³ Idem.

³⁴ Na física, um “corpo negro” é um corpo que absorve toda a radiação que incide sobre ele. Quando aquecido, ele também emite radiação eletromagnética. Uma aproximação de um corpo negro ideal é fornecida por uma cavidade extensa com uma pequena abertura. Quando aquecida, a cavidade emite radiação pela abertura; essa radiação independe do material de que é feita a cavidade. [N.R.]. Definição obtida de PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012, página 38.

Começando por volta de 1904, Millikan dedicou um esforço considerável à determinação experimental da equação fotoelétrica de Einstein e, como consequência, calculou o valor experimental da constante h de Planck. O valor de Millikan para h ($6,57 \times 10^{27}$ erg s) chegou muito perto do relatado por Planck. (NIAZ et. Al., 2010).

6.4 O PENSAMENTO FILOSÓFICO EM TORNO DA TEORIA DOS *QUANTA*

A princípio parece que o trabalho de Planck estava finalizado. Na verdade, estava apenas começando. Uma vez encontrada a fórmula da radiação e o *quantum* elementar de ação, era necessário enquadrá-los como pertencentes à física. Tarefa desafiadora, pois a física clássica não era capaz de absorver estes conceitos, que desde o início se configuravam como uma nova realidade. Este feito, na percepção de Planck, foi alcançado pelos cientistas Niels Bohr e Erwin Schrödinger:

Bohr, com seu modelo de átomo e seu princípio de correspondência, encontrou os fundamentos de uma unificação racional da teoria quântica com a física clássica. Schrödinger, por meio de sua equação diferencial, criou a mecânica ondulatória e, assim, o dualismo onda-partícula. (PLANCK, 2012).

Planck reconheceu que sua Teoria dos *Quanta*, com o passar dos anos, foi corroborada pelo trabalho de Niels Bohr:

Embora os resultados até agora citados dos mais diversos capítulos da física, tomadas em sua totalidade, formam uma prova esmagadora da existência do quantum de ação, a hipótese quântica recebeu seu apoio mais forte da teoria da estrutura de átomos (Quantum Theory of Spectra) proposta e desenvolvida por Niels Bohr. (PLANCK, 1920).

Planck concluiu que “o *quantum* de ação, que em cada um dos muitos e mais diversos processos tem sempre o mesmo valor, $6,52 \cdot 10^{-27}$ erg \cdot s, merecia ser definitivamente incorporado ao sistema das constantes físicas universais”³⁵. Entretanto, fez alguns questionamentos a si próprio e à ciência:

Há uma questão em particular cuja resposta irá, na minha opinião, levar a uma extensa elucidação de todo o problema. O que acontece com a energia de um

³⁵ Obtido de PLANCK, M.; The Origin and Development of the Quantum Theory. Entregue a Royal Swedish Academy of Sciences, em Estocolmo (1920). Oxford: Clarendon Press, 1922. Hoje se considera mais preciso o valor de $6,626 \times 10^{-27}$ erg.s [N.R.].

quantum de luz depois de sua emissão? Ela passa para o exterior em todas as direções, de acordo com os dados da teoria das ondas de Huygens, aumentando continuamente em volume e tendendo à diluição infinita? Ou será que, como na teoria da emanação de Newton, voa como um projétil em uma única direção? No primeiro caso, o quantum nunca mais estaria em posição de concentrar sua energia em uma marca forte o suficiente para separar um elétron de seu átomo; enquanto no último caso seria necessário sacrificar o principal triunfo da teoria de Maxwell - a continuidade entre os campos estático e dinâmico - e com ele a teoria clássica do fenômeno de interferência que explicam todos os detalhes, ambas as alternativas levam a consequências muito desagradáveis ao físico teórico moderno. (PLANCK, 1920).

Ainda segundo Planck:

Mas a teoria dos *quanta* deve sua base mais sólida ao desenvolvimento da teoria atômica por Niels Bohr. Foi a primeira teoria que, apoiada no quantum de ação, conseguiu encontrar a chave para entrar no domínio misterioso da espectroscopia. Desde a descoberta da análise espectral, tinham sido vãs todas as tentativas de explicar os fenômenos que ela revelou. Assim que a via de acesso foi encontrada com a teoria de Bohr, assistiu-se a uma avalanche de conhecimentos novos nessa área e em todos os campos afins da física e da química. A primeira descoberta sensacional foi a explicação teórica da fórmula empírica da série de Balmer no caso do hidrogênio e do hélio. Essa descoberta possibilitou relacionar a constante universal de Rydberg a grandezas numéricas bem conhecidas. (PLANCK, 1920).

Nas palavras de André George³⁶, “Os *quanta* regem a estrutura da matéria, regulam a estabilidade dos átomos e asseguram a existência do eletromagnetismo”³⁷. A teoria quântica mudou o que se pensava conhecer sobre o comportamento do átomo, isto é, da matéria.

O fato de sua produção científica possuir aderência e ainda mais, base, na configuração e estruturação atômica não se constituiu um processo consciente para Planck. Tratou-se de uma constatação, ao longo do seu percurso científico de estudos e aprendizados. Certa vez, Planck

³⁶ Retirado da contracapa de PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012.

³⁷ Opinião extraída da contracapa de PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012.

informou ao físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906): “minha lei da radiação tinha uma base atomística.”³⁸

Planck, além de brilhante físico teórico, reconheceu a importância das reflexões acerca do processo de realização da ciência, ou seja, do fazer ciência, ou mais precisamente da filosofia da ciência. Planck considerava que o objetivo do cientista deveria ser a busca do absoluto. Desse modo, declarou que: “Como sempre considerei a busca do absoluto o objetivo supremo da atividade científica, dediquei-me a esse trabalho.”³⁹ Planck citava como exemplo incisivo da concepção de absoluto a própria teoria da relatividade geral, de Einstein, ou seja, contrariando a sua denominação indicativa de considerar o tempo e o espaço como relativos, a teoria da relatividade chegou ao valor absoluto da energia. Planck considerava prematuro classificar o tempo e o espaço como relativos, pois na história das ciências, muitas vezes, o progresso se deu de maneira que certas noções, antes consideradas absolutas, passaram a ser vistas como relativas e nem por isso o absoluto foi eliminado; nas palavras de Planck: “os marcos de seu domínio foram apenas recuados”⁴⁰. E ainda mais, a métrica do contínuo de quatro dimensões que une espaço e tempo, por intermédio da velocidade da luz, se apresenta como algo que não tem nenhum traço arbitrário, como um absoluto. Ainda segundo a argumentação de Planck, em defesa do absoluto, em conferência⁴¹ proferida na Universidade de Munique, em 1924:

A meu ver, a negação do absoluto se parece com a atitude de alguém que, ao procurar a causa de um fenômeno e descobrir que a circunstância que era considerada como tal não o é na realidade, chegasse à conclusão de que esse fenômeno não tem causa. Não, não é possível classificar tudo no relativo, assim como não é possível definir tudo e provar tudo. Para verificar o valor de um conceito qualquer, é necessário apelar a outro conceito que não precise ser definido; do mesmo modo, toda demonstração deve apoiar-se numa proposição fundamental que é considerada certa sem demonstração. Assim, em última análise, o relativo se apoia num absoluto independente. [...] O

³⁸ Transcrito de PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012, página 30.

³⁹ Transcrito de PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012, página 31.

⁴⁰ Transcrito de PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012, página 184.

⁴¹ Extraído de PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012, páginas 184 e 185.

absoluto é o ponto de partida fixo inelutável. A única questão é colocá-lo onde ele deve estar”. (PLANCK, 1924).

Sobre a forma de evolução da ciência, isto é, sobre o progresso da ciência, Planck afirmou que “Uma nova verdade científica nunca triunfa por conseguir convencer os adversários, mostrando-lhes a luz, mas porque esses adversários morrem e surge uma nova geração para a qual essa verdade é familiar.”⁴²As novas gerações estão mais disponíveis aos novos conceitos, mudanças e transformações. Planck considerava que na ciência existem conflitos entre os puristas⁴³ e aqueles que se esforçam para ampliar os axiomas, introduzindo novas ideias e buscando a direção em que o progresso da ciência é possível.

Os puristas contemporâneos de Planck não aceitavam ideias atomístico-mecanicistas e se opunham, filosoficamente, aos progressos da teoria atômica. Por exemplo, o físico e filósofo austríaco Ernest Mach (1838-1916), era considerado por Planck como sendo um purista, pois considerava que os atomistas se opunham ao progresso filosófico da física moderna. Planck se opunha ao pensamento positivista tão forte em sua época.

6.5 PLANCK COMO REFERÊNCIA DE HOMEM E CIENTISTA

A história da teoria atômica confunde-se com a história da teoria quântica. O conhecimento da mecânica quântica encontra a sua raiz no estudo da estrutura do átomo. O aprofundamento do saber sobre o mundo subatômico proporcionou o advento da teoria quântica. Mesmo sem ter um pensamento consciente sobre isso, Max Planck iniciava uma nova etapa na ciência, que foi ilustrada pelo entrelaçamento científico, cultural, filosófico e afetivo dos cientistas que escreveram esta história. Este entrelaçamento contribuiu para a construção das teorias atômica e quântica, na medida em que um cientista foi capaz de influenciar o outro e conseqüentemente o seu trabalho de pesquisa. Por trás da ciência há todo um contexto temporal, de época, de localização geográfica e de orientação. Há uma conexão entre a história interna, isto é, a influência que os cientistas exercem uns sobre os outros, e a história externa, isto é, a influência do espaço e do lugar, da cultura e da arte, do tempo e do passar do tempo.

⁴² Transcrito de PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012, página 30.

⁴³ Como “puristas”, Planck classificava os pesquisadores que se esforçam para por em ordem os axiomas existentes, analisá-los e libertá-los de todo elemento adventício ou acidental. Os puristas apenas admitem tudo o que decorre logicamente dos axiomas e rejeitam a intrusão de axiomas estranhos e novos, sobretudo se não estiverem condensados em fórmulas definitivas e de aplicação geral.

Os pilares da teoria quântica viveram e fizeram ciência na Europa da primeira metade do Século XX, marcada para sempre pelos efeitos nefastos de duas grandes guerras.

Em seu livro “A Parte e o Todo”, edição de 1996, Werner Heisenberg (1901-1976) – cientista a ser estudo em capítulos posteriores desta dissertação – registrou sua busca por Max Planck, na Berlim de 1933, para aconselhar-se sobre questões políticas e como se posicionar perante à iminência de uma guerra, já que Planck era mais velho e um homem confiável. Além da física, Heisenberg e Planck possuíam em comum a afinidade pelo piano. Planck, como símbolo científico da Alemanha, encontrou-se pessoalmente com Adolf Hitler (1889-1945) e então foi capaz de vislumbrar uma catástrofe sobre a vida acadêmica na Alemanha e sobre a própria Alemanha. Em verdade, a catástrofe foi muito pior do que ele imaginava, porque atingiu todas as partes, tratava-se da Segunda Guerra Mundial (1939-1945). Ao procurar Hitler, Planck pretendia argumentar contra a expulsão de cientistas judeus da Alemanha, mas foi em vão. Pelo contrário, constatou que a influência acadêmica na política era ínfima. Apesar de acreditar na proximidade dos piores presságios, Planck carregava consigo um sentimento otimista de possibilidade de reconstrução da Alemanha após a guerra. Dessa forma, o conselho de Planck para Heisenberg consistiu em avaliar sua permanência na Alemanha e buscar educar a juventude, formando um grupo íntegro, moralmente correto e disposto a trabalhar por uma nova Alemanha. Chama atenção o senso de justiça, empatia e humanidade de Max Planck. Na vida pessoal de Planck, o desfecho da Segunda Guerra implicou na morte de um filho – ele já havia perdido um filho na Primeira Guerra Mundial (1914-1918) – e no incêndio de sua casa em Berlim. Após a Guerra, Planck – já bastante idoso - e Heisenberg se uniram em Göttingen, a fim de reconstruir a jornada científica alemã. Planck e Heisenberg tornaram-se vizinhos, tinham o hábito de conversar sobre suas cercas do jardim e ouvir música de câmara juntos. Heisenberg e seus afins fundaram o Instituto Max Planck, após a morte de Planck.

Albert Einstein (1879-1955) admirava em Planck qualidades como paciência e persistência e reconhecia que seu contemporâneo se dedicava à ciência por amor, como se fosse uma necessidade da alma. Einstein resumiu⁴⁴ brilhantemente o feito de Max Planck: “Planck deu ao mundo uma grande ideia inovadora, que se tornou a base de toda a pesquisa em física

⁴⁴ Retirado da contracapa de PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012.

no século XX”. E sobre o homem Max Planck, Einstein escreveu⁴⁵: “Espero que o exemplo que brota de sua vida inspire as próximas gerações de cientistas”.

7 ALBERT EINSTEIN E O EFEITO FOTOELÉTRICO

7.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO

FIGURA 7 - Albert Einstein

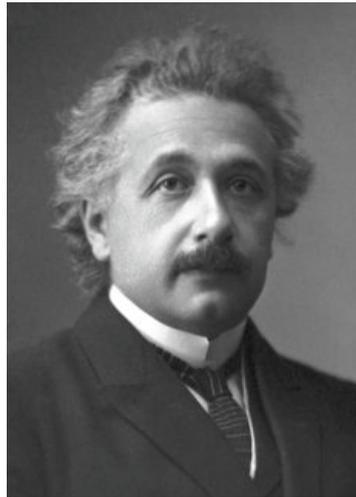


Foto retirada de <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/einstein/biographical/> Acesso em 29mar2019.

Albert Einstein, na figura anterior, nasceu em Ulm, Alemanha, em 1879. Faleceu em Princeton, Estados Unidos, em 1955. Formou-se, em 1901, pela Escola Politécnica Federal Suíça, em Zurique, como professor de física e matemática. O doutorado foi concluído em 1905. Trabalhou em Universidades em Zurique, Praga e Berlim. Foi professor na Universidade de Princeton, nos Estados Unidos, onde permaneceu até se aposentar, em 1945. Em 1916 publicou o artigo sobre a teoria da relatividade geral, que veio a ser a teoria mais famosa da ciência para o público em geral. Assim, como a teoria da relatividade, Einstein é o cientista mais conhecido das massas. Ganhou o Prêmio Nobel de Física em 1921.

Os seus trabalhos mais importantes incluem: Teoria da Relatividade Especial (1905); Teoria Geral da Relatividade (1916); Investigações sobre a Teoria do Movimento Browniano (1926) e a Evolução da Física (1938).

⁴⁵ Retirado de PLANCK, M.; Autobiografia científica e outros ensaios. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012, prefácio, página 14.

A contribuição de Einstein para a ciência foi vasta e grandiosa. Na presente dissertação, nos deteremos em examinar seu trabalho relacionado ao efeito fotoelétrico, bem como as implicações da sua produção no desenvolvimento da teoria quântica, como a hipótese dos *quanta* de luz.

Em 1905, Einstein publicou quatro artigos, no *Annalen der Physik*, revolucionários para o mundo da ciência, relatando sua pesquisa sobre a hipótese dos *quanta* de luz, assim como a aplicação da ideia de efeito fotoelétrico.

No artigo intitulado “On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light”, se a luz ocorre em pequenos pacotes (mais tarde chamados fótons), então deve arrancar elétrons de um metal, de uma maneira precisa. Assim, Einstein aplicou a teoria dos *quanta* à luz, para explicar o efeito fotoelétrico. Ele deduziu que a radiação eletromagnética consiste de partículas de energia $h\nu$, ou seja, é quantizada.

No artigo “On the Movement of Small Particles Suspended in Stationary Liquids Required by the Molecular-Kinetic Theory of Heat”, Einstein forneceu a primeira prova experimental da evidência dos átomos. Ao analisar o movimento de partículas minúsculas suspensas em água parada, chamado de movimento browniano, ele poderia calcular o tamanho dos átomos e o número de Avogadro.

No artigo “On the Electrodynamics of Moving Bodies”, Einstein apresentou a Teoria da Relatividade Especial.

Por fim, no artigo “Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy Content?”, ele apresentou a teoria que levava à equação $E = mc^2$.

7.2 PECULIARIDADES DO CAMINHO CIENTÍFICO DE EINSTEIN

Na sequência da publicação dos artigos supracitados, a comunidade científica internacional demonstrou interesse em conhecer quem era o respectivo autor. Segundo, Segrè (1980), alguns jovens e ousados cientistas decidiram ir à Berna⁴⁶ para saber quem era aquele Senhor Albert Einstein. Encontraram no escritório de patentes, um cientista boêmio, polido e

⁴⁶ Einstein demonstrava hostilidade, em relação à Alemanha Imperial. Completou seus estudos na Suíça, país pelo qual se apaixonou, adotando a cidadania daquele país, que manteve pelo resto da vida. Em 1902, a família de um grande amigo de estudos conseguiu-lhe uma colocação no escritório federal de patentes em Berna. Mais ou menos nesta época, casou-se com Mileva Maric, com quem teve dois filhos. O emprego no escritório de patentes foi bastante oportuno, porque lhe permitia tempo para dedicação aos problemas da ciência.

solícito a esclarecer suas próprias ideias. A partir daí, Einstein começou a corresponder-se com Planck⁴⁷ e as autoridades suíças proporcionaram-lhe trabalhar na Universidade de Berna. Passou pela Universidade de Zurique e pela Universidade Alemã de Praga. Einstein não se adaptou em Praga⁴⁸, pois tratava-se de um ambiente antisemita. Alguns anos depois, encontrou oportunidade de voltar à Suíça.

Em 1911, Einstein estava se tornando uma figura eminente na ciência europeia do século XX. Em 1912, Einstein aceitou trabalhar em Berlim. Planck foi pessoalmente convidá-lo, representando os grandes cientistas alemães que o queriam na Alemanha. Conforme elucidada, Segré (1980), Einstein anunciou sua decisão de forma pitoresca: saiu para dar um passeio, se ao retornar, portasse uma rosa vermelha, significava “sim”. Por outro lado, se portasse uma rosa branca, significava “não”. O fato é que retornou do passeio, trazendo, consigo, uma rosa vermelha. Apenas impôs a condição de manter a cidadania suíça, o que desagradou aos alemães. Apesar das boas condições de trabalho e salário, da companhia de bons colegas e dos atrativos de Berlim, Einstein mantinha a hostilidade ao Império Alemão e seu militarismo. Divorciou-se e casou-se novamente, desta vez com uma prima, com quem viveu o resto de sua vida.

Em 1914, ano em que foi deflagrada a Primeira Guerra Mundial, grandes nomes da ciência como Max Planck, assinaram um manifesto patriota de apoio aos militares. Eles consideravam as acusações dos Aliados contra o Império Alemão, como sendo exageradas. Contudo, tempos depois, arrependeram-se e como lição aprendida, não se envolveram nas argumentações pseudopatrióticas de Hitler. Diferentemente de seus colegas, Einstein não assinou o manifesto e cogitou um manifesto de oposição, o que lhe rendeu alguns inimigos, ainda que não tenha colocado o manifesto de oposição em prática.

A guerra terminou em 1918, com a derrota da Alemanha e a queda do imperador, fato este que Einstein não foi capaz de lamentar. A Nova República provocou esperança de democratização, porém era fraca e ineficiente.

Em 1919, a Teoria da Relatividade Geral já era respeitada e a popularidade de Einstein se fazia reluzente. Era tratado como astro de cinema ou animador de auditório - nas palavras de Segrè (1980) – possuía relações de amizade com personalidades célebres como artistas, médicos, cientistas e políticos.

⁴⁷ Conheceu Planck, pessoalmente, em 1909, em uma reunião realizada em Salzburgo.

⁴⁸ Àquela época, Praga pertencia à Áustria dos Habsburgos.

Não se opunha a representar o papel do grande cientista e era evidente que gostava disso. Talvez esse fato explique algumas de suas afetações, sua maneira estranha de vestir-se e alguns hábitos que podem ter sido um tanto exibicionistas. Afinal de contas, era admirador e amigo de Charles Chaplin. (SEGRÈ, 1980).

Por outro lado, despertou o ódio sem qualquer motivo aparente. Nas palestras públicas que era convidado a fazer, era interrompido por inimigos políticos e reagia a tal oposição de forma inadequada e inadvertida. Os extremistas chegavam a assassinar seus inimigos, de modo a antecipar o que viria pela frente com o nazismo.

Por ocasião do nazismo, emigrou da Alemanha e estabeleceu-se nos Estados Unidos da América, até o final de sua vida.

7.3 A CONTRIBUIÇÃO DE EINSTEIN À CIÊNCIA

Segundo Singh (2005), Einstein foi um dos protagonistas na evolução da teoria quântica, embora este fato seja pouco divulgado. Mais do que isso, Singh considera Einstein como um dos fundadores da teoria quântica, juntamente com Max Planck. Corroborando, Niaz et. Al. (2010), afirmou que T. Kuhn (1978) considerou que não foi Planck, mas Einstein (1905) quem iniciou a revolução quântica.

Por outro lado, para Glauber (2007), a história da teoria quântica começa, realmente, com Max Planck. E a próxima grande inovação veio, em 1905, do jovem Albert Einstein.

Não há uma formalidade que atribua regras, posses e classificações, no que se refere ao cientista formulador da teoria quântica, ou ainda, qual cientista contribuiu mais ou ofereceu maiores feitos. Conforme já visto, Planck, em 1900, sintetizou a hipótese dos *quanta* de ação, no contexto da radiação de um corpo negro. Em seguida, em 1905, Einstein sintetizou a hipótese dos *quanta* de luz. Sendo assim, o primeiro a usar a expressão *quanta* e sinalizar um *breakthrough* científico foi Max Planck.

Na narrativa de Cassidy (2005), em 1900, Max Planck derivou uma lei para a distribuição de frequência da energia térmica, ou corpo negro, radiação contida em uma cavidade material de paredes perfeitamente refletíveis. Ele assumiu que a densidade de energia é dividida em elementos de energia discretos, distribuídos por um grande número de osciladores harmônicos carregados, em equilíbrio com a radiação térmica. Em seus artigos subsequentes,

Einstein mostrou, em 1906, que a teoria de Planck concordava com a hipótese dos *quanta* de luz.

A teoria de Planck dos *quanta* de ação e a teoria de Einstein dos *quanta* de luz não poderiam se conciliavam com as leis do movimento de Newton e também com a teoria eletromagnética de Maxwell.

Anteriormente ao trabalho de Einstein, a luz visível monocromática era considerada uma onda. Assim, propriedades como difração, interferência e polarização podiam ser explicadas.

Entre 1898 e 1912, a maioria dos físicos pensava que os raios X eram impulsos que se propagam através do campo eletromagnético, e isto era considerado compatível com a teoria ondulatória da luz. O efeito fotoelétrico é geralmente considerado um subproduto da demonstração experimental de ondas eletromagnéticas de Hertz (1887). Hertz (1883) já havia proposto que os raios catódicos eram um tipo de onda no éter semelhante à luz. Mais tarde, Thomson (1897) mostrou conclusivamente que os raios catódicos consistiam de partículas (elétrons). (NIAZ et. Al., 2010).

Einstein observou que a previsão inequívoca da eletrodinâmica e o teorema da equipartição para os osciladores de material é aquele dado pela lei da radiação, agora chamada de "Lei Rayleigh-Jeans". Ele derivou a lei da radiação da física clássica, obtendo uma constante numérica apropriada. Os resultados experimentais não estavam em acordo com a lei da radiação, levando a crer na falha da física clássica. Ao pesquisar a causa da falha, elucubrou que a radiação, assim como a matéria, também deveria ser tratada como discreta e particulada⁴⁹. Assim, Einstein propôs a sua hipótese dos *quanta* de luz.

De acordo com Niaz et. Al. (2010), Einstein propôs que a luz comum se comporta como se fosse um fluxo de unidades de energia independentes localizadas que ele chamou de *quanta* de luz.

Cassidy (2005) descreve o trabalho de Einstein da seguinte maneira: em 1905, foi o primeiro a propor que a luz se comporta, em determinadas circunstâncias, como se consistisse em unidades localizadas ou *quanta* de energia – *quanta* de luz. Ele mostrou que essa hipótese poderia explicar vários fenômenos, incluindo, em especial, o efeito fotoelétrico.

⁴⁹ Na física clássica, a matéria é discreta e particulada, enquanto a radiação é contínua e ondulatória. Fonte: Singh, V. (2005).

Já Wheeler (1980), descreve o trabalho de Einstein assim: a energia da luz é levada de um lugar para outro como *quanta* de energia.

É importante salientar que, segundo Singh (2005), Einstein defendia que a teoria ondulatória da luz, utilizada pela física clássica, estava correta quando aplicada unicamente ao fenômeno óptico.

Na propagação de um raio de luz emitido por uma fonte pontual, a energia não é distribuída continuamente em volumes cada vez maiores de espaço, mas consiste em um número finito de *quanta* de energia, localizados em pontos do espaço, que se movem sem se dividir, e podem ser absorvidos ou gerados como unidades completas. (EINSTEIN, 2005).

Dada a compreensão da hipótese dos *quanta* de luz, Einstein aplicou-a ao tratamento do efeito fotoelétrico. Por sua vez, o efeito fotoelétrico consiste em incidir luz sobre metais, causando faíscas elétricas, devido à emissão de elétrons. A luz monocromática incidindo em superfícies metálicas impulsiona elétrons dos metais, mas somente se a frequência da luz exceder um certo valor limiar característico de cada metal.

Examinando o efeito fotoelétrico, que foi primeiro observado por Heinrich Hertz (1857-1894) em 1887, Einstein propôs uma explicação para o seguinte fato: esperava-se que ao incidir luz mais fortemente sobre os metais, os elétrons escapariam mais rapidamente. Porém, não era isso que acontecia. No máximo, aumentava o efeito fotoelétrico. Assim, a explicação, segundo Glauber (2007), se estruturava na assertiva de que a luz consiste em pacotes de energia localizados. Quando a luz atinge o metal, cada pacote é absorvido por um único elétron. Cada elétron escapa com uma energia única, uma energia que é apenas a energia do pacote $h\nu$ menos a energia que o elétron precisa gastar para escapar do metal.

Sobre a equação fotoelétrica de Einstein para a energia do elétron ε , Singh (2005) explica que um *quantum* de luz, com energia $h\nu$, colidindo com um elétron em um metal fornece sua energia para ele. Um elétron no interior de um metal precisa realizar trabalho, W , para escapar do interior da superfície. Desse modo é permitido chegar à equação que fornece o máximo da energia fotoelétrica que pode ser oferecida, considerando que o elétron pode perder energia ao escapar da superfície: $\varepsilon = h\nu - W$. Conforme pode ser observado por esta equação, o efeito fotoelétrico não depende da intensidade da luz, porém depende da frequência da luz. Atualmente, um *quantum* de luz é denominado como fóton.

Em resumo, quando um elétron salta subitamente de um valor estacionário de energia para outro menor, ele emite a diferença energética como um pacote de energia, o chamado *quantum* de luz.

Em 1922, o físico norte-americano Arthur Holly Compton (1892- 1967) confirmou as enunciações de Einstein sobre os *quanta*, ao descobrir que os raios X eram espalhados por elétrons livres como partículas com uma energia $h\nu$.

Para Singh (2005), além das contribuições já mencionadas, Einstein incorporou os seguintes objetos à física quântica:

1. Teoria do calor específico de sólidos, que foi a primeira aplicação da teoria quântica para a matéria;
2. Identificação da dualidade partícula-onda para a luz;
3. Coeficientes A e B de Einstein relacionados às probabilidades de emissão e absorção da luz por sistemas atômicos e identificação da emissão estimulada da radiação da luz, que fornece a base para a ação laser;
4. Estatística quântica e sua predição da condensação Bose-Einstein de um gás bóson.

7.4 O ENTRELAÇAMENTO EINSTEIN-CÍRCULO DE COPENHAGE

Heisenberg em “A Parte e o Todo” relatou uma conversa que teve com Einstein, na Universidade de Berlim de 1926. Heisenberg foi palestrante convidado para o tradicional Colóquio da Física. O objetivo era discorrer sobre a nova mecânica quântica. Heisenberg atraiu o interesse de Einstein de tal forma que este o convidou para uma caminhada, enquanto discutiam ideias. Einstein considerava “estranho” que Heisenberg preconizasse a hipótese de elétrons no átomo, porém não levasse em conta as órbitas dos elétrons. O interessante é que Einstein indagou sobre os pressupostos filosóficos do trabalho de Heisenberg, ficando evidente a interação ciência-filosofia, para o surgimento de novas teorias. A base filosófica da discussão girou em torno da restrição ou não de aplicar-se apenas grandezas diretamente observáveis na construção de uma teoria. Einstein defendia ser um grande erro tentar fundamentar uma teoria apenas nas grandezas observáveis, porque isso seria uma premissa da teoria. Para Einstein, era a teoria que ditava o que poderia ser observado. E ainda mais, somente a teoria, ou seja, o conhecimento das leis naturais permitiria que, partindo de impressões sensoriais, se pudesse deduzir fenômenos. Pode-se notar, assim, pensamentos distintos no âmbito da filosofia da ciência e também da ciência propriamente dita. Dessa forma, a discussão caminhou para o

pensamento do físico e filósofo positivista Ernest Mach (1838-1916) e o seu princípio da economia do pensamento⁵⁰. A comunidade científica atribuía a Einstein o hábito de desenvolver o seu trabalho, utilizando o pensamento machiano, porém ao discutir pessoalmente com Einstein, Heisenberg notou exatamente o contrário. Então, Einstein explicou que considerava o princípio machiano de economia do pensamento⁵¹ simplório demais, embora reconhecesse o seu mérito. Em defesa da mecânica quântica, Heisenberg retrucou que ainda não havia uma linguagem adequada, além da linguagem matemática já estabelecida, que descrevesse os processos subatômicos. Entre divergências epistemológicas de opiniões, o fato é que a mecânica quântica ainda não podia ser completamente compreendida, e ainda nos tempos atuais perduram dúvidas capciosas.

Embora o papel de precursor que Einstein divide com Planck seja da mais alta relevância, Einstein não acompanhou com credulidade a interpretação do Círculo de Copenhague – teoria quântica proposta por Bohr e seus colaboradores - sobre o comportamento da matéria. Einstein não só desacreditou, como argumentou e se posicionou contra seus contemporâneos Niels Bohr e Werner Heisenberg. Há registrado na história, um texto formal publicado em 1935 por Einstein - e colaboradores - manifestando seu posicionamento sobre a mecânica quântica. Em seguida, no mesmo ano de 1935, Niels Bohr respondeu, contra-argumentando e enfatizando a interpretação de Copenhague. Esse episódio ficou conhecido na história da ciência como “Debates Einstein-Bohr”. Trata-se de posicionamentos antagônicos sobre questões científicas, mas também epistemológicas.

Em 1927, conforme eternizado nas três próximas figuras, ocorreu o Quinto Congresso Solvay⁵², em Bruxelas, onde as discussões sobre os fundamentos da teoria quântica se intensificaram. Foi estabelecida uma oportunidade de fórum com o tema central “Elétrons e Fótons”. De acordo com os relatos de Heisenberg, todos os cientistas se hospedaram no mesmo hotel e os debates aconteciam, ininterruptamente, tanto nas conferências, como nas refeições. Segundo Brown (1981), Einstein defendia que a mecânica de ondas representa uma descrição incompleta ou "estatística" de um sistema só, deixando aberta a questão da possibilidade de um

⁵⁰ Essa doutrina sustenta que as leis científicas e os termos de classe abstrata são ferramentas para compilar e organizar a experiência por meio do menor número possível de conceitos, um domínio que é útil para a previsão e controle de eventos. Conceito extraído de Banks, E.

⁵¹ A escolha entre hipóteses igualmente plausíveis e relativas ao mesmo fato.

⁵² A primeira série de conferências do Conselho Solvay sobre radiação e *quanta* ocorreu em 1911. O nome Solvay era uma homenagem à Ernst Solvay, o inventor do método industrial de preparação de carbonato de sódio. Solvay instituiu e financiou uma série de encontros internacionais sobre física, com temas preestabelecidos, para os quais se convidavam os grandes físicos relacionados à área escolhida. As conferências, limitadas a cerca de trinta pessoas, tinham lugar em Bruxelas. Descrição encontrada em Segrè (1980), página 93.

mecanismo causal que governe o comportamento do sistema individual. Einstein refutava o princípio da incerteza, bem como o caráter estatístico atribuído à teoria quântica. Nas discussões com seus colegas, Einstein afirmava, incessantemente, que “Deus não joga dados”. Bohr defendia o princípio da correspondência e o conceito de complementaridade, de modo que retrucava da seguinte maneira: “Não deve ser tarefa nossa prescrever a Deus como Ele deve reger o mundo”. O princípio da correspondência, basicamente, consiste no uso dos conceitos clássicos familiares para descrever o mundo quântico e sua outra utilização consiste na situação em que o mundo macro e o mundo quântico se fundem. O conceito de complementaridade consiste em interpretar fenômenos que seriam considerados contraditórios, como a dualidade onda-partícula, como possíveis. Por exemplo, a contradição é evitada, ao perceber-se que matéria e energia não se comportam como onda e partícula ao mesmo tempo, no mesmo experimento.

FIGURA 8 - Os maiores nomes da ciência reunidos no Quinto Congresso de Solvay.

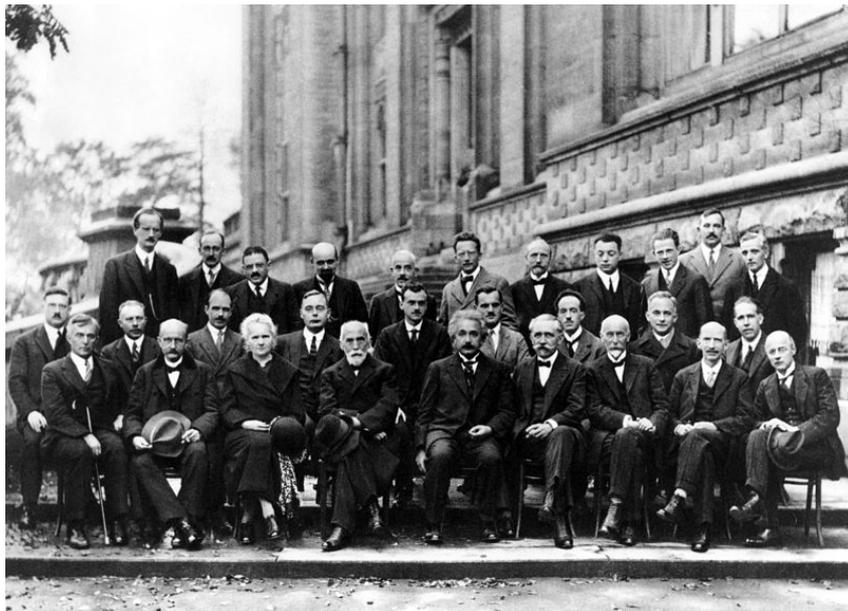


Foto retirada de https://en.wikipedia.org/wiki/File:Solvay_conference_1927.jpg Acesso em 20jul2019.

FIGURA 9 - Einstein e Bohr no Quinto Congresso de Solvay.



Foto retirada de: <https://www.uh.edu/engines/epi2627.htm> Acesso em 24jul2019.

FIGURA 10 - Niels Bohr e Albert Einstein descansando no Quinto Congresso de Solvay Congress.



Foto retirada de: AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS / GETTY IMAGES / <https://cosmosmagazine.com/physics/einstein-bohr-and-the-origins-of-entanglement> Acesso em 20jul2019.

Em 1930, houve o Sexto Congresso Solvay, mais uma nova oportunidade de encontros e debates entre os cientistas do século XX, mais uma oportunidade para Einstein e Bohr confrontarem suas visões da mecânica quântica. Para Forrester (2018), a leitura de Einstein era ontológica e a leitura de Bohr era epistemológica, pois Bohr estava interessado no que se pode conhecer e nas condições para a comunicação inequívoca das observações do mundo quântico.

Em seu texto de 1935, Einstein afirmou que a mecânica quântica descreve de forma incompleta a realidade física. Para Einstein, em uma teoria completa há um elemento correspondente a cada elemento da realidade. Além disso, ele defendia que uma grandeza física deve ser descrita com precisão, sem perturbações no sistema, contrariando assim a Escola de Copenhague. Ele escreveu: “ (1) a descrição da realidade dada por uma função de onda na mecânica quântica não está completa ou (2) essas duas quantidades não são reais simultaneamente”. Sua conclusão foi: “a descrição da realidade como dada pela função de onda não é completa”. Einstein afirmou que os elementos de uma teoria física não podem ser determinados *a priori* por considerações filosóficas, e sim por resultados de experimentos e medidas. Manifestando essa opinião, Einstein mostrou-se influenciado pela corrente positivista de sua época. Ele escreveu: “Se, sem qualquer modo perturbar um sistema, nós podemos prever com certeza (com probabilidade igual à unidade) o valor de uma grandeza física, então há um elemento da realidade física correspondendo à grandeza física”.

Em contrapartida, a resposta de Bohr foi fundamentada no fato de que a aplicação dos critérios de Einstein para os fenômenos quânticos era ambígua, tendo em vista que ele não aplicou o conceito de complementaridade, que parece cumprir, no seu âmbito, todas as exigências racionais de completude, conforme ele mesmo escreveu. Bohr propôs a renúncia final ao clássico ideal de causalidade e uma revisão radical de nossa atitude em relação ao problema da realidade física.

O debate Einstein-Bohr terminou apenas com a morte de Einstein, em 1955. Einstein, utilizando experimentos mentais, não concordava com a Interpretação de Copenhague, que apontava a ideia de um universo dependente do observador. Os experimentos mentais de Einstein consistiam em medir, teoricamente, propriedades, como posição e momento de uma partícula; a energia de uma partícula em um determinado ponto no tempo; observar o comportamento de partícula e onda ao mesmo tempo. Se essas medidas fossem alcançadas na prática, significaria que a ideia de complementaridade de Bohr e o princípio da incerteza de Heisenberg estariam equivocados.

Segundo Forrester (2018), Bohr foi capaz de responder a todas as objeções de Einstein e por isso é geralmente considerado como vencedor do debate. Contudo, o debate continua no tempo presente, visto que nenhuma das alternativas são consideradas totalmente plausíveis.

8 NIELS BOHR E O MODELO ATÔMICO SEMIQUÂNTICO

8.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO

FIGURA 11 - Niels Bohr



Foto retirada de The Nobel Prize in Physics 1922. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2019. Thu. 23 May 2019. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1922/summary/>

Niels Henrik David Bohr, na figura anterior, nasceu na cidade de Copenhage, Dinamarca, no ano de 1885. Faleceu em 1962, também em Copenhage. Seu pai foi Professor da Universidade de Copenhage, proporcionando a Niels e seu irmão uma excelente educação e incentivo ao estudo das ciências. Niels formou-se em física na Universidade de Copenhage. Caracterizou-se por ser um cientista teórico.

Em 1911, teve a oportunidade de frequentar o Laboratório Cavendish, em Cambridge, coordenado por J. J. Thomson. Em 1912, outra grande experiência, foi trabalhar no laboratório do Professor Rutherford, em Manchester.

Após realizar um trabalho teórico sobre a absorção de raios alfa, publicado na *Philosophical Magazine*, em 1913 iniciou seus estudos da estrutura dos átomos, com base na identificação de Rutherford do núcleo atômico. Utilizando conceitos da teoria quântica estabelecida por Max Planck, apresentou, ao meio científico, uma imagem da estrutura atômica que, com contribuições posteriores, ainda serve adequadamente como uma elucidação das propriedades físicas e químicas dos elementos.

Alguns anos após seu retorno para a Universidade de Copenhage, fundou e coordenou o Instituto de Física Teórica. Além do seu modelo atômico, contribuiu para a física quântica desenvolvendo o conceito de complementaridade.

Recebeu o Prêmio Nobel, em 1922. Dedicou-se à aplicação pacífica da física atômica e aos problemas políticos decorrentes do desenvolvimento de armas atômicas.

8.2 O ENTRELAÇAMENTO BOHR-RUTHERFORD E BOHR-THOMSON

No verão de 1912, Bohr submeteu um manuscrito de sete páginas à Rutherford - “Rutherford Memorandum” -, onde segundo Schwarz (2013), o cientista dinamarquês “suruiu com um modelo atômico de um núcleo pesado cercado por elétrons em órbita. Ele aplicou teorias clássicas da mecânica e eletrodinâmica, tanto quanto consistente com os fatos, e acrescentou suposições *ad hoc* onde necessário para reproduzir a estabilidade atômica observada e transições radioativas discretas”. Embora hesitante em aceitar as visões ousadas de seu pupilo, Rutherford apoiou o jovem estudioso.

Segundo Schwarz (2013), o “Rutherford Memorandum” foi escrito em inglês, porém com muitos erros. De acordo com o próprio Bohr, Rutherford leu o texto cuidadosamente e com “paciência angelical”. Rutherford propôs mudanças de gramática, como por exemplo, não começar todos os parágrafos usando o termo “contudo”; sugeriu evitar repetição; sugeriu reduzir o comprimento (a versão subsequente de Bohr foi ainda mais longa).⁵³

Bohr era um escritor exigente ao extremo consigo mesmo. Escrevia e reescrevia um documento inúmeras vezes. Mudava, transformava, esclarecia, melhorava, aprimorava, e finalmente encaminhava à publicação. Quando, então, as provas retornavam para si, reescrevia o texto, para desespero do editor.

Foi no laboratório de Rutherford em Manchester, que Bohr, como visitante, promoveu uma espécie de revolução sobre a teoria atômica. Anteriormente, em 1911, Bohr trabalhou com J. J. no Laboratório Cavendish. Foi recebido gentilmente, porém J. J. não pôde lhe proporcionar a devida atenção. Rutherford e Bohr tornaram-se amigos íntimos por toda a vida.⁵⁴

A teoria de Bohr tem como raízes as teorias de Rutherford e J. J. Thomson. Sobre seu entrelaçamento inicial com J. J. Thomson, no laboratório Cavendish, em Cambridge, Bohr descreveu em uma carta para seu irmão Harald, em setembro de 1911:

⁵⁴ Informações de entrelaçamento entre Bohr e Rutherford extraídas do texto de Regato J. A., citado na referência bibliográfica.

Eu acabei de falar com J. J. Thomson [...] e expliquei a ele tão bem quanto possível minhas ideias sobre radiação, magnetismo, etc. Você deve saber o que significou para mim falar a ele. Ele foi muito atencioso comigo; nós falamos sobre diversas coisas; e creio que ele pensa existir alguma coisa naquilo que eu disse. Ele prometeu ler minha tese, e me convidou para jantar com ele no próximo sábado no Triniy College, quando ele falará comigo sobre isso [...] Eu não posso lhe dizer como estou feliz e agradecido que minha dissertação [tese] foi concluída e eu pude entregá-la a Thomson”. (*apud*, LOPES, 2009).

Uma hospitalidade gentil, disponível e acolhedora não significa ideais científicos convergentes. Não houve registros de laços de amizade entre Bohr e J. J. Em contrapartida, o elo científico e de afeto estabelecido com Rutherford permaneceu até o final da vida deste último. O laço científico e amistoso se iniciou quando Rutherford visitou Cambridge, em 1911, e Bohr apresentou simpatia por seu trabalho e personalidade. Sem o reconhecimento de J. J., Bohr decidiu transferir-se, em abril de 1912, para Manchester, visando a trabalhar com Rutherford. Nas palavras de Mukunda (2013), Bohr desenvolveu a versão quântica do modelo atômico de Rutherford.

Conforme, Schwarz (2013) explica, Bohr em seu *memorandum*, corrigiu a física clássica, utilizando conceitos quânticos. No modelo de átomo vigente até então, em contraste com o modelo de Thomson, anéis de elétrons atraídos por uma carga pesada central são mecanicamente estáveis apenas na presença de uma força centrífuga rotacional cinética. Para qualquer sistema estável mantido unido pelas forças de Coulomb (bem como gravitacionais), impõe-se uma relação estrita entre a energia total E e sua energia cinética E_{kin} e também potencial E_{pot} , isto é: $E = E_{kin} + E_{pot}$. Daí derivam dois problemas, um de natureza mecânica e outro de natureza eletromagnética. Foi então que Bohr introduziu o conceito de quantização do momento angular. Em segundo lugar, uma carga rotativa emitiria radiação de acordo com a eletrodinâmica clássica, e o elétron em órbita cairia no núcleo dentro de nanossegundos. A premissa não-clássica da quantização do momento angular assegurou a estabilidade dos anéis eletrônicos. Além disso, Bohr afirmou que os elétrons atômicos não emitiriam radiação eletromagnética, de acordo com a teoria clássica. Em vez disso, a radiação não-clássica discreta deve ocorrer de acordo com o princípio de Rydberg–Ritz (1888/1908) e com as fórmulas de Planck–Einstein, isto é: $E_{initial\ orbit} - E_{final\ orbit} = E_{rad} = h\nu_{rad}$. Em sua estadia no laboratório de Rutherford, Bohr concebeu a ideia de quantização de ambos o movimento estacionário e a radiação eletromagnética dos elétrons.

Rutherford, embora manifestasse críticas ao *memorandum* e à premissa de quantização, cumpriu seu papel de mestre ao auxiliar Bohr na melhoria de seu texto. Por sua vez, J. J. Thomson refutou o trabalho de Bohr.

Segundo Mukunda (2013), foi em Manchester que Bohr percebeu que o modelo atômico de Rutherford levaria à explicação das propriedades dos elementos químicos e da estrutura da tabela periódica, com o comportamento dos elétrons determinando toda a química.

Anos mais tarde, Bohr condensou a seguinte visão sobre seus predecessores:

O ponto de partida da moderna física atômica, como se sabe, foi o reconhecimento da natureza atômica da própria eletricidade, inicialmente apontada pelas famosas pesquisas de Faraday com a eletrólise galvânica, e estabelecida em definitivo pelo isolamento do elétron nos belos fenômenos de descargas elétricas em gases rarefeitos, que tanta atenção suscitaram no fim do século passado. Embora as brilhantes pesquisas de J. J. Thomson cedo tenham trazido à luz o papel essencial desempenhado pelos elétrons nos mais variados fenômenos físicos e químicos, nosso conhecimento das unidades estruturais da matéria só foi completado com a descoberta do núcleo atômico por Rutherford, coroando seu trabalho pioneiro sobre as transmutações radioativas espontâneas de certos elementos pesados. De fato, essa descoberta forneceu, pela primeira vez, uma explicação incontestável para a invariabilidade dos elementos nas reações químicas comuns, nas quais o minúsculo núcleo pesado permanece inalterado, enquanto apenas a distribuição dos elétrons, mais leves, ao seu redor é afetada. (BOHR, 1957).

8.3 A CONTRIBUIÇÃO DE BOHR À CIÊNCIA

Conforme mencionado anteriormente, a publicação de três artigos feita por Bohr – trilogia de Bohr -, em 1913, na *Philosophical Magazine*, sob o título de “On the Constitution of Atoms and Molecules”, foi um marco na ciência atômica. Tratava-se da publicação de seu modelo atômico, o que mais tarde lhe conferiu o Prêmio Nobel. Bohr pronunciou-se sobre a estrutura física e espectro dos átomos, a ordem periódica dos elementos e as ligações químicas.

O primeiro artigo focou o átomo de hidrogênio e seu espectro. O segundo artigo focou átomos com diversos elétrons. E, por fim, o terceiro artigo fez menção às ligações químicas.

Lopes (2009) explica que Bohr iniciou suas argumentações sobre os modelos disponíveis no período, deixando clara sua escolha pelo modelo de Rutherford, em detrimento ao modelo de Thomson.

A partir do modelo atômico de Rutherford e adicionando suas contribuições, Bohr propôs a Teoria da Constituição dos Átomos e a Teoria da Constituição de Moléculas. Bohr observou que, diferente do modelo de Rutherford, no modelo atômico de J. J. Thomson, as configurações e movimentos dos elétrons permaneciam em um equilíbrio estável. Bohr tinha excelente capacidade de identificar falhas em teorias, desenvolvendo assim um método próprio. Este método, de acordo com Kennedy (1985) consistia em coletar exemplos de falhas, examiná-las minuciosamente, e reter aquilo que para ele parecia incorporar a mesma falha. Então, criava uma hipótese para corrigir a falha, mantendo a teoria para cobrir partes da experiência em que ele trabalhava e também partes em que nem ela nem a nova hipótese poderiam explicar.

Além de possuir um bom método, Bohr estava atento a muitos outros indícios, como:

1. Entre as quantidades que caracterizam o átomo de Thomson, uma quantidade aparece - o raio da esfera positiva - de dimensões de comprimento e da mesma ordem de grandeza que a extensão linear do átomo, enquanto tal o comprimento não aparece entre as quantidades que caracterizam o átomo de Rutherford. (Bohr, 1913)⁵⁵.
2. Implicações da radiação e do efeito fotoelétrico.

Sendo assim, Bohr constatou que “a eletrodinâmica clássica era inadequada para descrever o comportamento do sistema do tamanho do átomo”.

Bohr, para melhorar, adaptar ou corrigir o modelo atômico de Rutherford, considerou a introdução de um novo argumento, isto é, o *quantum* elementar de ação, de Planck.

Para elaborar a Teoria da Constituição de Átomos e Moléculas, Bohr se utilizou do trabalho de Planck sobre radiação de um corpo negro em adição ao trabalho de Rutherford sobre dispersão de partículas alfa. Bohr constatou que ambas as teorias guardavam forte relação entre si. Por sua vez, pode-se dizer que o trabalho de Rutherford foi aprimorado por Bohr. Neste contexto, Bohr, no intuito de aprimorar a teoria de Rutherford, baseou-se nas seguintes conclusões:

⁵⁵ Niels Bohr, “On the constitution of atoms and molecules”, *Philosophical Magazine* [6] 26 (151, julho 1913): 1-25, na p.1.

1. O equilíbrio dinâmico dos sistemas no estado estacionário é governado por leis ordinárias da mecânica, enquanto essas leis não incluem a passagem de sistemas entre diferentes estágios estacionários.
2. A radiação não é emitida ou absorvida de modo contínuo, como é sabido na eletrodinâmica clássica, mas apenas durante a passagem de sistemas entre diferentes estados estacionários.
3. A radiação emitida durante a transição entre dois estágios estacionários diferentes é homogênea e a relação entre a frequência ν e a quantidade total de energia emitida E é dado por $E=h \nu$, onde h é a constante de Planck.
4. A diferença entre diferentes estados estacionários de um sistema simples consistindo de um elétron circulando em torno de um núcleo positivo é determinado pelas condições da razão entre a energia total, emitida durante a formação de configuração, e a frequência de revolução, isto é, um múltiplo de $h/2$. Assumindo que a órbita do elétron é circular, assume-se que o momento angular do elétron em volta do núcleo é igual a um múltiplo de $h/2\pi$.
5. O estado permanente de qualquer sistema atômico, por exemplo, o estado em que a energia emitida é máxima, é determinado pela condição que o momento angular de cada elétron em volta do centro de sua órbita é igual a $h/2\pi$. (Bohr, 1913).

Na condição de estado estacionário, a mecânica clássica deve ser aplicada. Entretanto, ela não é válida durante a transmissão de energia entre diferentes estados estacionários.

Até o questionamento de Bohr, defendia-se que os elétrons se moviam, na forma de anéis, em torno do núcleo. Contudo, com o conhecimento da eletrodinâmica clássica, esse sistema não poderia ser explicado, de modo que se obtivesse um anel estável. Aplicando-se a teoria da radiação de Planck, era possível desconstruir este sistema, no que diz respeito à frequência e dimensões.

Ao tentar desenvolver uma teoria que explicasse todos os átomos e moléculas, Bohr foi bem-sucedido nas seguintes questões: derivação da constante de Rydberg; espectro do H e do He^+ ; energias dos orbitais nos átomos; interpretação do espectro dos raios X de todos os elementos; divisão de linhas atômicas por campos, etc. No curso do tempo, o trabalho de Bohr promoveu a compreensão das leis da espectroscopia.

Nas palavras de Schwarz (2013):

Os fundamentos da física clássica foram concluídos com a eletrodinâmica de Maxwell e a termodinâmica estatística de Boltzmann nas décadas entre 1860 e 1890. Durante esse período, entretanto, a espectroscopia física e as investigações químicas começaram a produzir um grande corpo de dados referentes a átomos e moléculas que desafiaram a explicação pela teoria clássica. (SCHWARZ, 2013)

A postura e sabedoria de Bohr quanto ao aspecto epistemológico da ciência, consistiu em perceber que a física clássica era necessária, sólida e deveria permanecer como explicação para os fenômenos da natureza. Entretanto, ele incorporou fatos quânticos experimentais à teoria clássica do contínuo, apenas onde esta mostrou-se inadequada ou incorreta.

O destaque no trabalho de Bohr consiste em explicar a estabilidade do átomo de Rutherford. De acordo com o filósofo da ciência Lakatos (1970): “O problema de Bohr não foi explicar as séries de Balmer e de Paschen, mas explicar o paradoxo da estabilidade do átomo de Rutherford. Além disso, Bohr não havia ouvido ainda essas fórmulas antes de escrever sua primeira versão do artigo”. (*apud*, NIAZ, 1998).

O modelo atômico de Bohr sofreu um processo de atualização pelo cientista alemão Arnold Sommerfeld (1868-1951). Bohr quantizou apenas uma dimensão do movimento eletrônico, enquanto Sommerfeld obteve três números quânticos, a saber, o principal, o momento angular e o direcional.

Para Schwarz (2013), a principal desvantagem do modelo atômico de Bohr foi que valores precisos para as energias de órbita não poderiam ser obtidos teoricamente para qualquer átomo de muitos elétrons. Seu modelo trabalhou apenas no nível qualitativo; isto é, poderia ser usado para extrair energias de órbitas confiáveis a partir de espectros atômicos experimentais estruturados.

Com o advento da mecânica ondulatória, os modelos atômicos planetários caíram em desuso. Após doze anos, o modelo atômico de Bohr foi suplantado pela mecânica quântica, que por sua vez foi reconhecida como prioridade nas discussões do Círculo de Copenhague.

O sucesso da mecânica clássica desenvolvida por Newton levou a comunidade científica a aplicá-la para o mundo micro. Entretanto, a partir de Bohr foi possível constatar que uma nova ciência despertaria para explicar o microcosmo. Bohr colocou-se em uma posição intermediária, em outras palavras, o modelo atômico de Bohr é semiquântico. Bohr pode ser considerado a fronteira ou limite entre o clássico e o quântico. Para corroborar, encontramos a

afirmação de Bohr: “...evidente impossibilidade de explicar os dados físicos e químicos comuns, com base nos já estabelecidos aspectos principais do modelo atômico de Rutherford, sem nos afastarmos radicalmente das ideias clássicas da mecânica e do eletromagnetismo”. (BOHR, 1957).

8.4 O INSTITUTO BOHR

O trabalho de Bohr de desenvolver um modelo atômico clássico com nuances quânticas, ou de desenvolver um modelo atômico quântico, envolvendo a mecânica clássica, teve como cenário a Primeira Guerra Mundial. Ainda assim, foi um trabalho de intercâmbio internacional, que sofreu influências tanto do empirismo inglês, como dos círculos teóricos germânicos, além de outros países da Europa, Japão e Estado Unidos.

Segrè (1980) narra a construção do Instituto Bohr, em Copenhague, da seguinte maneira: O átomo de Bohr precedeu a Primeira Guerra Mundial de apenas alguns meses. A Dinamarca conseguiu permanecer neutra, mas Bohr simpatizava com a causa das Potências Aliadas. Tinha um cargo de segundo escalão e relativamente sem importância em Copenhague e, em 1916, assumira um outro no laboratório de Rutherford em Manchester, onde ficou até 1919, quando foi chamado de volta à Dinamarca, onde lhe ofereceram uma cátedra de física teórica. Bohr sempre mantivera estreito contato com físicos experimentais e esforçou-se por conseguir um laboratório associado à sua cátedra. Após a guerra, conseguiu realizar o que desejava e um novo instituto foi construído em Copenhague. De início, Bohr morou no próprio instituto. Mais tarde, em 1932, os Bohr foram a primeira família convidada a ocupar a “Casa de Honra”, uma mansão construída por J. C. Jacobsen, o fundador da famosa Cervejaria Carlsberg. (SEGRÈ, 1980).

Após a Primeira Guerra, Bohr e seu Instituto desempenharam papel de reconciliação na comunidade científica polarizada entre os alemães e aqueles que apoiaram os aliados. Bohr promovia conferências intimistas em seu Instituto. Convidava tanto cientistas famosos, como jovens cientistas, inclusive estrangeiros, promovendo o conhecimento científico internacional e o fortalecimento de amizades.

Mais tarde, durante a Segunda Guerra Mundial, a Dinamarca foi ocupada pela Alemanha nazista. Bohr e as Conferências de Copenhague acolhiam cientistas desalojados e demitidos por Hitler. Recebia a ajuda de Rutherford, que era presidente de um comitê britânico.

Contudo, perseguido por se negar a colaborar com o regime nazista, Bohr não viu outra alternativa que não fosse mudar-se para os Estados Unidos, adotando um falso nome. Mais especificamente, não foi uma mudança, e sim uma fuga, com características de aventura. Partiu à noite, num barco de pesca aberto, em direção à Suécia. De lá, partiu, secretamente, para a Inglaterra, em um avião militar, que voava a grande altitude. Segundo Segré (1980), durante o voo, ficou inconsciente, em virtude de algum defeito na máscara de oxigênio e em determinado momento a tripulação julgou que ele tivesse morrido. Da Inglaterra, seguiu, seguramente, para os Estados Unidos. Ainda, segundo Segré, certa vez, cientistas europeus residentes nos Estados Unidos foram convidados, secretamente, a comparecer ao laboratório de Los Alamos, instituição voltada para a construção da bomba atômica, para conhecer um tal de Mr. Baker, que nada mais era que o próprio Bohr, com nome falso. Bohr trazia, aos colegas, notícias diretas da ocupação nazista. Preocupado, Bohr tinha tentando influenciar o Primeiro-Ministro Churchill e o Presidente Roosevelt a revelar o projeto atômico aos soviéticos, na tentativa de que um consenso pudesse evitar a utilização de armas atômicas. Porém, não obteve êxito.

Adentrando a intimidade de Bohr e seu processo criativo, sabe-se, por intermédio dos colaboradores do Instituto Bohr – alguns ilustres como Dirac e Heisenberg – que ele gostava de pensar em voz alta, ou seja, desenvolvia suas ideias falando. Dirac escreveu sobre Bohr:

Com bastante frequência, eu era apenas sua plateia durante o processo de pensar em voz alta. Eu tinha grande admiração por Bohr. A meu ver, foi o mais profundo pensador que já conheci. Seus conceitos eram de um tipo, diria eu, relativamente filosóficos. Nem sempre eu os entendia, embora fizesse o possível. Minha própria linha de raciocínio me levava a dar ênfase a conceitos que pudessem ser expressos em forma de equações e grande parte dos conceitos de Bohr eram de caráter mais genérico e até certo ponto mais afastados da matemática. Mas, mesmo assim, eu me sentia feliz em ter esse estreito relacionamento com ele e, conforme citei em outra ocasião, não tenho certeza quanto e até que ponto o fato de ouvir todos aqueles conceitos não influenciou minha obra. (Dirac, *Proc. of the Intl. School of Physics*, “Enrico Fermi”, vol. 57, p. 134., *apud* Segré 1980).

Conforme enfatizado por Dirac, Bohr era um cientista que produzia filosoficamente. Fazia uso da filosofia como ferramenta para construir modelos científicos. Sendo assim, defendia que:

[...]uma consistente aplicação mesmo dos conceitos mais elementares indispensáveis, para a descrição de nossa experiência diária, baseia-se em suposições, inicialmente, despercebidas, cuja consideração explícita é, no entanto, essencial se desejamos obter uma classificação de domínios mais ampliados de experiência tão clara e livre de arbitrariedade quanto possível. (BOHR, 1937).

Em última análise, Bohr buscava enxergar o que fosse simples no exercício de ciência, e só então trasladava o simples ao mais complexo.

Em Kennedy (1985), pode-se encontrar o comentário afetuoso de que a vida de Bohr é um exemplo de que grandes cientistas são igualmente grandes em suas subjetividades e como seres humanos. E ainda, não é o bastante possuir uma inteligência acima da média, expressões de caráter, coragem, sede de verdade e clareza são consideradas importantes, bem como a habilidade de reconhecer os problemas essenciais e se concentrar neles. Todas estas características contribuíram para que Bohr oferecesse ao mundo o conceito de estados quânticos discretos do sistema eletrônico atômico. Era algo inimaginável no seu tempo, onde o conhecimento limitado sobre o mundo atômico causava desconfiança quanto à proposta de novos modelos. Einstein teceu um comentário sobre isso: “I believe that, without Bohr, we would still today know very little about atomic theory”⁵⁶.

O Instituto Bohr era um lugar de muita produção de conhecimento, ciência e amizade. Um exemplo disso, foi na ocasião do aniversário de 60 anos de Bohr, houve a comemoração oficial e sofisticada para todos, mas também houve uma comemoração matutina intimista, no próprio Instituto. Bohr tinha uma personalidade inspiradora, e assim agregava, ao seu redor, cientistas, colaboradores e estudantes, de todas as nacionalidades, químicos e físicos, teóricos e experimentalistas e diversos pontos de vista científicos e epistemológicos. Copenhague deve ao Bohr o apelido de “capital da física atômica”.

No relato de Franck⁵⁷, encontramos que ao se deparar com algum novo problema científico, Bohr elegia uma “vítima”, algum estudante do seu laboratório. Trabalhavam juntos dia e noite. Bohr explicava o que estava pensando até que tudo se tornasse claro para ele e para

⁵⁶ O comentário de Einstein foi feito em conversa com James Franck, que por sua vez escreveu um texto de suas memórias sobre Bohr, texto este que compõe o livro editado por Kennedy (1985), página 17. Numa tradução livre do comentário: “Eu acredito que, sem Bohr, nós ainda hoje saberíamos muito pouco sobre a teoria atômica”.

⁵⁷ James Franck foi cientista contemporâneo de Bohr e colaborador do Instituto Bohr. Escreveu um artigo sobre suas memórias de Bohr, artigo este que compõe o livro editado por Kennedy (1985), página 26.

a “vítima”. Porém, a grande função da “vítima” era escrever um artigo em conjunto com Bohr. A escrita se dava da seguinte forma: Bohr ditava e a “vítima” escrevia.

A casa de Bohr recebia seus colegas e alunos de laboratório, colegas de outros laboratórios da universidade, burocratas, artistas, políticos e até mesmo a família real dinamarquesa. Os assuntos discutidos eram os mais diversos como ciências, filosofia, história, artes, religião, ética, política, atualidades, etc.

Bohr foi o centro e a eminência do Círculo de Copenhage, além de ter exercido papel fundamental na influência de novas gerações de jovens físicos que procuravam o Instituto de Física Teórica de Copenhage, com o intuito de fazer ciência. Em 1965 o Instituto foi renomeado para Instituto Niels Bohr.

Bohr foi um dos cientistas criadores do laboratório CERN, em Genebra, onde todos os países europeus podem atuar, desenvolvendo a física moderna. O CERN abriga um dos maiores aceleradores de partículas do mundo. O CERN é um dos maiores símbolos de relações científicas internacionais.

Sobre a teoria atômica, na qual é uma grande referência, Bohr afirmou: “Desde o alvorecer da ciência, a teoria atômica realmente tem estado no centro do interesse, no que diz respeito aos esforços de obter uma visão abrangente da grande diversidade de fenômenos naturais”. (BOHR, 1957).

Uma vez reconhecido o trabalho de Bohr, o tema átomos e moléculas tornou-se agenda científica prioritária, tanto teoricamente, como experimentalmente. Bohr teve um papel preponderante no desenvolvimento da mecânica quântica. Como mérito de Bohr, além de suas pesquisas, pode-se destacar seus questionamentos filosóficos e o espírito agregador e hospitaleiro, seja recebendo jovens cientistas em seu Instituto, seja viajando pela Europa e Estado Unidos, divulgando sua pesquisa. Além disso, seu pensamento influenciou as gerações porvindouras de cientistas, incluindo seu filho Aage, que veio a presidir o Instituto Bohr.

Depois do trabalho de Bohr foi possível desvendar fenômenos químicos como radiação atômica, estrutura de cristais, estado metálico, entre outros. A compreensão da estrutura da matéria viabilizou o desenvolvimento de novos tipos de materiais, novas formas de energia, novas tecnologias químicas, eletrônicas e nucleares.

Os modelos atômicos foram aprimorados, porém ainda não decodificavam todo o arcabouço do mundo atômico, envolvido pela mecânica quântica. A importância da chegada de novos cientistas, pensamentos e trabalhos era latente.

9.0 LOUIS DE BROGLIE: NATUREZA ONDULATÓRIA DO ELÉTRON

9.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO

FIGURA 12 - Louis de Broglie



Foto retirada de <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1929/broglie/biographical/> Acesso em 20fev2019.

Louis-Victor de Broglie, na figura anterior, nasceu em 1892, em Dieppe, França. Viveu por longos 95 anos de idade, falecendo em 1987. Em 1924, doutorou-se na Universidade de Paris, com a tese intitulada “*Recherches sur la Théorie des Quanta*”. Posteriormente foi professor da Universidade de Paris.

Dedicou-se ao estudo da mecânica ondulatória: teoria dos elétrons de Dirac, a nova teoria da luz, a teoria geral das partículas de spin, aplicações da mecânica das ondas à física nuclear, etc.

Recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1929 pela identificação da natureza ondulatória do elétron. Foi membro da Academia de Ciências do Instituto Francês.⁵⁸

Sobre a mecânica quântica, de Broglie dizia que:

A noção básica foi apresentada em 1900 por Max Planck. Pesquisando a natureza teórica da radiação do corpo negro, ele encontrou que o equilíbrio

⁵⁸ De Nobel Lectures, Physics 1922-1941, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1965. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1929/broglie/biographical/>. Acesso em 20/02/2019.

termodinâmico não depende da natureza das partículas de emissão, mas sim dos elétrons de ligação elástica para os quais a frequência é independente da energia, o chamado ressonador PLANCK. Planck propôs que a troca de energia entre o ressonador e a radiação ocorre somente em múltiplos inteiros de $h\nu$, onde h é uma nova constante fundamental. (DE BROGLIE, 1925).

9.2 A CONTRIBUIÇÃO DE DE BROGLIE À CIÊNCIA

Já em 1922 e 1923, anteriormente à conclusão de sua tese de doutorado, de Broglie publicou seus primeiros trabalhos sobre os *quanta* de luz, sintetizando as teorias ondulatória e corpuscular da luz. De Broglie propôs estender para as partículas materiais a dualidade onda-partícula que Einstein havia proposto para a luz, em 1905.⁵⁹ De Broglie promoveu o elo mecânica quântica e relatividade.

Desse modo, ao longo dos anos e dos trabalhos científicos, a natureza da matéria foi considerada sob dois pontos de vista antagônicos: corpuscular e ondulatório. A teoria quântica, neste caso, representada por Louis de Broglie veio afirmar que tais pontos de vista podiam conviver de forma harmônica, complementar e simultânea.

Para de Broglie (1925), baseando-nos na relação conhecida de frequência e energia, podemos assumir a compreensão de um fenômeno periódico, de caráter ainda a ser determinado, que deve ser atribuído a cada parcela de energia, e da noção Planck-Einstein de massa, para uma nova teoria. Esta teoria seria a teoria quântica que está se delineando desde o começo do século XX até os dias presente.

Segundo de Broglie (1925), considerando a generalização de um movimento não uniforme, há uma proporcionalidade entre o vetor momento de uma partícula e o vetor de propagação de uma onda, para o qual o quarto componente é a sua frequência. Raios de uma onda são idênticos a trajetórias de uma partícula.

A aplicação das ideias descritas acima por de Broglie (1925), para o movimento periódico de um elétron do modelo de Bohr, conduzem à conclusão de que as condições de estabilidade da órbita de Bohr são idênticas às condições de ressonância de uma onda associada. A referida conclusão também pode ser aplicada a interações mútuas de prótons e elétrons de átomos de hidrogênio. Além disso, pode-se aplicar as ideias anteriormente citadas ao conceito

⁵⁹ Idem ao 15.

de *quanta* de luz de Einstein e desse modo à teoria quântica e ondulatória da Óptica, que é a base para que se possa compreender a relação entre ondas luz-quanta e a formulação da Eletrodinâmica de Maxwell.

Para de Broglie, as condições de quantização de Bohr-Sommerfeld das órbitas eletrônicas somente poderiam ser entendidas em termos de ondas estacionárias e foi esta observação que o levou a postular a hipótese das ondas de matéria.

As órbitas dos elétrons ao redor do núcleo assemelham-se às ondas que se criam em uma corda presa pelas pontas quando a fazemos vibrar. No caso da corda, só são possíveis as ondas estacionárias – que não se propagam – nas quais cabe um número inteiro de comprimentos de onda na corda. De Broglie dizia que os elétrons possuem uma onda associada, e com eles ocorre o mesmo: só são possíveis órbitas nas quais caiba um número inteiro de comprimentos de onda eletrônica. Isso explica por que algumas órbitas são válidas e outras não. Então o modelo de Bohr ficaria – pelo menos em parte – justificado. (CASSINELLO, 2017).

De Broglie associou uma onda com uma partícula e pôde obter as regras de quantização de Bohr e Sommerfeld exigindo que se incluísse um número inteiro de ondas em uma órbita estacionária.⁶⁰

A introdução de ondas de fase na Mecânica Estatística justifica o conceito da compreensão de *quanta* de luz na teoria dos gases e estabelece, dadas as leis da radiação do corpo negro, como se seguem as parcelas de energia entre os átomos de um gás e o *quanta* de luz. (DE BROGLIE, 1925).

Grande parte da jornada científica de de Broglie consistiu na busca de uma interpretação causal para a mecânica ondulatória. De Broglie contribuiu fortemente para o desenvolvimento do modelo atômico e a história da teoria quântica, atribuindo a uma partícula material um comportamento ondulatório, com frequência $\nu = E / h$ e comprimento de onda $\lambda = h / p$.⁶¹

Sobre seu próprio trabalho, de Broglie (1925) comentou que parecia ter chegado o tempo de unificar as abordagens corpuscular e ondulatória em uma tentativa de revelar a natureza fundamental do *quantum*.

⁶⁰ Por Felix Bloch, ganhador do Prêmio Nobel em Física de 1952. Extraído de CASSINELLO, A.; Gómez, J.L.S.; O mistério quântico: uma expedição às fronteiras da física; São Paulo: Planeta do Brasil, 2017.

⁶¹ Extraído de Freire Jr. (2011).

Para Kastner (2011), comprimentos de onda reais são ontologicamente associados, não somente a partículas sem massa (fótons), mas também a partículas de massa finita, tais quais átomos e moléculas. Kastner (2011) acredita na natureza relativística do conceito partícula-onda, devido à frequência intrínseca a uma partícula material baseada na massa relativística da última, como equivalente à sua energia.

As partículas-ondas propostas por de Broglie, em 1923, foram confirmadas experimentalmente.

9.3 O CONTEXTO CIENTÍFICO FRANCÊS QUE INFLUENCIOU DE BROGLIE

De um modo geral, a história recente do átomo e de sua divisibilidade está concentrada no eixo britânico-germânico. Destaca-se a participação da Dinamarca, devido ao trabalho de Bohr e sua atração de grandes nomes da ciência. No entanto, encontramos na França do século XX, a contribuição acentuada de Louis de Broglie. Nos anos 1930' e 1940', ele disseminou, na Sorbonne, a interpretação de Copenhague da mecânica quântica. No entanto, posteriormente, posicionou-se contra Bohr e seus colegas.

De acordo com Freire Jr. (2011), De Broglie foi convocado para a Primeira Guerra Mundial, para atuar no corpo dos engenheiros, incorporando-se ao Serviço de Comunicação Sem Fio de Paris. Viviu com a mãe e a avó e se dirigia à unidade de telégrafo sem fio, na base da Torre Eiffel.

A natureza ondulatória do elétron proposta por de Broglie, na década de 1920, se deu no período entreguerras, quando toda a França estava mobilizada em esforços de recuperação deste país, em detrimento dos estragos causados pela Primeira Guerra Mundial, conforme assevera Segré (1980). Por exemplo, como medida de reconstrução, a França abriu-se à imigração. Os franceses não se sentiam seguros quanto à paz firmada entre as nações. Então, buscaram aplicar o Tratado de Versalhes⁶² e mantiveram o maior exército permanente na Europa. Outra questão central era a das reparações alemãs. Em janeiro de 1923, o governo francês enviou tropas e engenheiros ao vale do Ruhr para forçar o cumprimento alemão ou, se necessário, coletar indenizações por confisco direto. O governo alemão tentou resistência, mas finalmente teve que cumprir. A Alemanha aceitou em 1924 um acordo revisto de reparações e

⁶² O Tratado de Versalhes (1919) foi um tratado de paz assinado pelas potências europeias que encerrou oficialmente a Primeira Guerra Mundial, sendo que a Alemanha o classificou como diktat (imposição). Uma cláusula no tratado atribuiu culpa de guerra aos alemães e seus aliados e obrigou a Alemanha a fazer reparações.

foi capaz de cumprir o acordo, utilizando grandes empréstimos norte-americanos. Porém, os custos da ocupação implicaram em aumento de impostos na França. Em 1926, a França e os Estados Unidos finalmente chegaram a um acordo sobre outro problema persistente: o pagamento de dívidas de guerras francesas por entregas em tempo de guerra de munições americanas e outros suprimentos. A França chegou ao final dos anos 1920 recuperada e próspera. A primeira metade do século XX foi de uma França que se industrializou, assim como a Europa Ocidental e os Estados Unidos. Paris era o centro da vida francesa e assumiu posição de destaque no contexto artístico.

Sobre sua circunstância pessoal, conforme explica Segré (1980), Louis de Broglie foi o sétimo duque de Broglie, ou seja, um nobre na era da ciência. Como era de costume entre os nobres, a família de Broglie dividia o seu tempo entre uma casa no campo e Paris. Em Paris, habitavam um hotel particular, com 40 serviçais, em localização igualmente nobre, no oitavo *arrondissement*, próximo ao Arco do Triunfo e à Avenida Champs d'Élysées. A biblioteca da casa de Broglie foi considerada a segunda maior biblioteca privada da França. Atualmente, a edificação pertence à Fundação Nacional do Crédito Agrícola.

Conforme se observa em Segré (1980), a aristocracia considerava como trabalho atividades religiosas, militares e serviços diplomáticos para o Estado. Profissões como advocacia, medicina e educação não eram valorizadas. Foi nesse ambiente que Louis e seu irmão mais velho Maurice de Broglie foram criados. Maurice rompeu com as tradições aristocráticas e mergulhou na ciência física. Maurice de Broglie foi um cientista renomado, que auxiliou a entrada de Louis na ciência. Não era comum um cientista de origem aristocrática, no século XX. Os cientistas franceses provinham de famílias do comércio, profissionais, burocráticos ou acadêmicos.

Maurice estudou física, química e astronomia na Faculdade de Ciências, em Marselha, ao mesmo tempo em que raios X, raios urânio e elétrons eram considerados o que havia de mais novo na ciência. Percebendo que Maurice tinha intenções de renunciar a sua carreira militar e tinha pretensões de abraçar o Laboratório Cavendish, em Londres, seu avô, que era embaixador em Londres, escreveu-lhe: “Você está sempre pensando em estudos científicos e terminando sua carreira militar. Ciência é uma velha mulher que alguém pode cortejar depois e que não teme os tributos de velhos homens. A academia não traz felicidade”. (*apud*, Mary Jo Nye, 1997). O avô de Maurice o pressionou a escolher pelas tradições. Assim, a primeira publicação científica de Maurice data de 1902, logo após a morte de seu avô.

O irmão mais velho de Louis, quando se assumiu cientista, desbravou o caminho científico para Louis, orientando seus estudos para que prosseguisse a mesma trilha, porém de forma mais consciente e frequentando as escolas mais adequadas.

Segundo Freire Jr. (2011), Louis teve a oportunidade de ler textos sobre debates científicos entre físicos franceses e físicos estrangeiros com quem seu irmão havia se encontrado, por exemplo, Planck, Einstein e Rutherford. Tais textos eram oriundos do primeiro Conselho de Solvay em Física, no ano de 1911, realizado em Bruxelas.

Maurice influenciou Louis a estudar as propriedades de onda e partícula da radiação. Além disso, Louis teve acesso aos artigos do átomo de Bohr e do efeito fotoelétrico, para desenvolver seu próprio trabalho. Louis chamou a atenção dos físicos do Instituto Bohr, que embora tenham criticado a forma como Louis aplicou o princípio da correspondência de Bohr, não puderam negar que os resultados estavam corretos.

O trabalho que estava sendo desenvolvido por Louis de Broglie chamou a atenção da comunidade científica internacional. Conforme, explicou Nye (1997), Paul Dirac pediu uma cópia da tese de Louis; Sommerfeld o estudou em Munique; Heisenberg o estudou em Göttingen.

Extremamente reservado, Louis de Broglie ocupava uma posição à margem da comunidade científica francesa. Seu comportamento o caracterizava como o estereótipo do cientista muito inteligente. Contudo, ele não estava isolado das discussões e debates que envolviam a mecânica quântica.

Já como professor da Universidade de Paris, de Broglie costumava promover seminários, entre os convidados estavam nomes como Paul Dirac e Albert Einstein. De Broglie não deixou “herdeiros científicos”, ou seja, não formou cientistas de posição relevante para a ciência. A academia francesa considerava que a mecânica ondulatória de de Broglie era muito abstrata e de difícil compreensão. No entanto, os franceses comunistas da década de 1950’ o valorizaram e estranhamente a associaram à ideologia soviética.

A hipótese de de Broglie, ao associar cada partícula com uma onda, influenciou o austríaco Erwin Schrödinger a escrever a equação de propagação das ondas de matéria (FREIRE JR., 2011). Schrödinger escreveu à de Broglie que havia ampliado suas ideias em uma nova teoria. O modelo dos elétrons girando ao redor do núcleo ou transformados em ondas estacionárias não descreve a verdadeira natureza do átomo. Seria necessário obter uma teoria

revolucionária para a física. Trata-se da contribuição de Schrödinger para a construção do modelo atômico mais completo e correto.

10 ERWIN SCHRÖDINGER: A REVOLUCIONÁRIA EQUAÇÃO DA FUNÇÃO DE ONDA Ψ

10.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO

FIGURA 13 - Erwin Schrödinger



Foto retirada de <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1933/schrodinger/biographical/> Acesso em 26fev2019.

Erwin Schrödinger foi um físico austríaco, nascido na cidade de Viena, em 1887. Faleceu também em Viena, em 1961. Formou-se na Universidade de Viena. Pertenceu à Universidade de Zurique; Universidade de Berlim – como sucessor de Planck -; Universidade de Oxford; Universidade de Graz e Universidade de Ghent. Recusou o convite para uma posição na Universidade de Princeton. Por fim, permaneceu até a sua aposentadoria em 1955, no Instituto para Estudos Avançados, em Dublin. Recebeu o Prêmio Nobel em 1933, juntamente com Dirac.

Interessou-se pelos seguintes temas: calor específico de sólidos; termodinâmica; espectro atômico; gravitação e eletromagnetismo e fundamentos da física atômica. Entretanto, o grande trabalho que assinalou a sua biografia foi o desenvolvimento da equação da onda, em 1926. Contribuiu fortemente para a teoria ondulatória da matéria e outros fundamentos da mecânica quântica.

10.2 A CONTRIBUIÇÃO DE SCHRÖDINGER À CIÊNCIA

A motivação científica para o desenvolvimento da equação da onda está pautada na sua insatisfação com a condição quântica da teoria dos orbitais de Bohr e também na sua crença de que o espectro atômico deveria realmente ser determinado por algum tipo de problema de autovalor.⁶³ Schrödinger propôs uma explicação para o fato de que os elétrons podiam girar em determinadas órbitas e não em outras, como havia Bohr antecipado. A solução de Schrödinger se apoiava na contribuição de de Broglie à ciência. Como já visto anteriormente, a hipótese de de Broglie era que os elétrons tinham uma onda associada. Esta onda foi caracterizada por uma amplitude Ψ , associada em cada ponto do espaço. Quando a amplitude Ψ representa uma função das coordenadas do ponto em questão e do tempo, recebe o nome de função de onda.⁶⁴

Refletindo sobre a ideia de que para tratar adequadamente com ondas, é preciso ter uma equação de ondas, Schrödinger formulou a equação que governa os fenômenos do mundo microscópico. Schrödinger enunciou: “Meu colega Debye sugeriu que deveria haver uma equação de ondas; pois bem, eu encontrei uma”.⁶⁵ Desse modo, em janeiro de 1926, veio à tona o primeiro artigo de uma série de quatro, denominada “Quantização como um problema de autovalores” e publicada em *Annalen der Physik*. Tratava-se da criação da mecânica quântica ondulatória.

Eis a equação da onda de Schrödinger, independente do tempo: $H \Psi = E \Psi$ ⁶⁶, onde H é um operador Hamiltoniano.

Sobre sua equação, Schrödinger explicou:

Uma equação de onda na configuração de espaço deve substituir as equações fundamentais da mecânica. Em primeiro lugar, esta equação é puramente de vibração periódica senoidal, com respeito ao tempo; pode também ser derivada de um “princípio de variação Hamiltoniano”. Contém um “parâmetro de autovalor” E, que corresponde à energia mecânica em problemas

⁶³ MLA style: Erwin Schrödinger – Biographical. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2019. Tue. 26 Feb 2019. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1933/schrodinger/biographical/> Acesso em 26/02/2019.

⁶⁴ CASSINELLO, A.; Gómez, J.L.S.; O mistério quântico: uma expedição às fronteiras da física; São Paulo: Planeta do Brasil, 2017.

⁶⁵ Erwin Schrödinger no *colloquium* quinzenal do departamento de física da Universidade de Zurique em conjunto com o departamento de física da Escola Politécnica, no qual eram comunicados e discutidos os artigos mais recentes, em 1925. Transcrição de Felix Bloch. Extraído do livro CASSINELLO, A.; Gómez, J.L.S.; O mistério quântico: uma expedição às fronteiras da física; São Paulo: Planeta do Brasil, 2017.

⁶⁶ Extraído da página 28 de CASSINELLO, A.; Gómez, J.L.S.; O mistério quântico: uma expedição às fronteiras da física; São Paulo: Planeta do Brasil, 2017.

macroscópicos e que para uma simples vibração senoidal-temporal é igual à frequência multiplicada pelo *quantum* de ação de Planck h . Em geral, a equação de onda ou vibração não possui uma solução que em conjunto com sua derivação são um único valor, finito e contínuo, através do espaço de configuração, exceto para certos valores especiais de E , os autovalores. Estes valores formam o “espectro de autovalor”, que frequentemente incluem uma parte contínua (o “espectro de banda”), assim como pontos discretos (o “espectro de linha”). Os autovalores correspondem aos níveis de energia (= “termo” espectroscópico – valor multiplicado por h) da teoria quântica, como até agora desenvolvido, ou diferem deles de uma maneira que é confirmada pela experiência. (SCHRÖDINGER, 1928).

Ao se resolver a equação da onda de Schrödinger, é possível obter as energias das órbitas dos elétrons, sem suposições *ad hoc*, como feito anteriormente por Bohr e de Broglie.

Especificamente sobre a função de onda Ψ , Schrödinger completou:

É necessário atribuir a Ψ um significado físico, para que o pequeno sistema mecânico possa de fato emitir ondas eletromagnéticas de frequência igual a um termo-diferença (diferença de dois autovalores dividido por h) inteligível, e mais, para obter uma afirmação teórica para intensidade e polarização das ondas eletromagnéticas. (SCHRÖDINGER, 1928).

Além de propor a equação, Schrödinger propôs também uma interpretação da sua fórmula que consistia em compreender que a intensidade da onda Ψ em cada ponto expressava a quantidade de carga eletrônica. Assim, a carga total do elétron se distribuiria pelo espaço proporcionalmente à intensidade de Ψ . O elétron seria uma onda material Ψ – ou um pacote de ondas materiais – que encheria o espaço de forma contínua. (CASSINELLO, 2017).

Schrödinger foi além, e ainda a partir da interpretação da sua fórmula, explicou como no átomo de Bohr o elétron saltava de uma órbita a outra. Schrödinger defendia que não havia saltos descontínuos em a natureza.

Sendo assim, afirmou que as órbitas correspondiam a funções de ondas estacionárias. Como essas funções correspondem a energias diferentes, podem gerar pulsações de modo semelhante a como dois tons sonoros de frequências próximas criam um som cuja intensidade aumenta e diminui com uma frequência igual à diferença das frequências originais. A frequência da radiação emitida ou absorvida seria proporcional à diferença das energias das órbitas implicadas. (CASSINELLO, 2017).

O ponto nevrálgico da interpretação que Schrödinger proporcionou à sua equação e à ciência reside no fato de que dessa forma, resgatava-se o conceito de imagem contínua da natureza. Sua enunciação foi aceita por grande parte da comunidade científica. Entretanto, havia a parcela que corroborava com o cientista Heisenberg, que por sua vez, preconizava o trabalho de Max Planck e elementos descontínuos. Teorias divergentes, como era acreditado.

Este ponto nevrálgico ou divergência de visões foi desfeito ao se constatar que a equação de Schrödinger estava correta e é até hoje válida e considerada como premissa da teoria quântica. Contudo, a interpretação de Schrödinger estava equivocada. Segundo Cassinello (2017), os problemas apareciam ao se pretender que a função de onda Ψ fosse a representação material, física, do elétron.

A solução e a adequada interpretação de Ψ foi trazida, ainda em 1926, pelo físico e matemático alemão Max Born (1882-1970). De acordo com Cassinello (2017), Born assumiu que Ψ expressava a probabilidade de que o elétron se encontrasse em um lugar ou em outro, isto é, a onda Ψ não era o elétron em si; apenas descrevia onde ele poderia estar. Os elétrons se movimentam ao redor do núcleo, mas não cabe atribuir-lhes uma trajetória específica. Onde Ψ assumir um valor mais alto, ali será mais provável que esteja o elétron. Ainda de acordo com Cassinello, Born estabeleceu que a probabilidade de o elétron ocupar uma determinada posição era igual ao quadrado de Ψ .

Porém, a ideia de salto quântico dos elétrons, de um nível energético para outro, ainda não havia sido elucidada.

De acordo com a interpretação de Copenhague da mecânica quântica, a equação da função de onda é simplesmente um dispositivo para calcular probabilidades. A interpretação convencional de Copenhague é que o estado quântico é somente uma distribuição de probabilidade e em decorrência disso prescrições probabilísticas quânticas para variáveis macroscópicas obedecem às regras de Bayes para probabilidades com precisão incrível.⁶⁷

10.3 A CIRCUNSTÂNCIA PESSOAL DE SCHRÖDINGER

Detenhamo-nos a reflexionar sobre a circunstância pessoal de Schrödinger. Sua inclinação para às ciências e interesse pela filosofia o faziam questionar sobre a causalidade

⁶⁷ BANKS, T.; Schrodinger's Cat and World History: The Many Worlds Interpretation of Alternative Facts (2017).

absoluta e a hipótese de as leis da natureza serem estatísticas. Porém, Schrödinger não se interessava apenas pela ciência e pela filosofia, o interesse pelo amor e a forma intensa como viveu o amor foi marcante em sua vida. Foi dado a grandes paixões e a hábitos não convencionais.

Durante o período nazista estabeleceu-se com sua família em Dublin. A questão é que sua família era composta de duas mulheres, Annemarie e Hilde – mulher de um amigo de Schrödinger -, e a filha que teve com Hilde. Sobre este período, Schrödinger declarou: “Foi uma época muito, muito linda. Sem ela, eu não teria conhecido esta ilha um tanto afastada e bela; em nenhum lugar teríamos passado a horrível guerra nazista de modo tão prazeroso que dá até vergonha”. Em 1946, Hilde e sua família desagregaram este singular núcleo. Schrödinger retornou a sua cidade natal em 1956, na companhia de Annemarie. Sua querida Viena era conhecida por ser a capital da Europa mais dedicada à cultura.

Remetendo-se a sua formação vienense, encontra-se um Schrödinger crítico teatral, que prezava a independência e a liberdade, e que colaborou para o rompimento com a física clássica.

Em 1944, Schrödinger escreveu o livro, de caráter transdisciplinar “O que é a Vida?”, com o intuito de mostrar como a mecânica quântica pode explicar a estrutura genética. O livro envolve química, física, biologia e filosofia. Atualmente, as ciências biológicas e moleculares se desenvolveram além, e até mesmo, contraditoriamente aos escritos de Schrödinger. Entretanto seu livro, permanece como uma introdução ímpar ao tema.

Schrödinger, conforme exposto no livro supracitado, argumentava, filosoficamente, que “Embora nas plantas e nas esferas inferiores do reino animal o comportamento adequado seja ocasionado pelo lento processo de seleção, em outras palavras, por tentativa e erro, a alta inteligência do homem o capacita a escolher seu comportamento”. E mais, como se já pudesse antever a necessidade do desenvolvimento sustentável, no século XXI, ele escreveu que “não deixar que nossa descendência exceda o volume para o qual a subsistência possa ser assegurada”.

10.4 O ENTRELAÇAMENTO SCHRÖDINGER-PLANCK E SCHRÖDINGER-EINSTEIN

Há registros de correspondências trocadas entre Schrödinger e Planck, logo após Schrödinger ter apresentado o seu trabalho à comunidade científica. Planck analisou o trabalho,

percebeu muita beleza na equação da onda, mas levou algum tempo para processar tamanha novidade. Era preciso estudar e avaliar, porém estava imbuído de boa vontade. Schrödinger se referia à Planck como Mestre e sentiu-se lisonjeado porque Planck apreciou o seu trabalho, como se pode observar, a seguir, no trecho da carta de Schrödinger à Planck, datada de 8 de abril de 1926:

Meu querido professor, fiquei indescritivelmente encantado com o seu gentil cartão de 2 de abril. Estou especialmente feliz que a ideia básica pareça plausível para você e agora estou muito confiante de que, com o tempo, ela será elaborada de uma maneira que seja útil em todos os aspectos, por mais imperfeita que seja no presente... (SCHRÖDINGER, 1926).

Planck chamava Schrödinger de “colega” e na correspondência datada de 24 de maio de 1926 mostrou-se feliz com a expectativa de encontrá-lo na reunião da Sociedade de Física, em Berlim, e poder confabular sobre as novas ideias da ciência. Estava tão interessado que pediu informações sobre os planos de viagem de Schrödinger. Planck explicou que Berlim era um lugar livre e independente, onde os habitantes não estavam tão interessados na vida uns dos outros, diferente de muitas cidades pequenas.

Sobre a conferência em Berlim, onde além de Planck, Einstein também esteve na plateia, Schrödinger, prudentemente, escreveu uma carta ao Mestre Planck, datada de 31 de maio de 1926, pedindo aconselhamento de como proceder. Focar na teoria ou nos cálculos, recapitular ou não o que já foi publicado e o formato da palestra eram dúvidas pertinentes. Planck, prontamente, aconselhou, em carta datada de 4 de junho de 1926, que Schrödinger se sentisse confiante para conduzir a palestra da forma mais natural possível e sugeriu que ele ministrasse duas palestras, a primeira de cunho mais geral e a segunda abordando especificidades. Na ocasião da conferência, Planck foi o anfitrião e o recebeu em sua casa. Ambos concordavam que um palestrante precisava de alguns momentos de solidão, para se recuperar do esforço de ser o centro das atenções. Planck prometeu oferecer essa possibilidade de refúgio. Schrödinger reconheceu a necessidade da solidão, mas estava empenhado em aproveitar ao máximo as oportunidades de debates científicos.

Einstein também esteve presente na plateia da mencionada conferência da Sociedade Física de Berlim. Há também registros de correspondências trocadas entre Schrödinger e Einstein. Este fato se deveu à recomendação de Planck sobre o trabalho do jovem Schrödinger. Einstein mobilizou-se a estudar a nova mecânica ondulatória, a qual denominou de genial, e remeteu cartas à Schrödinger para solucionar algumas dúvidas. Schrödinger usou da mesma

formalidade usada com Planck, chamando Einstein de “Professor”. Não havia intimidade entre Schrödinger e Einstein, porém havia cumplicidade, uma vez que ambos discordavam da leitura de probabilidade e incerteza propostas por Heisenberg e Bohr. Em carta datada de 31 de maio de 1928, Einstein se referiu da seguinte forma: “A filosofia tranquilizadora de Heisenberg-Bohr - ou religião? - é tão delicada que, por enquanto, fornece um travesseiro gentil para o verdadeiro crente, do qual ele não pode ser despertado com muita facilidade. Então deixe ele deitar lá. Mas essa religião tem tão pouco efeito sobre mim...”.

O jovem Schrödinger sentia-se feliz e lisonjeado por tamanha receptividade encontrada nos mestres Planck e Einstein.

Em 1939, Schrödinger e Einstein ainda se correspondiam. Há registros de carta datada de 19 de julho do mesmo ano, enviada por Schrödinger, onde ele perguntava sobre as férias de Einstein a bordo de seu veleiro e contava sobre suas férias na costa belga. O austríaco Schrödinger apreciou o lugar e as pessoas, contudo não era capaz de distanciar completamente seus pensamentos do trabalho científico e interrogava Einstein sobre novas dúvidas. Férias ociosas o deixavam um tanto aturdido. Solícito, Einstein respondeu a carta mencionando apenas as questões científicas. Humilde, Einstein afirmou que não pretendia convencer Schrödinger de suas proposições, mas sim fazê-lo compreender seu ponto de vista.

Em 1950, as correspondências trocadas entre Schrödinger e Einstein ainda continham um caráter de cumplicidade entre ambos. Concordavam sobre aspectos filosóficos da teoria quântica, conforme pode-se observar em carta enviada por Einstein, datada de 22 de dezembro de 1950: “Mas parece-me certo que o caráter fundamentalmente estatístico da teoria é simplesmente uma consequência da incompletude da descrição. Isso não diz nada sobre o caráter determinístico da teoria; de qualquer maneira, esse é um conceito totalmente nebuloso, desde que não se saiba quanto deve ser dado para determinar o estado inicial”.

Erwin Schrödinger foi o físico que descobriu a teoria da onda e subsidiou Heisenberg com a mais complexa forma de formalismo matemático, portanto mudando a maneira como a interpretação da teoria quântica era feita até então.

11 WERNER HEISENBERG: A INCERTEZA É UMA DAS POUCAS CERTEZAS

11.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO

FIGURA 14 - Werner Heisenberg



Foto retirada de <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1932/heisenberg/biographical/> Acesso em 14mar/2019.

Werner Heisenberg, na figura acima, nasceu em Würzburgem, Alemanha, no ano de 1901, ou seja, a virada para o século XX, anúncio do salto que a ciência iria sofrer ao longo da primeira metade deste novo século. Faleceu em 1976, em Munique, Alemanha.

Estudou física na Universidade de Munique, onde foi discípulo do físico alemão Arnold Sommerfeld (1868-1951), e também estudou física, na Universidade de Göttingen, onde foi discípulo de Max Born (1882-1970). Trabalhou em Copenhagen com Niels Bohr. Foi professor das Universidades de Leipzig e Berlim.

No fim da II Guerra Mundial, Heisenberg, bem como outros físicos alemães foram levados como prisioneiros por tropas norte-americanas e enviados para a Inglaterra. Em 1946, retornou à Alemanha, sendo um dos fundadores do Instituto de Física de Göttingen, posteriormente denominado Max Planck Instituto para Física e Astrofísica, e conduzido para Munique.

Heisenberg foi laureado com o Prêmio Nobel de Física de 1932.⁶⁸

Era exímio pianista, dedicando longas horas à música clássica.

⁶⁸ Extraído de <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1932/heisenberg/biographical/>, acesso em 14/03/2019, que por sua vez baseou-se em From Nobel Lectures, Physics 1922-1941, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1965.

11.2 A CONTRIBUIÇÃO DE HEISENBERG À CIÊNCIA

De acordo com Chibeni (2005), Heisenberg elaborou a primeira formulação da mecânica quântica em 1925 e a segunda formulação em 1927. Neste intervalo, houve o surgimento de mais uma versão da teoria quântica, isto é, o trabalho de Schrödinger.

A teoria quântica iniciada com Planck, já era por si mesma uma grande revolução no que se entende por física. Porém, segundo Lustig (2010), o artigo de quinze páginas que Heisenberg publicou em 1925 se tornou uma invenção revolucionária da nova mecânica quântica. Em sua abordagem, Lustig (2010) classifica em velha mecânica quântica as descobertas científicas desde Planck até Bohr, e classifica como nova mecânica quântica os trabalhos científicos, a partir de Heisenberg. Heisenberg estabeleceu relações entre quantidades que são, em princípio, observáveis, como frequências e intensidades da radiação emitida ou absorvida. Percebeu que frequências observadas poderiam ser expressas em termos do somatório das amplitudes e frequências de osciladores virtuais ou imaginários. Cada amplitude e frequência representariam agora não uma oscilação, mas um salto quântico entre dois estados quânticos de energia. Lustig (2010) afirma que as matrizes de Heisenberg obedeciam às regras eruditas do cálculo matricial e explicavam as características das transições quânticas. Entretanto, a descrição matricial de Heisenberg foi desenvolvida para partículas. Eis que, em janeiro de 1926, Erwin Schrödinger publicou a primeira parte do seu artigo sobre mecânica ondulatória, contendo a equação da função de onda. Ambos os pesquisadores divergiram em seus trabalhos. Houve uma situação de desconforto no meio científico. Mas a situação foi brevemente contornada, quando em maio de 1926, Schrödinger publicou uma prova de que ambos os formalismos, que pareciam diferentes em forma e conteúdo, eram, na verdade, matematicamente, equivalentes.

Como já visto até aqui, Schrödinger converteu a determinação dos valores de energia do átomo em um problema de autovalor. Ele mostrou a equivalência matemática da sua mecânica ondulatória com a mecânica quântica, culminando na formalização da teoria quântica.

Foi em março de 1927 que Heisenberg publicou o seu princípio da incerteza, e esta sim veio a ser a sua maior contribuição para o desenvolvimento da teoria quântica.

Segundo Chibeni (2005), Heisenberg baseou-se na premissa de que os objetos quânticos, qualquer que seja a sua natureza exata, são representáveis por pacotes de onda. E um pacote espacial de ondas pode ser obtido pela superposição de ondas planas sinusoidais de comprimentos de onda distribuídos em uma determinada faixa.

A contribuição da teoria de Heisenberg para a ciência e para a mecânica quântica reside na assertiva de que não é possível assumir para um elétron uma posição no espaço, em um determinado tempo, e nem mesmo segui-lo em sua órbita. Conforme Lustig (2010), não é possível medir, simultaneamente, com absoluta precisão, a posição e o momento de um elétron.

Como consequência, não se pode assumir que as órbitas planetárias propostas por Niels Bohr de fato existam. Sendo assim, o complexo formalismo matemático de Heisenberg, mencionado anteriormente, significa que posição e velocidade, no mundo subatômico, não podem ser representados por números ordinários, mas sim por estruturas matemáticas abstratas, denominadas matrizes. Desse modo, Heisenberg introduziu sua teoria em termos de equações matriciais.

Para Oppenheim et al, a definição de relações de incerteza consiste na explicação a seguir. Uma medida nos permite obter informações sobre o estado de um sistema físico. Por exemplo, ao medir a posição de uma partícula, os resultados da medição correspondem a possíveis localizações. Toda vez que o estado do sistema é tal que possamos prever a posição com certeza, então há apenas um resultado de medida que pode ocorrer. Heisenberg observou que a mecânica quântica impõe restrições rigorosas, no sentido de que há medidas incompatíveis como posição e momento, cujos resultados não podem ser previstos simultaneamente com certeza. Essas restrições são conhecidas como relações de incerteza. Por exemplo, as relações de incerteza indicam que, se pudéssemos prever o momento de uma partícula com certeza, então, ao medir sua posição, todos os resultados de medição ocorreriam com igual probabilidade. Isto é, a localização estaria completamente incerta.

Em decorrência do princípio da incerteza, Bohr enunciou o princípio da complementaridade, que é oportuno, coerente e intrínseco à teoria quântica, e sobretudo, elucidativo da natureza da medição quântica. Sobre a questão da incerteza e da complementaridade, Freire et al (2011) esmiúça da seguinte forma:

A questão da incerteza de Heisenberg diz respeito ao processo intrínseco de medida e expressa o fato de que sempre existe uma interação não determinável entre o observador e o que é observável e que, segundo Heisenberg, não podemos fazer nada para evitar esta interação ou corrigir os seus efeitos. No melhor dos casos sempre haverá uma imprecisão ou, mais exatamente, incertezas devidas não à imperfeição das medidas efetuadas, mas à natureza intrínseca da matéria. Pode-se dizer que tudo se passa de forma que, quanto mais precisamente se medir uma grandeza,

forçosamente mais será imprecisa a medida da grandeza correspondente, chamada de canonicamente conjugada. Cada uma das propriedades - posição e momentum - constitui um aspecto complementar do objeto quântico. Se conhecermos uma dessas grandezas com alta precisão, a outra não poderá ser conhecida do mesmo modo; mesmo assim, precisamos conhecer ambas as imprecisões, a fim de determinar o comportamento do sistema. Bohr elevou essas ideias à categoria de princípio: o da complementaridade. Na dualidade onda-partícula, por exemplo, as propriedades ondulatória e corpuscular de um objeto quântico constituem aspectos complementares de seu comportamento. Ele argumentou que não deveríamos encontrar nunca experimentos em que estes dois comportamentos diferentes entram em conflito entre si. A complementaridade afirma que onda e partícula são conceitos mutuamente exclusivos. Quando um experimento particular mostra um, o outro não está presente. Eles nunca aparecem juntos. (FREIRE, 2011).

11.3 O ENTRELAÇAMENTO HEISENBERG-BOHR

Ao longo do processo de construção da teoria atômica e da mecânica quântica do século XX, construiu-se também um emaranhado de relações interpessoais, que merecem ser estudadas devido à sua complexidade, nobreza, contribuição à ciência e permissão do conhecimento do microcosmos pela humanidade. Se a ciência é feita por cientistas, por sua vez cientistas são personalidades que interagem umas com as outras, além dos limites das suas fronteiras geográficas e idiomas de origem, hábitos e leituras de mundo.

A relação entre o cientista dinamarquês Niels Bohr e o cientista alemão Werner Heisenberg se iniciou no âmbito científico e foi intensificada por um expressivo entrelaçamento de amizade. Houve registros de muitos encontros ao longo dos anos e também cartas. Através destes registros, é possível estabelecer uma série de análises relevantes, destacando-se as interações de natureza pessoal, científica, política e filosófica.

No livro “A Parte e o Todo”, escrito em 1971, Heisenberg registrou suas memórias, com base em recordações de diálogos que travou com diversos cientistas, seus contemporâneos, destacando-se Niels Bohr. É a prova tátil da interação Bohr-Heisenberg. Trata-se, como disse Heisenberg, em relação à teoria quântica: “da impressão dos movimentos de pensamento que acompanharam a história do surgimento dessa ciência”.

Certa vez, no verão de 1922, na cidade de Göttingen, na Alemanha, o jovem físico alemão Werner Heisenberg foi convidado a compor a plateia que assistiria uma série de palestras proferidas por Bohr, que faria uma visita à Universidade de Göttingen – mais tarde, os estudantes apelidaram o evento de Festival Bohr de Göttingen. Durante a explanação de Bohr, corajosamente, Heisenberg realizou uma interferência. Foi neste momento que Bohr percebeu que Heisenberg possuía fascínio e profundo interesse por sua teoria atômica. Desse modo, Bohr convidou Heisenberg para uma caminhada e, posteriormente, para visita de um semestre em Copenhage, de maneira a estudar a teoria atômica que estava sendo desenvolvida. Foi o primeiro de muitos encontros entre dois dos célebres cientistas que viveram no século XX. Heisenberg estava atento à geografia local, às características físicas e ao comportamento do palestrante e, principalmente, às palavras utilizadas, muito cuidadosamente selecionadas para explicar o seu trabalho, captando até mesmo as nuances filosóficas que ficavam subentendidas. Heisenberg chegou a comparar o modo de se expressar de Bohr ao de seu professor Arnold Sommerfeld (1868-1951). A figura de Bohr como um ídolo admirado confirmava as expectativas de Heisenberg. Neste primeiro contato, Heisenberg deu-se conta que diferente das formas tradicionais de pesquisa científica, filosofia e inspiração também podem ser utilizadas para edificar o saber científico. Nas palavras de Heisenberg: “Essa caminhada teve repercussões profundas em meu desenvolvimento científico posterior. Talvez seja mais correto dizer que minha carreira científica começou naquela tarde”. Em contrapartida, a primeira impressão que Bohr teve sobre Heisenberg era de alguém muito jovem, iniciado na física, tão logo pela teoria atômica.⁶⁹

No início, as interações de matiz pessoal delineavam a relação mestre-pupilo. Bohr era dezesseis anos mais velho do que Heisenberg, já trabalhava como professor e cientista, conferia palestras, possuía uma reputação científica e foi agraciado com o prêmio Nobel no ano de seu primeiro encontro com Heisenberg. Este era um talento em construção, que rapidamente se constituiu um professor, um renomado cientista, contribuindo para a teoria quântica e que também foi agraciado com o Prêmio Nobel, dez anos mais tarde, em 1932. Heisenberg teve a humildade e a grandeza de reconhecer Bohr como mestre e aproveitou intensamente a oportunidade de com ele aprender.

No encontro de 1922, o primeiro, a interação de natureza da teoria atômica girou em torno do conceito de “estabilidade”. Bohr explicou como atribuía importância a este conceito.

⁶⁹ Extraído de Heisenberg (1996).

Utilizando as palavras de Bohr registradas na memória de Heisenberg: “refiro-me ao fato de as mesmas substâncias terem sempre as mesmas propriedades, de os mesmos cristais se reproduzirem, os mesmos compostos químicos etc. Em outras palavras, mesmo depois de inúmeras alterações decorrentes de influências externas, um átomo de ferro continua a ser um átomo de ferro, com as mesmas propriedades de antes”. Propor uma teoria atômica que fosse capaz de permitir a evidente estabilidade da matéria, foi algo sobre o qual Bohr se debruçou. Bohr sabia que, a partir do modelo atômico do tipo sistema planetário, a estabilidade da matéria não poderia ser explicada pelos princípios da mecânica clássica. Heisenberg fazia questionamentos sobre a nova ciência que surgia e Bohr parecia compreender que se tratavam de questões naturais, até mesmo ele, pesquisador experiente, ficava aturdido com certos temas, conceitos, observações e a teoria em si. Bohr argumentava que compreender a estrutura interna do átomo era um processo que atravessava o caminho da intuição e que a teoria quântica emergente ainda precisava de uma linguagem adequada para tratar dos átomos.⁷⁰

Em 1924, Heisenberg tomou o rumo de Copenhague, para ampliar seus estudos com o Professor Bohr. Naqueles anos, o meio de transporte era portuário. Ao desembarcar e se deparar com a Alfândega, Heisenberg enfrentou algumas dificuldades, porém ao mencionar que iria trabalhar no Instituto do Professor Bohr, foi liberado. De acordo com o relato de Heisenberg, o Instituto coordenado por Bohr recebia jovens físicos de todas as partes do mundo. O idioma era sempre um desafio, além da ciência. Na ocasião de 1924, Heisenberg ainda era apenas um aluno, se beneficiou mais da vivência no Instituto, do que da presença propriamente dita do atarefado Bohr. Entretanto, Bohr, por afinidade, intuiu o potencial do jovem Heisenberg, reservando algum tempo para conversas prolongadas e apresentação das belezas naturais da Dinamarca. Bohr previa que eram necessários novos experimentos para esclarecer as suas próprias questões, a estabilidade da matéria e as dúvidas inerentes ao jovem físico Heisenberg. Heisenberg refletia sobre o progresso da física como ciência exata, inquirindo assim o seu mentor, que apesar de experiente não possuía todas as respostas, porém devolvia ao pupilo novas reflexões. Como aluno, não deveria ser trivial para Heisenberg reconhecer que os átomos deviam ser concebidos como imagens na consciência, onde se poderiam estabelecer ligações mentais, como elucubrava Bohr. As reflexões giravam em torno do fato de que todo novo fenômeno de raiz científica poderia ser explicado, através do uso de conceitos e métodos já disponíveis. Entretanto, na teoria atômica, todos os conceitos já disponíveis revelaram-se insuficientes. A constatação de que a física newtoniana não se aplica ao interior do átomo

⁷⁰ Ibidem.

causava certa incredulidade à comunidade científica. Bohr contou à Heisenberg que na época em que era jovem como ele, teve a oportunidade de frequentar o laboratório do Professor Ernest Rutherford, em Manchester, e assim como fazia Heisenberg, inquirir o mestre com perguntas sobre a estrutura do átomo.⁷¹

Com o passar do tempo, Heisenberg observou que os ensinamentos e projeções de Bohr sobre a física atômica foram se concretizando. Isso mostra que Heisenberg recebeu uma boa influência científica.

Em 1925, Heisenberg retornou ao Instituto dinamarquês, para junto à Bohr trabalhar na explicação dos fenômenos de espalhamento detectados por Hendrik Kramers (1894-1952), aluno de doutorado de Bohr. Em seus relatos, Heisenberg menciona que não se constituiu um processo de dedução de relações matemáticas corretas, mas a adivinhá-las a partir de similaridades com as fórmulas da teoria clássica. Assim, é possível observar uma forma não tradicional de se desenvolver a ciência. A intuição também pode ser utilizada no progresso da ciência. Ainda em 1925, após sua estadia em Copenhague, Heisenberg retomou seus trabalhos de pesquisa na Universidade de Göttingen – desde julho de 1924, era livre-docente da universidade - fazendo uso dos mesmos métodos que se haviam comprovado úteis em seu trabalho com Kramers, em Copenhague. Heisenberg relata que este trabalho o ajudou a se convencer de que era preciso ignorar o problema das órbitas dos elétrons no átomo e tratar as frequências e amplitudes associadas às intensidades das linhas espectrais como substitutos perfeitamente adequados.⁷²

A influência de Bohr sobre Heisenberg levou este a declarar que “eu vinha dedicando novas reflexões aos problemas teóricos ligados à natureza das partículas elementares”.

Em 1925, o cientista francês Louis de Broglie (1892-1987) propôs que o dualismo onda-partícula presente na luz, poderia estar presente também no comportamento da matéria. Em 1926, foi amplamente divulgada a equação da onda do físico austríaco Erwin Schrödinger, seus resultados implicavam que a mecânica ondulatória por ele desenvolvida era matematicamente equivalente à mecânica quântica. Inicialmente, o Círculo de Copenhague foi atraído pela proposição de Schrödinger, porém ao se deparar com a interpretação física dos resultados se viu contrariado, pois negava a descontinuidade como característica dos fenômenos atômicos. Heisenberg posicionou-se de modo convergente ao Círculo de Copenhague, pois se

⁷¹ Ibidem.

⁷² Ibidem.

reconhecia como parte atuante do Círculo. Heisenberg disse ter sido convencido por Bohr de que era impossível construir um modelo descritivo espaço-temporal dos processos atômicos. Heisenberg teve a oportunidade de um encontro presencial com Schrödinger, no seminário de Munique, Alemanha, onde discutiram ideias e posicionamentos em relação à teoria atômica, contando também com a presença de outros cientistas influentes. Durante o seminário, a divergência entre Heisenberg e Schrödinger prevaleceu. Heisenberg, por carta, relatou à Bohr o ocorrido e mostrou-se insatisfeito. Assim sendo, para esclarecer as premissas do comportamento subatômico, Bohr convidou Schrödinger para uma visita à Copenhague, convite este que foi aceito. Obviamente, Heisenberg se juntou ao grupo. O Círculo de Copenhague, incluindo Heisenberg, presenciou acaloradas discussões entre Bohr e Schrödinger. Findo os dias intensos de debates científicos, o Círculo de Copenhague mostrou-se convicto e firme de seu posicionamento perante à interpretação física da mecânica quântica.

73

Após esse evento, Heisenberg chegou a morar no sótão do Instituto, onde, tarde da noite, ele e Bohr iniciavam discussões sobre a teoria quântica, discussões que em última análise corroboraram para construir a nova física. Com o intuito de dissolver as dúvidas teóricas e filosóficas, perceberam-se enveredando por caminhos distintos, porém sempre chegando às mesmas conclusões. No entanto, não eram conclusões definitivas, que sustentassem a teoria quântica. Ainda havia muito por descobrir. Bohr defendia o princípio da complementaridade (onda-partícula) e Heisenberg defendia o princípio da incerteza, porém ambos não se mostravam antagônicos, poderiam conviver entre si. O princípio da incerteza não negava a ideia de complementaridade.

Foi estabelecido um elo de afeto entre Bohr e Heisenberg que se aprofundou em uma coleção de afetos, ao longo dos anos, na medida em que mesmo após Heisenberg ter se tornado um professor e cientista na Alemanha, durante o período de férias, mantinha as visitas à Copenhague, ligando-se às discussões dos cientistas do Círculo de Copenhague e submetendo-se ao aconselhamento com o mestre Bohr. As discussões do Círculo de Copenhague se davam no Instituto Bohr, em sua casa de campo e também num barco à vela atracado no porto de Copenhague. Heisenberg considerava uma honra poder acompanhar os filhos pequenos de Bohr em passeios de carroça.⁷⁴

⁷³ Ibidem.

⁷⁴ Ibidem.

Bohr, Heisenberg e amigos costumavam fazer excursões para apreciar a beleza natural, geralmente, da Dinamarca, enquanto travavam discussões físicas e filosóficas. Até mesmo Christian (filho de Niels Bohr) chegou a acompanhar o pai nessas aventuras.

Nos primeiros encontros Bohr e Heisenberg tratavam-se por “senhores”. Com o passar dos anos, essa formalidade foi excluída e passaram a se tratarem mesmo pelo primeiro nome, em vez do sobrenome.

Entre 1930-1932, apreciava muito à Bohr, Heisenberg e amigos do Círculo de Copenhage conversar sobre a recusa de Albert Einstein em aceitar o caráter estatístico da nova mecânica quântica e o papel do acaso. Conversavam também sobre possíveis aplicações da complementaridade. Algumas vezes não concordavam, mas sempre ouviam a opinião de Bohr com entusiasmo.

Na Páscoa de 1933, foi a vez de Bohr e outros amigos se dirigirem ao convívio de Heisenberg, para esquiar. Decerto que a atividade esportiva era permeada por diálogos científicos e filosóficos sobre o avanço da física atômica. Nesta ocasião, o consenso no Círculo de Copenhage era de que a era dourada da física atômica se aproximava do fim. O fato interessante do encontro de 1933 é que Bohr levou uma fotografia feita em uma câmara de nuvem, que ele trouxera da Califórnia, levantando o tema da teoria relativística dos elétrons no contexto do trabalho de Paul Dirac (1902-1984), que estava alinhado aos experimentos e à matemática, de modo que era possível concluir que, além do elétron de carga negativa, devia existir também uma partícula correlata de carga positiva, denominada pósitron. A foto levada por Bohr parecia ilustrar a prova da “antimatéria”. Desde então, Heisenberg costumava refletir sobre problemas teóricos ligados à natureza das partículas elementares.

Entre 1935 e 1936, na Dinamarca, houve um encontro emblemático: Bohr, Heisenberg e Rutherford - o pai da moderna física atômica - hospedados na mesma casa de férias, onde Bohr era o anfitrião. Entre um passeio e outro, estabeleceu-se uma oportunidade singular de discussão sobre ciência, experimentos, estrutura do núcleo atômico e até mesmo sobre a possibilidade de uso do poder atômico para fins técnicos.

Na figura a seguir, pode-se ver Werner Heisenberg à esquerda com Niels Bohr à direita.

FIGURA 15 - Encontro entre Heisenberg e Bohr em 1936.



Foto retirada de <https://www.nbarchive.dk/news/bohr-heisenberg/>. Acesso em 19 set 2019.

11.4 O CLUBE DO URÂNIO

Bohr e Heisenberg foram contemporâneos do nazismo e da Segunda Guerra Mundial (1939-1945). A guerra não impediu que a física atômica continuasse a se desenvolver, apesar de todos os transtornos causados. Heisenberg, como renomado cientista, teve a opção de emigrar, porém seu senso moral achava injusto abandonar alunos e jovens cientistas sem as mesmas possibilidades. Inicialmente, ele acreditava que Hitler perderia a guerra. Ele preferia aguardar o fim da guerra e trabalhar pela reconstrução alemã, após os inevitáveis escombros. De fato, seu trabalho durante a guerra auxiliou o futuro desenvolvimento da técnica atômica pacífica do período pós-guerra.

Em 1939, Heisenberg foi convocado a trabalhar na guerra, em prol da Alemanha. Assim como outros colegas, Heisenberg foi incumbido de integrar o Departamento de Material Bélico do Exército, o chamado “clube do urânio”, em Berlim. Eles estariam felizes, se fossem tempos de paz no mundo. A tarefa era a exploração técnica da energia atômica, a qual Heisenberg defendia a hipótese de que se daria apenas num horizonte de tempo distante. Heisenberg afirmava não ser possível a fabricação da bomba atômica, por nenhuma das partes, a tempo de uso na Segunda Guerra Mundial. Na remota hipótese da construção da bomba atômica, preferia ele ter o controle do desenvolvimento científico e assim ter a possibilidade de retardar o

processo. Após alguns estudos essa convicção foi um pouco transformada, Heisenberg admitia ser possível a construção da bomba, a despeito de um esforço técnico que não seria plausível.⁷⁵

Em 1941, a Dinamarca estava ocupada por tropas alemãs. Heisenberg conseguiu permissão para ministrar uma conferência em Copenhage. A sua real intenção era encontrar-se com Bohr para saber sua opinião sobre a viabilidade de construção da bomba atômica, em virtude do trabalho realizado com o urânio. Bohr apresentou-se horrorizado com os comentários enunciados pelo amigo, de maneira que nem conseguiu manifestar uma opinião.⁷⁶

Heisenberg recebeu na prisão, na Inglaterra, a notícia da bomba atômica sobre Hiroshima. Foi libertado em 1946 e retornou à Göttingen, a fim de reconstruir a jornada científica alemã. Ao se lançar neste objetivo, Heisenberg recebeu a colaboração de Max Planck, já bastante idoso. Planck e Heisenberg tornaram-se vizinhos, tinham o hábito de conversar sobre suas cercas do jardim e ouvir música de câmara juntos. Heisenberg e seus afins fundaram o Instituto Max Planck, após a morte de Planck.

O primeiro encontro entre Bohr e Heisenberg após a guerra se deu na casa de campo de Bohr, no ano de 1947. Ambos tentaram reviver algumas memórias e, esperançosamente, elucidar os novos rumos da sua ciência.⁷⁷

Novo encontro, no ano de 1952, mais uma vez em Copenhage. Na ocasião, a temática central concentrou-se em problemas filosóficos, considerando a forma de conceber a ciência e a metafísica pelos positivistas.⁷⁸

11.5 ALGUNS APONTAMENTOS QUÂNTICOS

Vários cientistas se envolveram na análise da teoria da estrutura atômica de Bohr e na análise da teoria da radiação da luz, verificando pontos de divergência entre a mecânica quântica e a física clássica.

O primeiro ponto de divergência entre clássico e quântico – ainda não havia uma formalização da mecânica quântica - foi detectado desde o trabalho de Planck, em 1900, ao propor a lei da radiação do corpo negro e perceber a descontinuidade do fenômeno óptico. Tal

⁷⁵ Extraído de Heisenberg (1996).

⁷⁶ Ibidem.

⁷⁷ Ibidem.

⁷⁸ Ibidem.

descontinuidade, até então, jamais fora pensada. Subsequentemente, Einstein foi mais preciso e propôs a hipótese dos *quanta* de luz. Segundo Heisenberg (1933), a descontinuidade detectada no fenômeno de radiação foi considerada nos postulados básicos da teoria do *quantum* de Bohr, permitindo-o interpretar qualitativamente propriedades químicas e ópticas dos átomos. Ainda de acordo com Heisenberg em (1933), na mecânica quântica, um sistema atômico é capaz de assumir estados estacionários discretos e, portanto, valores de energia discretos. A cada estado estacionário de um átomo corresponde um complexo inteiro de parâmetros que especifica a probabilidade de transição do seu estado para um outro.

Todavia, estamos tratando do mundo subatômico, onde as regras clássicas não se aplicam. Sobre a incerteza da localização dos elétrons, em sua conferência para o Prêmio Nobel, em 1933, Heisenberg explicou que a comparação do átomo com um sistema planetário de elétrons leva a uma interpretação qualitativa das propriedades ópticas e químicas dos átomos, no entanto, a dissimilaridade fundamental entre o espectro atômico e o espectro clássico de um sistema de elétrons impõe a necessidade de abandonar o conceito de um caminho de elétrons e renunciar a uma descrição visual do átomo.

Conforme a explicação de Heisenberg, podemos entender que atualmente não há um modelo de representação do átomo, em que possamos imaginá-lo ou visualizá-lo, como um desenho. Trata-se de uma figura mais complexa e menos exata, pode ser de “um jeito ou de outro”, ou até mesmo, “de um jeito e de outro”. Os elétrons no átomo só poderiam ser representados por figuras dinâmicas, atualizadas a cada instante.

“A Teoria da Mecânica Quântica”, trabalho publicado por Heisenberg, baseado na radiação emitida pelo átomo, foi reconhecida, principalmente, porque em decorrência da sua publicação foi possível descobrir as formas alotrópicas do hidrogênio.

Na teoria clássica, a especificação de frequência, amplitude e fase de todas as ondas de luz emitidas pelo átomo seria totalmente equivalente a especificar seu caminho de elétrons, assegurou Heisenberg (1933).

Continuando sua explicação, Heisenberg (1933) proferiu:

Similarmente, na mecânica quântica, também o complexo inteiro de amplitudes e fases da radiação emitida por um átomo pode ser observada como uma descrição completa do sistema atômico, embora sua interpretação no sentido de um caminho de elétrons que induz a radiação seja impossível. Na mecânica quântica, portanto, o lugar das coordenadas de um elétron é dado

por um complexo de parâmetros correspondendo aos coeficientes de Fourier. Contudo, não são classificados pela energia do estado e pelo número de vibração harmônica correspondente, mas estão em cada caso associados a dois estados estacionários do átomo, e são uma medida para a probabilidade de transição do átomo de um estado estacionário para outro. Um complexo de coeficientes deste tipo é comparado com uma matriz da álgebra linear. Exatamente do mesmo modo que cada parâmetro da mecânica clássica, o momento ou energia dos elétrons pode então ser atribuído a uma matriz correspondente na mecânica quântica. (HEISENBERG, 1933).

Observamos então outro ponto de divergência entre as mecânicas clássica e quântica: uma é pontual e a outra matricial. Tanto a interpretação física, como o desenvolvimento matemático demonstram esta diferença e enfatizam a complexidade da quântica.

As leis da mecânica quântica são estatísticas. As relações de incerteza fornecem um exemplo de como o conhecimento exato de uma variável pode excluir o conhecimento exato de uma outra.

Na física clássica, pesquisam-se processos e leis que os governem, no espaço e no tempo. Já a mecânica quântica, não pode ser interpretada como descrição visual de um fenômeno ocorrendo no espaço e no tempo, ela não traça a determinação objetiva dos fenômenos no espaço e no tempo.

Heisenberg (1933) atribuiu à mecânica ondulatória tornar possível o tratamento matemático do complexo sistema atômico. A análise da conexão entre as teorias ondulatória e quântica levaram ao que é conhecido como a teoria da transformação desenvolvida por Dirac. Por sua vez, a teoria da transformação tornou possível, em termos gerais, calcular, para um sistema atômico, a probabilidade de ocorrência de um fenômeno particular, sob dadas condições experimentais.

12 PAUL DIRAC: TEORIA DA TRANSFORMAÇÃO

12.1 UMA BREVE APRESENTAÇÃO

FIGURA 16 - Paul Dirac



Foto retirada de: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1933/dirac/biographical/> Acesso em 14mar2019.

Paul Adrien Maurice Dirac, na figura acima, nasceu em 1902, em Bristol, Inglaterra. Veio a falecer no ano de 1984, em Tallahassee, Estados Unidos. Filho de pai suíço e mãe inglesa, frequentou a Universidade de Bristol, onde se formou em engenharia elétrica. Em seguida, dedicou-se à formação em matemática e chegou a alcançar o posto de professor de matemática em Cambridge. Trabalhou em várias universidades, ao redor do mundo. Recebeu o prêmio Nobel em 1933, juntamente com Erwin Schrödinger.

Foi um grande cientista, um grande professor e um grande escritor. Dirac publicou alguns livros, dentre eles “A Teoria Quântica do Elétron”, de 1928, e “Os Princípios da Mecânica Quântica”, de 1930. Este último é o mais conhecido e segundo Brown (2006), através de uma linguagem descritiva, constituiu as bases de uma nova ciência, cuja criação Dirac foi protagonista.

Apesar de ter dedicado seu trabalho científico à física e à matemática, Dirac reconheceu que a sua formação em engenharia contribuiu fortemente para construir o cientista que ele se tornou, na medida em que aprendeu a tolerar aproximações, no lugar de equações exatas. Mesmo as teorias estabelecidas com base em aproximações, possuíam a sua beleza. Para a sorte do desenvolvimento da teoria quântica, Dirac não conseguiu uma colocação profissional, ao se graduar como engenheiro.

12.2 A PAIXÃO PELA MATEMÁTICA

Segundo Barut et. al. (1983), Dirac defendia que qualquer teoria física deve estar fundamentada em bases matemáticas. O próprio Dirac (1930) mencionou: “A matemática é a ferramenta adequada para se lidar com conceitos abstratos de qualquer tipo e não há limites para seu poder, neste campo. Por esta razão, um livro sobre a nova física, se não for um trabalho, puramente, de descrição experimental, deve ser essencialmente matemático”.

Sobre a importância da matemática na sua teoria da transformação, que veremos a seguir, Dirac (1930) enunciou: “O crescimento do uso da teoria da transformação, como aplicada, primeiramente, para a relatividade e depois para a teoria quântica, é a essência do novo método na física teórica” e ainda “a formulação destas leis requer o uso da matemática de transformações”. Dirac defendia a matemática como uma metodologia a ser usada a favor da física. Física teórica e matemática teriam uma relação de completude. Uma precisa da outra, de modo que a falta de conexão entre ambas pode ter como consequência a inutilidade e a apatia.

Dirac traduziu sua afinidade pessoal com Schrödinger, da seguinte forma:

Schrödinger e eu, ambos tivemos uma apreciação pela beleza da matemática muito forte, e esta apreciação da beleza matemática dominou todo o nosso trabalho. Foi uma sorte de ato de fé conosco que algumas equações que descrevem as leis fundamentais da Natureza devam ter grande beleza matemáticas em si. Era como uma religião entre nós. Foi uma religião muito rentável que abraçamos, e pode ser considerada a base de muito do nosso sucesso. (*apud*, PAIS, 1998).

Era conhecido pela forma peculiar de desenvolver a ciência, com beleza e elegância e sobretudo solidez. Conforme Brown (2004): “Ele usava sua intuição física e seu ideal de beleza da matemática para construir pontes entre as principais áreas da física”.

12.3 A CONTRIBUIÇÃO DE DIRAC À CIÊNCIA

De acordo com Barut et. Al. (1983), Dirac contribuiu para a ciência de três grandes formas:

1. Codificou a formulação geral da mecânica quântica;
2. Formulou a eletrodinâmica quântica, ou seja, a teoria que governa a interação da matéria com a radiação;
3. Construiu uma teoria relativística da mecânica quântica, a partir da denominada Equação de Dirac. Assim, foi possível prever a compreensão da antimatéria. Este fato o agraciou com o Prêmio Nobel.

Em 1925, Dirac criou a teoria da transformação da mecânica quântica, que consiste na tradução das equações clássicas para equações quânticas. Conforme explica Brown (2004), Dirac, ao estudar o trabalho de Heisenberg, em 1925, percebeu que a principal característica era que multiplicar as matrizes de grandezas físicas diferentes, como posição, velocidade e energia, não era comutativo. A ordem da multiplicação era importante. Dirac começou a chamar as novas quantidades *q-numbers* (quantum) e as grandezas físicas mais antigas *c-numbers* (clássico). Então, Dirac percebeu que cada uma das relações *q-numbers* de Heisenberg tinham uma versão *c-number* correspondente bem conhecida que poderia ser encontrada nos livros didáticos de mecânica clássica. Esta é a teoria da transformação. Dirac referia-se a ela como “minha querida”.

Gozzi (1985) corrobora afirmando que Dirac compreendeu a similaridade entre a estrutura formal das equações clássicas do movimento e aquelas quânticas. Ele indicou que a matriz quântica de Heisenberg corresponde ao formalismo Hamiltoniano clássico. O mesmo se dá para a equação da onda de Schrödinger.

Conforme já mencionado anteriormente, em 1927, Schrödinger criou a mecânica ondulatória. Então, como elucida Brown (2004), Dirac mostrou que a sua teoria da transformação era geral o bastante para incluir ambas a mecânica de matrizes e a mecânica ondulatória. Desse modo, Dirac demonstrou a equivalência entre o trabalho de Heisenberg e o de Schrödinger, que até então se percebiam rivais.

Sobre a física clássica, Dirac escreveu no prefácio do seu livro “Os Princípios da Mecânica Quântica”, de 1930: “A tradição clássica tem considerado o mundo como uma associação de objetos observáveis (partículas, fluidos, campos, etc) que se movem de acordo com leis definidas de força, então se torna possível uma figura mental, no espaço e no tempo, do esquema inteiro”. (DIRAC, 1930).

Já foi exposto anteriormente que na física quântica, diferentemente da física clássica, não é possível estabelecer um modelo palpável e preciso que descreva as leis da natureza subatômica. Sobre a realidade quântica, Dirac (1930) escreveu que “a natureza trabalha em um plano diferente. Suas leis fundamentais não governam o mundo como ele parece em nossa tela mental, de modo direto”.

Dirac (1930) provou que sabia que a teoria quântica se mostrava disruptiva, ao afirmar que:

Na aplicação da eletrodinâmica clássica ao fenômeno atômico, encontram-se dificuldades de natureza muito fundamental, o que demonstra que a teoria clássica é irreconciliável com os fatos. Por exemplo, espera-se, com base nas ideias clássicas, encontrar uma estabilidade notável dos átomos e moléculas, condição exigida para que as substâncias possuam propriedades físicas e químicas bem definidas. Estas dificuldades necessitaram de uma modificação em algumas das leis mais fundamentais da natureza e levaram a um novo sistema de mecânica, chamada de mecânica quântica, considerando as diferenças mais impressionantes (contudo, não mais importante) da mecânica velha, como a descontinuidade em certos processos físicos e a descrição em certas variáveis dinâmicas. (DIRAC, 1930).

E ainda, de forma muito autêntica e didática, Dirac (1930) explicou o que vem a ser a relação partícula-onda, na teoria quântica:

A necessidade fundamental de deixar as leis e conceitos da mecânica clássica é vista, mais claramente, através da consideração de fatos estabelecidos experimentalmente sobre a natureza da luz. Por um lado, o fenômeno da interferência e o da difração podem ser explicados somente na base da teoria ondulatória da luz. Por outro lado, o fenômeno tais quais a emissão fotoelétrica e o espalhamento por elétrons livres mostram que a luz é composta de pequenas partículas, que são chamadas de fótons, cada qual com energia e momento dependentes da frequência da luz. Estes fótons parecem ter a mesma existência que os elétrons, ou qualquer outra partícula conhecida na física. Uma fração de um fóton nunca foi observada, então nós podemos, seguramente, assumir que ela pode não existir. Para obter uma teoria consistente da luz, que inclua os fenômenos de interferência e de difração, nós devemos considerar os fótons como controlados por ondas, de forma que não se pode compreender do ponto de vista da mecânica ordinária. Esta íntima conexão entre ondas e partículas é de uma generalidade enorme na nova mecânica quântica. Ocorre não somente no caso da luz. Todas as partículas estão conectadas desta forma com ondas, que as controlam e dão origem a fenômenos de interferência e difração, sob condições adequadas. A influência das ondas no movimento das partículas é menos perceptível quanto mais massa possuem as partículas, e somente no caso dos fótons, a mais leve de todas as partículas, é facilmente demonstrada. (DIRAC, 1930).

Dirac apresentou ainda forte contribuição à teoria quântica. Além da teoria da transformação, aqui destacamos a teoria relativista do elétron, de 1928. Esta teoria revelou a evidência do pósitron⁷⁹ ou antielétron, partícula esta que é positiva, com mesma massa e carga que o elétron (negativo). O pósitron sinalizou a evidência da antimatéria⁸⁰. Desta forma, Dirac aliou a relatividade especial e a equação de Schrödinger, bem como a teoria da relatividade e a teoria quântica. A relatividade foi de particular importância no caminho de Schrödinger para construir sua mecânica ondulatória.

Paul Dirac ficou fascinado pela teoria da relatividade. Desde cedo, ele formulava que qualquer teoria fundamental da física deveria necessariamente cumprir com os princípios estabelecidos por Einstein. Kragh (2000).

Kragh (2000) observou que a teoria quântica e a teoria da relatividade especial emergiram quase simultaneamente, na primeira metade do século XX, antes da Primeira Guerra Mundial. Através dos anos de formação da teoria quântica, de 1900 a 1928, argumentos baseados na teoria da relatividade foram de grande importância. Percebe-se que estas duas grandes teorias refletem interação. Dirac foi capaz de harmonizar ambas as teorias. Apesar de diferirem em suas origens, ambas constituem a ciência da física, de modo que não é permitido que se contradigam e não podem ser separadas. Assim, as teorias fundamentais da física devem convergir tanto com a teoria quântica, como com a relatividade.

Entretanto é importante salientar que as duas teorias possuem apenas interações, elas não foram unificadas ou sintetizadas.

Em relação ao processo criativo de estudo e trabalho de correlacionar as teorias supracitadas, Dirac explicou:

Eu gostaria de mencionar que eu achava que as melhores ideias, geralmente, vinham não quando alguém estava esforçando-se por elas, mas quando alguém estava em um estado mais relaxado... Eu costumava fazer longas caminhadas solitárias aos domingos, durante as quais eu cuidava de rever a situação atual no vagaroso caminho. Tais ocasiões, frequentemente, provavam ser frutíferas, mesmo que (ou talvez porque) a proposta primária da caminhada fosse relaxar e não pesquisar. (*apud*, Pais, 1998).

⁷⁹ O pósitron foi experimentalmente comprovado no intervalo 1932-1933. Fonte: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1933/dirac/biographical/> Acesso em 26 mar 2019.

⁸⁰ A antimatéria foi observada, pela primeira vez, no CERN, em Genebra, em 1996. Fonte: BROWN, L. M (2004).

12.4 O ENTRELAÇAMENTO DIRAC-CÍRCULO DE COPENHAGE

Segundo Pais (1998), o primeiro encontro entre Dirac e Bohr ocorreu em Cambridge, no mês de maio do ano de 1925, durante uma conferência proferida por Bohr sobre os problemas fundamentais e as dificuldades da teoria quântica. Dirac considerou que os argumentos de Bohr eram basicamente de natureza qualitativa, enquanto ele ansiava por equações matemáticas. Desse modo, considerou que foi pouco influenciado por esta conferência de Bohr.

Ainda segundo Pais (1998), em julho do mesmo ano e no mesmo local, Dirac encontrou-se com Heisenberg. Conversaram a respeito do primeiro artigo sobre mecânica quântica, escrito por Heisenberg. Sobre as discussões e o impacto que o artigo lhe causou, Dirac deixou registrado: “Eu aprendi sobre essa teoria de Heisenberg, em setembro, e foi muito difícil para mim assimilá-la de início. Levou duas semanas; então, eu de repente, compreendi que a não comutação era, na verdade, a mais importante ideia que foi apresentada por Heisenberg”. (apud, Pais, 1998).

Na sequência das discussões e novas leituras, Dirac conseguiu gerar seu primeiro artigo de impacto na comunidade científica. Ele já havia publicado sete artigos, porém sem repercussão. Dirac apreciava intercalar esta fase criativa, com domingos de encontros com a natureza e subidas em montanhas. O apreço pela natureza contrastava com sua forma habitual de se vestir: um terno escuro.

Além do companheirismo oriundo de colegas de profissão, havia traços de amizade entre Dirac e Heisenberg. Em 1929, ambos seguiram rumo aos Estados Unidos para séries de conferências. Aproveitaram a ocasião para embarcar em um vapor através do Pacífico. Procuraram não discutir sobre ciência. A regra consistia em diversão e férias. Há relatos de Heisenberg sobre a viagem e sobre a forma peculiar de como Dirac enxergava a natureza humana:

“Nós estamos no vapor da América para o Japão, e eu gostava de tomar parte na vida social do vapor e, então, por exemplo, eu dançava à noite. Paul, de alguma forma, não gostava muito, mas se sentava em uma cadeira e olhava as danças. Uma vez, eu retornei de uma dança e peguei a cadeira ao lado dele e ele me perguntou, ‘Heisenberg, por que você dança?’ Eu disse, ‘Bem, quando existem garotas bonitas, é agradável dançar.’ Ele pensou um longo tempo sobre isso, e após cinco minutos ele disse ‘Heisenberg, como você sabe antecipadamente que as garotas são bonitas?’. (apud, PAIS, 1988, p. 14).

Entre setembro de 1926 e fevereiro de 1927, Dirac se dirigiu à Copenhague, para aprofundar diálogos com Niels Bohr, que ele tanto admirava. Deste entrelaçamento científico, surgiu a teoria da transformação proposta por Dirac, que ele considerava o seu trabalho preferido. Sobre sua estadia em Copenhague, Dirac registrou: “Eu admirava muito o Bohr. Nós tínhamos longas conversas juntos, longas conversas em que praticamente só Bohr falava”⁸¹.

Na Conferência de Solvay de 1927, em Bruxelas, Dirac teve a oportunidade de conhecer Einstein, pessoalmente. Apesar do respeito mútuo, o contato entre Dirac e Einstein não se deu de forma estreita, Pais (1998) acredita que seja porque não fazia parte da personalidade de Dirac a procura por figuras paternas.

Conforme já mencionado, foi na Conferência de Solvay de 1927 que começaram os debates entre Bohr e Einstein sobre a interpretação da mecânica quântica. Segundo Pais (1998), Dirac posicionou-se de forma neutra e procurou não se envolver nas questões. Não porque não quisesse desagradar qualquer um de seus colegas, mas porque verdadeiramente não se interessava por este debate. Em vez de se preocupar com a interpretação, Dirac preferia manter seu foco no desenvolvimento das equações. Entretanto, intimamente, acreditava que o tempo provaria que Einstein tinha razão.

Ainda na ocasião da Conferência de Solvay de 1927, Dirac se encontrou com Bohr e discordaram sobre a teoria relativística do elétron. Bohr afirmava que este era um problema já resolvido, enquanto Dirac ainda se esforçava por resolver.

12.5 A CIRCUNSTÂNCIA PESSOAL DE DIRAC

Dirac era conhecido por “falar pouco”, diferente de sua esposa húngara que tinha o hábito da conversação. O seu jeito contido se deveu à repressão de seu pai, na infância, que exigia que o filho expressasse um linguajar perfeito em francês, durante as refeições da família. No entanto, nas palavras do físico britânico Stephen Hawking (1942-2018), “quando ele (Dirac) falava, valia a pena ouvir”⁸².

⁸¹ PAIS, A.; Jacob, M.; Olive, D. I.; Atiyah, M. F.; Paul Dirac: the man and this work; Cambridge University Press (1998).

⁸² Retirado de palestra proferida pelo cientista britânico Stephen Hawking, que foi utilizada na compilação do livro de Pais (1998).

Quando ministrava uma palestra e alguém na plateia se manifestava sobre algum ponto incompreendido, Dirac respondia exatamente o que havia dito antes, repetindo as mesmas palavras.

Tímido, chegou mesmo a cogitar a recusa pelo Prêmio Nobel, porque não gostava de publicidade. Rutherford o convenceu a aceitar, alegando que a recusa chamaria ainda mais atenção. A relação afetuosa com sua mãe, não o impediu de desenvolver uma personalidade introvertida devido, fortemente, à forma como foi reprimido por seu pai, durante a infância. Após a morte de seu pai, afirmou que se sentia livre. Dirac é pouco conhecido pelo público em geral. Entre os cientistas, foi conhecido e admirado por sua integridade moral. Nas palavras de Bohr: “De todos os físicos, Dirac é o que tem a alma mais pura”⁸³.

13 CONCLUSÕES

A presente dissertação abordou dentro da história das ciências, aspectos da física moderna, desenvolvendo a observação de uma sequência de fatos e desenvolvimentos representados por grandes nomes da ciência, no que tange ao estudo e pesquisa do comportamento e estrutura do átomo. Sendo assim, através da produção de um trabalho científico de qualidade elaborado com metodologia adequada, confirmou-se o papel relevante do estudo da história, como forma de compreender as implicações que configuram o presente e desenhar as possibilidades do futuro.

A teoria atômica e as propostas de modelos que explicassem o átomo, culminaram no desenvolvimento da teoria quântica. Por sua vez, a teoria quântica, ainda nos dias atuais, está longe de ser completamente compreendida. Ainda se apresenta incognitivamente.

As condições materiais dos laboratórios científicos sofreram transformações, ao longo dos anos, propiciando o desenvolvimento de experimentos mais sofisticados, e assim alavancando o conhecimento científico.

A Europa dos primeiros anos do século XX era o grande centro científico e tecnológico do mundo. Foi neste cenário – principalmente na Inglaterra, Alemanha e Dinamarca – que a estrutura do átomo e a teoria quântica emergiram.

⁸³ PAIS, A.; Jacob, M.; Olive, D. I.; Atiyah, M. F.; Paul Dirac: the man and this work; Cambridge University Press (1998).

Quando William Thomson apresentou sua Teoria do Átomo de Vórtice, em 1867, estabeleceu a união de duas correntes de pensamento distintas: os atomistas que diziam que a natureza íntima da matéria era de caráter discreto - partículas em movimento - e os defensores de que toda a matéria do Universo era contínua - éter. A Teoria do Átomo de Vórtice não foi provada, nem refutada. Entretanto, no século XX foi abandonada.

No século XX, além de assegurar a compreensão do átomo, os cientistas evidenciaram que o átomo é divisível e possui partículas subatômicas. O crédito pela identificação do elétron, em 1897, foi dado, merecidamente, à J. J. Thomson e se configura como o marco inicial da indústria eletrônica.

J. J. ofereceu um modelo atômico à ciência, no qual os átomos dos elementos consistem de um número de corpúsculos negativamente eletrificados imersos em uma esfera de eletrificação positiva uniforme. Contudo, seu modelo foi superado pelo modelo atômico de seu aluno Ernest Rutherford, destacando a importância da continuidade na ciência.

O Laboratório Cavendish da Universidade de Cambridge consistiu em um importante cenário para a contribuição inglesa ao desenvolvimento da teoria atômica, por exemplo a identificação do elétron. Lá conviveram britânicos e estrangeiros, estabelecendo vínculos de trabalhos científicos e de afeto, destacando-se o elo formado entre J. J. e Rutherford. Rutherford foi o sucessor natural de J. J.. Sob a direção de J. J., o Laboratório Cavendish formou diversos professores e cientistas bem-sucedidos. J. J. contrariava o estereótipo do “grande cientista”, cuja vida inteira estava centrada em seus trabalhos científicos e que não tinha interesses fora dele. J. J. demonstrava amplo interesse por todas as especificidades da atividade humana. Ao longo do século XX, o investimento em pesquisa científica evoluiu de maneira mais formal, capitaneado pelo governo, que estava interessado no progresso científico aplicado às questões da Primeira Guerra Mundial. Foi nesta época que se deu a transição da ciência pura para a ciência aplicada. A geração seguinte à J. J. recebia os equipamentos já preparados para a pesquisa.

Havia muita especulação, inclusive de viés intuitivo, em torno da estrutura da matéria. No entanto, foi em 1904-1905, através de J. J. Thomson que a ciência recebeu um modelo de estrutura do átomo formalmente delineado. E na sequência, Rutherford contribuiu para a história dos modelos atômicos, ao assumir o esquema nuclear de estrutura do átomo.

Diferente da maioria dos cientistas que colaboraram na construção da teoria do átomo, Rutherford foi um experimentalista e foi um dos pioneiros, no início do século XX, a trabalhar

com o tema radioatividade. Desenvolveu um modelo em que o átomo consistia em uma carga central, positiva e relativamente larga, circundada por uma esfera de carga negativa. O termo núcleo foi usado apenas mais tarde. Com o trabalho de Rutherford, iniciava-se a física nuclear, e conseqüentemente o estudo da energia nuclear, trazendo ambos benefícios e temeridades inerentes a esta forma de energia.

A estrutura do modelo nuclear de Rutherford foi adaptada, por Niels Bohr, à teoria dos *quanta* de Max Planck, de modo que se obteve a teoria da estrutura atômica, modelo de Rutherford-Bohr, que por sua vez recebeu um conjunto de melhorias indicadas por diversos cientistas e persiste até os dias de hoje. Tal modelo é capaz de explicar quase todas as propriedades gerais da matéria.

Max Planck foi um exemplo de cientista e de homem, uma inspiração para todas as gerações do porvir. Até o final do século XIX, a comunidade científica trabalhava com três pilares na física: mecânica, eletromagnetismo e termodinâmica. Quando Max Planck formulou os *quanta* de energia, deu-se o início de uma nova ciência, a mecânica quântica. Planck foi o precursor, mas não construiu sozinho os pilares da mecânica quântica. Trabalhos sucessivos elaborados por outros grandes cientistas vieram complementar e fundamentar a nova ciência. A teoria quântica revolucionou o que se pensava conhecer sobre o comportamento do átomo, isto é, da matéria.

A história da teoria atômica confunde-se com a história da teoria quântica. O conhecimento da mecânica quântica encontra a sua raiz no estudo da estrutura do átomo. O aprofundamento do saber sobre o mundo subatômico proporcionou o advento da teoria quântica. Mesmo sem ter um pensamento consciente sobre isso, Max Planck iniciava uma nova etapa na ciência, que foi ilustrada pelo entrelaçamento científico, cultural, filosófico e afetivo dos cientistas que escreveram esta história. Este entrelaçamento contribuiu para a construção das teorias atômica e quântica, na medida em que um cientista foi capaz de influenciar o outro e conseqüentemente o seu trabalho de pesquisa. Por trás da ciência há todo um contexto temporal, de época, de localização geográfica e de orientação. Há uma conexão entre a história interna, isto é, a influência que os cientistas exercem uns sobre os outros, e a história externa, isto é, a influência do espaço e do lugar, da cultura e da arte, do tempo e do passar do tempo.

A primeira metade do século XX foi marcada pelos efeitos nefastos de duas grandes guerras. Todos os cientistas aqui abordados sofreram, em maior ou menor grau, as conseqüências infames das guerras, tanto na vida pessoal, como na vida acadêmica.

Albert Einstein foi o cientista mais popularmente conhecido, e sua Teoria da Relatividade goza de grande fama. Apesar de ter ficado conhecido pela Teoria da Relatividade, Einstein contribuiu fortemente para o desenvolvimento da teoria quântica, sendo um dos seus precursores. Este fato é pouco divulgado. Einstein identificou os *quanta* de luz e explicou o efeito fotoelétrico, dentre outras contribuições.

A interação ciência-filosofia é um fator relevante para o surgimento de novas teorias, na medida em que cientistas sofrem influências do pensamento filosófico e transferem esta influência para o seu modo de fazer pesquisa.

Einstein e Bohr, apesar da admiração mútua demonstrada, discordavam seriamente sobre alguns aspectos do comportamento da matéria, como o princípio da incerteza e o caráter estatístico atribuído à teoria quântica.

Bohr revolucionou a teoria atômica, quando corrigiu a física clássica, utilizando conceitos quânticos, isto é, introduzindo o conceito de quantização do momento angular. E para elaborar a sua teoria, inspirou-se nos trabalhos de Rutherford e J. J. Thomson. Rutherford e Bohr tornaram-se amigos íntimos por toda a vida. Não houve registros de laços de amizade entre Bohr e J. J. Assim como o Laboratório Cavendish, o Instituto Bohr era um lugar de produção de muito conhecimento, ciência e amizade.

O sucesso da mecânica clássica desenvolvida por Newton levou a comunidade científica a aplicá-la para o mundo micro. Entretanto, a partir de Bohr foi possível constatar que uma nova ciência despertaria para explicar o microcosmo. Bohr colocou-se em uma posição intermediária, em outras palavras, o modelo atômico de Bohr é semiquântico.

De Broglie sintetizou as teorias ondulatória e corpuscular da luz. Contribuiu fortemente para o desenvolvimento do modelo atômico e a história da teoria quântica, atribuindo a uma partícula material um comportamento ondulatório.

Erwin Schrödinger apresentou como grande trabalho da sua vida o desenvolvimento da equação da onda. Já para Heisenberg, o grande trabalho foi o princípio da incerteza. Dirac criou a teoria da transformação da mecânica quântica, que consiste na tradução das equações clássicas para equações quânticas.

As divergências entre Bohr e Einstein fizeram com que os demais cientistas se posicionassem. Schrödinger estabeleceu uma relação de cumplicidade com Einstein. Enquanto Heisenberg tinha com Bohr um laço de amizade sólido, além da cumplicidade científica. A

interação Heisenber-Bohr é a mais sólida da história contada no presente trabalho. Dirac apesar de ter uma relação de amizade com Heisenberg, não se posicionou.

Ambas as ciências clássica e quântica estão corretas, apenas descrevem realidades materiais distintas. A mecânica quântica revolucionou o pensamento científico contemporâneo sobre o átomo e o comportamento da matéria.

De um modo geral, os cientistas pilares da teoria atômica e da mecânica quântica possuíam caracteres humanísticos em comum como o sentimento de companheirismo entre os colegas, o espírito agregador e acolhedor dos mais velhos em relação às novas gerações. A teoria atômica e a mecânica quântica foram edificadas com muito trabalho, muito estudo, muita dedicação, mas também com leveza, alegria e amizade.

A ciência e a tecnologia devem estar à serviço da humanidade, proporcionando-lhe paz, bem-estar e melhores condições de vida.

REFERÊNCIAS

FONTES PRIMÁRIAS

BOHR, N.; **Causality and Complementarity**; Philosophy of Science, Vol. 4, No. 3 (Jul., 1937), pp. 289-298. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/184445>>. Acesso em: 07 mai. 2013.

_____. **On the constitution of atoms and molecules**, Philosophical Magazine [6] 26 (151, julho 1913).

_____. (1913) 'XXXVII. **On the constitution of atoms and molecules**, Philosophical Magazine Series 6, 26: 153, 476 — 502.

_____. (1913) 'LXXIII. **On the constitution of atoms and molecules**', Philosophical Magazine Series 6, 26: 155, 857 — 875.

_____. **Física atômica e conhecimento humano** – ensaios 1932-1957; Contraponto: 1957.

DE BROGLIE, L.V. **On the theory of quanta**. Traduzido por A. F. Kracklauer. Paris: AFK, 2004. Título original: *Recherches sur la theorie des quanta*, 1925, Ann. de Phys., 10ª série, t. III. Disponível em: <<http://www.fordham.edu/images/undergraduate/chemistry/pchem1/debrogile.pdf>>. Acesso em: 21 fev. 2019.

DIRAC, P. A. M.; **The Principles of Quantum Mechanics**; Oxford, At the Clarendon Press, 1930.

EINSTEIN, A.; LIPSCOMBE, T.; CALAPRICE, A.; **Einstein's Miraculous Year: Five Papers that Changed the Face of Physics**; Princeton University Press, 2005.

_____.; PODOLSKY, B.; Rosen, N.; **Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?**; Physical Review Volume 47; Maio 15, 1935.

HEISENBERG, W.; **The development of quantum mechanics**; Werner Heisenberg – Nobel Lecture. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2019. Thu. 14 Mar 2019. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1932/heisenberg/lecture/>>. Acesso em: 14 mar. 2019.

HEISENBERG, W.; **A Parte e o Todo**: encontros e conversas sobre física, filosofia, religião e política; Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

HEISENBERG, W.; **Physics and Philosophy** – the revolution in modern science; World Perspectives nº. 15 (1958).

PLANCK, M.; **Autobiografia científica e outros ensaios**. Rio de Janeiro: Contraponto, 2012.

HEISENBERG, W.; **The development of quantum mechanics**; Nobel Lecture, December 11, 1933. Disponível em: < <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1932/heisenberg/lecture/>> Acesso em: 28 out. 2020.

PLANCK, M.; **Planck's Original Papers in Quantum Physics**; Taylor & Francis. London. 1972.

PLANCK, M.; **The Origin and Development of the Quantum Theory**. Entregue a Royal Swedish Academy of Sciences, em Estocolmo (1920). Oxford: Clarendon Press, 1922.

RUTHERFORD, E. (1911) '**LXXIX. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom**', Philosophical Magazine Series 6, 21: 125, 669 — 688

SCHRÖDINGER, E.; **Collected Papers on Wave Mechanics**; Translated from the second German Edition; Blackie & Son Limited; London and Glasgow, 1928.

SCHRÖDINGER, E.; **O que é vida? O aspecto físico da célula viva seguido de Mente e matéria e Fragmentos autobiográficos**/Erwin Schrödinger; tradução de Jesus de Paula Assis e Vera Yukie Kuwajima de Paula Assis - São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1997. - (UNESP/Cambridge)

Schrödinger, E. [Correspondência]. Destinatário: Max Planck e Albert Einstein. Disponível em: <<https://erenow.net/common/letters-on-wave-mechanics>>. Acesso em 04 out. 2019.

THOMSON, J. J.; “On the structure of the atom: na investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure”; The London, Edinburgh, and Dublin, Philosophical Magazine and Journal of Science. [Sixth Series] March 1904.

THOMSON, J.J.; **Recollections and Reflexions**; London; G. Bell and Sons, Ltd. 1936.

FONTES SECUNDÁRIAS

"Albert Einstein." Britannica Academic, **Encyclopédia Britannica**. Disponível em: <academic-eb-britannica.ez29.capes.proxy.ufrj.br/levels/collegiate/article/Albert-Einstein/106018>. Acesso em: 29 mar. 2019.

"Electromagnetic radiation." Britannica Academic, **Encyclopédia Britannica**. Disponível em: <academic-eb-britannica.ez29.capes.proxy.ufrj.br/levels/collegiate/article/electromagnetic-radiation/106022>. Acesso em: 29 mar. 2019.

"J.J. Thomson." Britannica Academic, **Encyclopédia Britannica**, 15 Feb. 2018. Disponível em: <academic-eb-britannica.ez29.capes.proxy.ufrj.br/levels/collegiate/article/JJ-Thomson/72205>. Acesso em: 8 abr. 2019.

"Rutherford model." Britannica Academic, **Encyclopédia Britannica**. Disponível em: <academic-eb-britannica.ez29.capes.proxy.ufrj.br/levels/collegiate/article/Rutherford-model/64510>. Acesso em: 17 mai. 2019.

"William Thomson, Baron Kelvin." Britannica Academic, **Encyclopédia Britannica**. Disponível em: <academic-eb-britannica.ez29.capes.proxy.ufrj.br/levels/collegiate/article/William-Thomson-Baron-Kelvin/106465>. Acesso em: 22 abr. 2019.

"German aggressions." Britannica Academic, **Encyclopédia Britannica**. Disponível em: <<https://www.britannica.com/place/France/German-aggressions>>. Acesso em: 01 ago. 2019.

Erwin Schrödinger – Biographical. **NobelPrize.org**. Nobel Media AB 2019. Tue. 26 Feb 2019. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1933/schrodinger/biographical/>. Acesso em 26/02/2019.

ABRANTES, P.C.C.; **Imagens de natureza, imagens de ciência**; Campinas, SP: Papirus, 1998.

ANDRADE, E. N. C.; **The Birth of the Nuclear Atom**. The Rutherford Memorial Lecture, 1957.; Proc. R. Soc. Lond. A 1958 244, 437-455; doi: 10.1098/rspa.1958.0053.

BADESH, L.; **The Importance of Being Ernest Rutherford**; Science, 3 September 1971, Volume 173, Number 4000.

BANKS, E; **The Philosophical Roots of Ernst Mach's Economy of Thought**; Article in Synthese 139(1):23-53 March 2004.

BANKS, T.; **Schrodinger's Cat and World History: The Many Worlds Interpretation of Alternative Facts**; Department of Physics and NHETC, Rutgers University, Piscataway, NJ 08854; April 1, 2017; RUNHETC-2016-15, UTTG-12-16; Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1703.10470.pdf>>. Acesso em: 26 fev. 2019.

BARUT, A. O.; MERWE, A. D.; **Paul Dirac on his Eightieth Birthday**; Foundations of Physics, Vol 13, No. 2, 1983.

BROWN, H. R.; **O Debate Einstein-Bohr sobre a Mecânica Quântica**; Universidade Estadual de Campinas; Cadernos de História e Filosofia da Ciência 2 (1981), pp' 51-89.

BROWN, L. M.; **Paul A.M. Dirac's The Principles of Quantum Mechanics**; Phys. perspect. 8 (2006) 381–407.

BROWN, L. M.; **Paul Dirac: Building Bridges of the Mind**; International Journal of Modern Physics A Vol. 19, Supplement (2004) 9-20.

CAMEL, T.O.; **Entre o Discreto e o Contínuo: Os Átomos de Éter**; Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. [Rio de Janeiro] 2004.

CASSIDY, D. C.; **Einstein and the quantum hypothesis**; Ann. Phys. (Leipzig) 14, Supplement, 15 – 22 (2005) / DOI 10.1002/andp.200410125.

CASSINELLO, A.; Gómez, J.L.S.; **O mistério quântico: uma expedição às fronteiras da física**; São Paulo: Planeta do Brasil, 2017.

CHIBENI, S.S.; **Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg**; Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, n. 2, p. 181 - 192, (2005). Disponível em: <<http://www.unicamp.br/~chibeni/public/heisenberg.pdf>>. Acesso em 22 mar. 2019.

DAVIS, E.A.; **Discovery of the electron**: commentary on J. J. Thomson's classic paper of 1897; Philosophical Magazine Letters, Vol. 87, No. 5, May 2007, 293–301.

FORRESTER, R.; **The Bohr and Einstein Debate: Copenhagen Interpretation Challenged**; (2018). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3221514>>. Acesso em 20 jul. 2019.

FRANCO, D.P.; **Momentos de Sublimação**; 1.ed./Pelos Espíritos Vianna de Carvalho e Joanna de Ângelis [psicografado por] Divaldo Pereira Franco. Salvador: LEAL, 2018.

FREIRE JR, O.; PESSOA Jr, O.; BROMBERG, JL., orgs. **Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais** [online]. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física, 2011. Disponível em: <<http://books.scielo.org/id/xwhf5/pdf/freire-9788578791261.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2019.

GLAUBER, R.J.; **One hundred years of light quanta**; Ann. Phys. (Leipzig) 16, No. 1, 6 – 24 (2007) / DOI 10.1002/andp.200610222.

GOLDSTEIN, B. R.; HON, G.; **J. J. Thomson’s plum-pudding atomic model: The making of a scientific myth**; Ann. Phys. (Berlin) 525, No. 8–9, A129–A133 (2013) / DOI 10.1002/andp.201300732.

GOZZI, E.; **On the Dirac-Schwinger transformation theory in quantum mechanics a new approach**; Physics Letters, Volume 158B, number 6, 1985. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0370269385908007>>. Acesso em 28 out. 2020.

HARARI, Y. N.; **Sapiens – Uma breve história da humanidade**; Porto Alegre: L&PM, 2017.

HARMAN, P. M.; **Energy, Force, and Matter**; Cambridge History of Science Series: 1982.

HOLTON, G.; **A Imaginação Científica**; Zahar Editores, Rio de Janeiro (1979).

KASTNER, R.E.; **de Broglie waves as the “Bridge of Becoming” between quantum theory and relativity**; University of Maryland, College Park, USA (2011).

KENNEDY, P. J.; French, A. P.; **Niels Bohr – a centenary volume**; Harvard University Press (1985).

KIRILYUK, A.P.; **100 Years of Quanta: Complex-Dynamical Origin of Planck's Constant and Causally Complete Extension of Quantum Mechanics**; Solid State Theory Department, Institute of Metal Physics 36 Vernadsky Avenue, 03142 Kiev-142, Ukraine; quant-ph/0012069.

KOEHLER, C.B.G.; Camel, T.O.; Pimentel Jr, R. A.; **Éter e Estrutura da Matéria no Século**; 11º. SNHCT Simpósio Temático “História da Física”, 2008. Disponível em: <https://www.academia.edu/1698181/%C3%89ter_e_Estrutura_da_Mat%C3%A9ria_no_S%C3%A9culo_XIX>. Acesso em 17 out. 2019.

KRAGH, H.; **Relativity and quantum theory from Sommerfeld to Dirac**; Ann. Phys. (Leipzig) 9 (2000) 11–12, 961 – 974.

KRAGH, H.; **The Vortex Atom: A Victorian Theory of Everything**; Centaurus 2002: Vol. 44: pp. 32-114.

KUBBINGA, H.; **A Tribute to Max Planck**; University of Groningen (The Netherlands) – Disponível em: DOI: <<https://doi.org/10.1051/ejn/2018405>>. Acesso em 14 fev. 2019.

LOPES, C.V.M.; **Modelos atômicos no início do século XX**: da física clássica à introdução da teoria quântica; Doutorado em História da Ciência; PUC-SP; São Paulo (2009).

LUSTIG, H.; **Essay Review The Life and Times of Werner Heisenberg**; Phys. Perspect. 12 (2010) 470–496.

MUKUNDA, N.; **The Life and Work of Niels Bohr** – A Brief Sketch, Resonance, October 2013.

NIAZ, M.; KLASSEN, S.; McMILLAN, B.; METZ, D.; **Reconstruction of the History of the Photoelectric Effect and its Implications for General Physics Textbook**; Science Studies and Science Education; DOI 10.1002/sce.20389. Published online 14 January 2010 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com).

_____; **From Cathode Rays to Alpha Particles to Quantum of Action: A Rational Reconstruction of Structure of the Atom and Its Implications for Chemistry Textbooks**; 1998 John Wiley & Sons, Inc.

Nye, M. J.; **Aristocratic Culture and the Pursuit of Science**: The De Broglies in Modern France. Isis, vol. 88, no. 3, 1997, pp. 397–421. JSTOR, Disponível em: <www.jstor.org/stable/236150>. Acesso em: 01 ago 2019.

OLIPHANT, M.; “Rutherford”; Endeavour, New Series, Volume 11, No. 3, 1937. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0160932787902018>>. Acesso em 20 mai. 2019.

OPPENHEIM, J.; Wehner, S.; **The Uncertainty Principle Determines the Nonlocality of Quantum Mechanics**; Science 330 (6007), 1072-1074. <https://qutech.nl/wp-content/uploads/2017/03/The-uncertainty-principle-determines-the-nonlocality-of-quantum-mechanics-1.pdf>. Acesso em 22 mar 2019.

PAIS, A.; Jacob, M.; Olive, D. I.; Atiyah, M. F.; **Paul Dirac: the man and this work**; Cambridge University Press (1998).

PAULI, W.; **Writings on Physics and Philosophy**; Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH (1994).

PEIERLS, R. F., **Rutherford and Bohr**, Resonance, Vol.15, No.5, 2010.

RAYLEIGH, L.; **The Life of Sir J. J. Thomson, O.M.**; Cambridge University Press, (1942). Disponível em: <<https://archive.org/details/b29932208>>. Acesso em: 11 nov. 2019.

REGATO, J.A.; **Ernest Rutherford**: Our History and Heritage; Florida; April 1979, Volume 5, Number 4.

SCHWARZ, W.H.E., **100th Anniversary of Bohr’s Model of the Atom**, Angewandte Essays Int. Ed. 2013, 52, 12228-12238.

SEGRÈ, E.; **Dos Raios X aos Quarks**; Editora Universidade de Brasília (1980).

SINGH, V.; **Einstein and the Quantum**; TIFR/TH/05-39, (2005). Disponível: < <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0510180v1>>. Acesso em: 29 mar. 2019.

THE LANCET; **The Necessity for Accurate Registration**; Oct,4,1913. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(01\)79275-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(01)79275-6). Acesso em: 28 out. 2020.

THOMSON, G.; **Centenary of J. J. Thomson (1956)**; Disponível em: <<http://science.sciencemag.org/content/124/3233/1191.citation>>. Acesso em: 8 abr. 2019.

VILLENEUVE, D.M.; **Toward Creating a Rutherford Atom**; Science, 18 March 2005 Vol 307. Disponível em: <http://science.sciencemag.org/>. Acesso em: 17 mai. 2019.

WEBSTER, A. G.; **Science**; 1908. Disponível em: <<http://science.sciencemag.org/content/27/679/1.citation>>. Acesso em: 27 abr. 2019.

WHEELER, J. A.; **Biographical Memoirs**; Volume 51. Washington, D.C.: National Academy of Sciences, 1980. Disponível em: < <https://doi.org/10.17226/574>>. Acesso em 11 fev. 2020.

ANEXO

Citações em inglês:

1. “The view that the atoms of the elements consist of a number of negatively electrified corpuscles enclosed in a sphere of uniform positive electrification, suggests, among other interesting mathematical problems, the one discussed in this paper, that of the motion of a ring of a n negatively electrified particles placed inside a uniformly electrified sphere”. (THOMSON, 1904).

2. Texto extraído de Lord Rayleigh (1942), página 197: “‘They expect’, he said, ‘to be given a properly designed piece of apparatus which will work.’ In the earlier days we had to make it work ourselves, as best we could, whatever its natural deficiencies might be”.

3. “My dear Professor,
 I have been thinking over the Cavendish matter but of course there are a number of factors that enter into the question. Before coming to any decision there are several important points on which I would like your views and frank opinion.
 Suppose I stood and were elected, I feel that no advantages of the post could possibly compensate for any future disturbance of our long continued friendship or for any possible friction, whether open or latent, that might possibly arise if we did not have a clear mutual understanding with regard to the laboratory and research arrangements. It is for these reasons that I feel it very desirable to discuss the position in its various bearings. In the first place, I should say that if elected I would welcome your presence in the Laboratory and would be only too happy if you would help us as far as you feel able in helping research and researchers in the Cavendish”. (RUTHERFORD, 1919).

4. “Dear Rutherford,
 I am anxious to make the position with regard to the Cavendish Laboratory as clear as possible, even at the risk of repeating what I said before. The intention is to make the two Professors as independent as if their laboratories were in separate buildings and as soon as the necessary funds can be got the University will, I am sure, take steps to obtain a new laboratory. In the meantime a few rooms in the new wing of the present laboratory are assigned for the use of the new professorship, but these and these only will be subject

to his control. Speaking for myself, I should never dream of interfering in any way with the rest of the laboratory or expressing an opinion about matters of policy. I should treat it just as I would a separate laboratory a mile away". (THOMSON,).

5. "A radioactive source capable of emitting alpha particles (i.e., positively charged particles, identical to the nucleus of the helium atom and 7,000 times more massive than electrons) was enclosed within a protective lead shield. The radiation was focused into a narrow beam after passing through a slit in a lead screen. A thin section of gold foil was placed in front of the slit, and a screen coated with zinc sulfide to render it fluorescent served as a counter to detect alpha particles. As each alpha particle struck the fluorescent screen, it would produce a burst of light called a scintillation, which was visible through a viewing microscope attached to the back of the screen. The screen itself was movable, allowing Rutherford and his associates to determine whether or not any alpha particles were being deflected by the gold foil. Most alpha particles were observed to pass straight through the gold foil, which implied that atoms are composed of large amounts of open space. Some alpha particles were deflected slightly, suggesting interactions with other positively charged particles within the atom. Still other alpha particles were scattered at large angles, while a very few even bounced back toward the source". (Enciclopédia Britannica).

6. "[...] a consistent application even of the most elementary concepts indispensable for the description of our daily experience, is based on assumptions initially unnoticed, the explicit consideration of which is, however essential if we wish to obtain a classification of more extended domains of experience as clear and as free from arbitrariness as possible". (BOHR, 1937).