



Coleção Química no Cotidiano

Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quântica
Volume 22



Sociedade Brasileira de Química



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

Luiz Antônio Sodré Costa

Frederico Henrique do Carmo Rufino Ferreira

A Mecânica Quântica no Cotidiano

O INÍCIO DE UMA NOVA ERA REGIDA PELA
MECÂNICA QUÂNTICA

Coleção Química no Cotidiano

Volume 22

**A Mecânica Quântica no Cotidiano:
Radiação do corpo negro**

Luiz Antônio Sodré Costa

Frederico Henrique do Carmo Rufino Ferreira



Editora *EditSBQ / PubliSBQ*

1ª Edição

São Paulo, Brasil | Sociedade Brasileira de Química | 2026

© Editora *EditSBQ* - Sociedade Brasileira de Química

Coleção Química no Cotidiano - A Mecânica Quântica no Cotidiano

Volume 22

Luiz Antônio Sodré Costa e Frederico Henrique do Carmo Rufino Ferreira

Departamento de Química, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG

Coordenadoras do projeto (Coleção Química no Cotidiano)

Claudia Moraes de Rezende e Hélio Anderson Duarte

Editora-chefe (Coleção Química no Cotidiano)

Claudia Moraes de Rezende

Arte gráfica e editoração (Coleção Química no Cotidiano)

Cabeça de Papel Projetos e Design(www.cabecadepapel.com) e *FluxoEdu* (www.fluxoedu.com.br)

Ficha Catalográfica
Wanda Coelho e Silva (CRB/7 46)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

F48q Ferreira, Frederico Henrique do Carmo Rufino
A Mecânica Quântica no Cotidiano / Luiz Antônio Sodré Costa e Frederico Henrique do Carmo Rufino Ferreira – São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2026.
p.32 - (Coleção Química no Cotidiano, v. 22)

ISBN 978-85-64099-43-2

1. Química. 2. Quântica. I. Ferreira, Frederico. II. Título. III. Série.

CDD 547.7
CDU 547.9

Livro elaborado com finalidade didática. Proibida a sua comercialização

Prefácio

O INÍCIO DE UMA NOVA ERA REGIDA PELA MECÂNICA QUÂNTICA

Este livro é voltado para professores que querem saber um pouco mais sobre mecânica quântica e sempre pensam o que podem extrair desse tema tão fascinante e ao mesmo tempo tão complexo. Podemos começar simplesmente pensando por que começamos ensinando química no ensino médio exatamente por esse tópico. Afinal, quando estamos falando de distribuição eletrônica e diagrama de Pauling, estamos de fato falando de orbitais atômicos, estrutura eletrônica e não podemos desvincular isso da mecânica quântica. Se vocês se lembrarem, o próprio Linus Pauling além do seu livro sobre química geral, escreveu também um livro, não menos importante, sobre mecânica quântica! Mesmo no ensino superior, tenho amigos que acreditam que o curso de Química deveria ter mecânica quântica logo no início e, não no final da matriz curricular. Independentemente de estar no início ou no final do curso, a verdade é que o professor e o aluno não podem “fugir” desse tema; não apenas por questões curriculares, mas especialmente, porque a mecânica quântica pode abrir horizontes e entendimentos que antes ficavam apenas em crenças do tipo “o professor falou que é assim, então eu acredito”.

Neste material, vamos começar a aprender a ser céticos como os físicos do final do século XIX e, depois tentar evoluir nossas mentes e entender, através de um histórico contextualizado, como a mecânica quântica se consolidou como o modelo mais completo que explica o comportamento das espécies atômicas e subatômicas. Percebam que não vamos em nenhum momento entrar em questões filosóficas ou aventurescas que envolvem a palavra “quântica” sem saber o seu significado. Aqui, nós vamos começar a mostrar para o leitor a necessidade que o mundo científico tinha,

na virada entre os séculos XIX e XX, de ter um modelo atômico que melhor se adaptasse a fenômenos observáveis que não tinham mais explicação do ponto de vista da física clássica.

Na nossa tentativa de situá-los no mundo científico de um período que começou a cerca de 130 anos atrás, vamos abrir alguns quadros para falar um pouco sobre os cientistas ou mesmo sobre o contexto histórico em que cada um vivia. A Ciência não se faz apenas nos laboratórios, nos quadros, nas anotações, mas também se faz através do mundo vivenciado por uma sociedade em constante transformação.

A nossa intenção é que ao final dessa leitura você tenha a capacidade de entender que quântica é ciência e não tem nada a ver com o charlatanismo espalhado, hoje, por um mundo tão deficiente de conhecimento científico.

Desejamos uma boa leitura!

Luiz Antônio Sodré Costa

Frederico Henrique do Carmo Rufino Ferreira

Índice

Prefácio	3
Índice	5
1. POR ONDE COMEÇAR?.....	6
Vocês já ouviram falar em radiação de corpo negro?	6
Outro fenômeno: o efeito fotoelétrico.....	10
Um experimento divisor de águas: fenda dupla	13
O modelo atômico de Rutherford.....	17
2. A MECÂNICA QUÂNTICA CHEGOU PARA FICAR	21
A importância de outros cientistas além de Planck e Einstein	24
Louis de Broglie: o aristocrata que sonhava com ondas de matéria.....	25
Erwin Schrödinger: o austríaco que escreveu a “bíblia” da mecânica quântica.....	26
Max Born: o intérprete probabilístico	29
O impacto coletivo.....	30
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
Referências Bibliográficas	32
Agradecimentos	33

1. POR ONDE COMEÇAR?

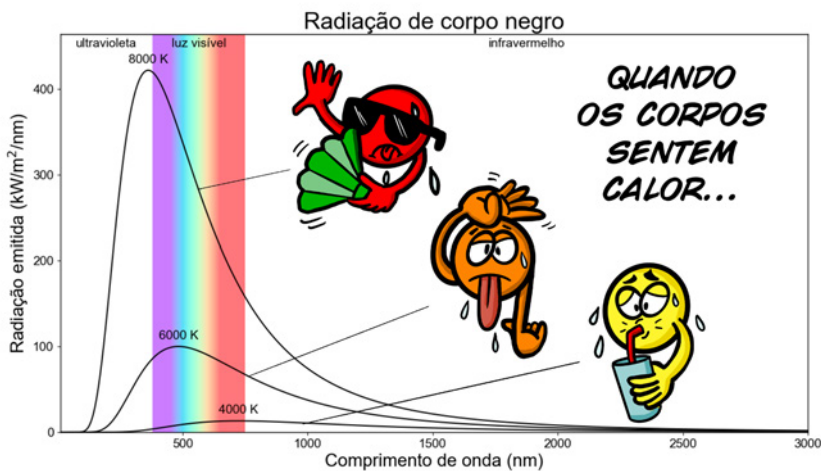
Vocês já ouviram falar em radiação de corpo negro?

Certamente, vocês já devem ter percebido que objetos muito quentes emitem luz, como um metal que foi aquecido no fogo por um longo período, ou mesmo no magma ejetado por erupções vulcânicas, que emitem uma luz de cor alaranjada. O corpo humano, por exemplo, possui temperatura em torno de $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ e vocês já devem ter visto fotografias na faixa do infravermelho que mostra o calor liberado pelo corpo (**Figura 1**).



Figura 1. Brilhos característicos de corpos aquecidos. Fonte: Google Gemini

Na verdade, o que chamamos de luz é a radiação eletromagnética, que nada mais é do que a propagação de energia por meio de ondas. Essas radiações podem ser de baixa energia, muito úteis para transmitir sinais de rádio, ou até mesmo aquecer nossa comida nos aparelhos de micro-ondas; passam pela luz visível, que consistem nas cores que observamos diariamente e nos permitem interagir visualmente com o mundo a nossa volta, e vão até radiações de alta energia que são empregadas em exames médicos como na técnica de raios X. Isso mesmo! O que diferencia todos esses fenômenos são na verdade a energia que carregam, já que todos são em essência **a mesma manifestação da natureza**.



Esquema 1. Radiação de corpo negro

Objetos do dia a dia brilham porque estão liberando energia em forma de radiação eletromagnética. O mais interessante é que a quantidade e o tipo dessa radiação dependem da temperatura do objeto: quanto mais quente ele fica, mais energia ele emite e mais intensa é a radiação. Na região do espectro visível isso se traduz na coloração: inicialmente, quando aquecemos uma faca no fogão ela fica

com um brilho vermelho bem escuro. Se esquentarmos um pouco mais, o vermelho passa para tons cada vez mais intensos, depois fica laranja, e se ficar muito, muito quente, ela passa a brilhar em um amarelo bem intenso¹. Os objetos quando aquecidos são chamados de **corpo negro**, mas isso não tem nada a ver com serem pretos, o fato é que esses corpos são muitas vezes coloridos, ou até mesmo brancos! Todavia, são chamados de corpos negros por não refletirem nenhuma luz de fontes externas, apenas emitirem luz. De forma mais simples, é como se ao ligarmos uma lâmpada ao lado deste corpo ele permanecesse escuro e não refletisse nenhuma luz como faz um espelho, porém ao ser aquecido ele começa a emitir uma determinada radiação e conseqüentemente a “brilhar”.

Por muito tempo os cientistas tentaram explicar, por meio de equações matemáticas, a relação da cor e da intensidade da luz dos objetos com a temperatura que atingiam. Inicialmente, Rayleigh-Jeans propôs uma fórmula que conseguia explicar muito bem essa relação para energias mais baixas, bem abaixo da energia das cores que enxergamos. Porém, quando a energia ia aumentando a teoria mostrava um resultado absurdo, pois a fórmula previa que os objetos extremamente quentes deveriam emitir uma quantidade infinita de luz, o que não acontece. Na realidade, ocorre exatamente o oposto e a quantidade de luz com radiação muito alta cai ao invés de aumentar. Este problema na previsão do comportamento ficou conhecido como “**catástrofe do ultravioleta**”, já que a divergência ocorre em regiões de alta energia do espectro, como é o caso do ultravioleta.

Vamos pensar analogamente em um aparelho de som: neste caso é como se a fórmula de Rayleigh-Jeans nos dissesse que ao aumentar o volume de uma música, os sons graves ficassem mais altos, os médios aumentariam mais ainda,

¹ **NÃO FAÇAM ISSO EM CASA!** Não devemos ficar brincando com facas e, ainda mais no fogo!!!

enquanto os agudos ficariam infinitamente altos! Tão altos que estourariam seus ouvidos e os alto-falantes. Isso não faz sentido, e não é o que acontece.

É nesse momento que um outro cientista chamado Max Planck pensou algo revolucionário: E se a energia não pudesse ser emitida nessa radiação de forma contínua, ou seja, em qualquer quantidade, mas sim em certas quantidades fixas como “pacotes de energia”? Em outras palavras, ele disse que a energia não era emitida como a água que sai em uma torneira, mas sim como se estivesse comprando água no mercado: sempre em garrafinhas com uma certa quantidade definida. Dessa forma, para emitir luz infravermelha ou vermelha (baixa energia) o objeto precisa liberar um "pacotinho" de energia pequeno, já para emitir luz azul ou ultravioleta (alta energia), ele precisa liberar um "pacotinho" de energia bem grande. Acontece que é muito mais "difícil" para o objeto criar esses pacotes gigantes de energia e por isso, ele emite muitos pacotes pequenos e médios, mas quase nenhum dos pacotes gigantes.

Incluindo esta ideia de pacotinhos de energia na fórmula foi possível corrigir o problema que levava a catástrofe do ultravioleta e entender melhor o comportamento da emissão de energia em corpos quentes. Planck deu o nome de

Rayleigh (nascido como John William Strutt) era lorde porque herdou o título de Barão sendo a terceira geração de sua família; dizem que o cientista-aristocrata preferia o laboratório à política. Sua vida mais introspectiva o levou a trabalhar no seu próprio laboratório na sua propriedade rural em Essex. Ao ganhar o Nobel de Física pelo descobrimento do argônio, ele não viajou à Suécia. Já James Hopwood Jeans demonstrava desde pequeno uma aptidão incomparável para a matemática. Apesar de não ter nascido nobre como Rayleigh, ele ganhou o título de “Sir” por suas contribuições na ciência e na própria divulgação científica, sendo conhecido como um educador na área de astronomia (chegou a ser Presidente da Sociedade Real de Astronomia), inclusive, além de sua devoção à música clássica, o que o levou a escrever contribuições sobre acústica.

“**quanta**” aos "pacotinhos de energia" e surgiu, então, o campo de estudo que conhecemos hoje como a Mecânica Quântica. Apesar de ser temida por muitos alunos e até mesmo professores, **significa somente que a energia está sendo tratada como uma escada**, com valores bem definidos e não como uma rampa em que o sistema pode acessar qualquer valor real de energia. Este foi o primeiro passo para entender o mundo estranho e fascinante das minúsculas partículas que compõe o universo.

Outro fenômeno: o efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é outro fenômeno importante para o entendimento da natureza da matéria. Muita gente imagina que foi Albert Einstein que descobriu e estudou esse fenômeno, mas na verdade Heinrich Hertz já havia estudado esse efeito em 1887. Einstein, de fato, estudou o efeito fotoelétrico introduzindo o conceito advindo de Planck com a quantização da energia, ou seja, introduzindo um novo modelo que pudesse conectar corretamente experimento e teoria. Isso rendeu ao cientista seu prêmio Nobel em Física em 1921. Hertz e, depois, Philipp von Lenard (1900) já haviam se deparado com o efeito fotoelétrico experimentalmente, mas não explicaram suas origens e funcionamento.

Lembram da radiação eletromagnética discutida anteriormente na sessão de radiação de corpo negro? Pois é, o efeito fotoelétrico também envolve esta mesma manifestação da natureza, porém agora ao invés de ser emitida por um corpo quente discutiremos seus impactos quando uma radiação, a partir de uma fonte ultravioleta, é incidida sobre uma superfície.

A ideia principal é que quando um feixe de luz bate em um material, ele pode dar energia para os elétrons que estão ali. Com essa energia, os elétrons

“pulam” para fora do material, sendo ejetados com o uso da energia obtida.² Uma observação interessante sobre a energia dos elétrons expulsos é que ela não depende da intensidade da luz, algo que poderíamos pensar inicialmente. Isso quer dizer que independente da fonte de luz ser fraca como aqueles *LEDS* que indicam que um equipamento eletrônico está ligado, uma lâmpada que ilumina nossa casa ou um holofote de um show, se todas possuírem a mesma cor, a energia que estes elétrons sairão do material será a mesma! Einstein pensou sobre este problema e empregou um caminho similar ao de Planck ao explicar a radiação de corpo negro: descrever a luz como “pacotes de energia”, que são transferidos aos elétrons em seu contato, e não como uma propriedade contínua.

Novamente, imagine que a luz não carrega energia como a água de uma mangueira, que jorra sem parar. Em vez disso, pense que ela vem em garrafas, novamente, como os refrigerantes que compramos no mercado. Existem garrafas pequenas, médias, grandes, e algumas até gigantescas: cada uma com uma quantidade conhecida de líquido dentro. Neste caso, os elétrons seriam como copos, que precisam de uma certa quantidade de energia para serem ejetados do material. Se esta energia fosse o momento em que o copo transborda, conseguimos entender melhor como o efeito fotoelétrico ocorre: se a luz vier em garrafinhas muito pequenas, que mal cobrem o fundo do copo, o elétron não terá energia suficiente para ser liberado. Porém, se no lugar tentarmos colocar todo o líquido de uma “garrafa de 600mL” em um copo, ele irá encher e transbordar. De forma semelhante, se tentarmos colocar todo o refrigerante de uma garrafa de 2L em um simples copo iremos desperdiçar muito mais da bebida, já que grande parte dele irá derramar.

A quantidade de líquido que cabe no copo é limitada e igual em todos os casos, e se mantivermos nossa analogia com a energia que o elétron precisa para

² Atenção professores e alunos, elétron não sai “pulando” por aí. Isso pode ser usado apenas como uma figura de linguagem; usem desde o início a linguagem científica correta.

sair do material, essa seria nossa função trabalho, definida por Einstein como a energia necessária para que o elétron se livre das forças que o mantêm preso no material e seja, então, liberado. Qualquer garrafinha que contenha menos energia do que a função trabalho não será capaz de retirar essa partícula do material. Complementarmente, qualquer garrafinha que entregue mais energia do que a função trabalho permitirá que ele saia do material e ainda leve um pouco de energia com ele na forma de velocidade! Ou seja, quanto mais líquido transbordar do copo, mais rápido o elétron sai, mais energia cinética (energia do movimento) ele possui. Esses “pacotes” de energia, aqui tratados como “garrafinhas”, foram posteriormente chamadas de fótons por Gilbert N. Lewis, apenas em 1926.

A palavra "**photon**" ou em português fóton só foi usada pela primeira vez em 1926 por Gilbert N. Lewis, físico-químico americano responsável pela teoria ácido-base eletrônica. Foi na sua publicação no periódico *Nature* em dezembro daquele ano que Lewis cunhou a palavra fóton pela primeira vez, inclusive no título do trabalho, *The Conservation of Photons*. As palavras ou termos usados por diversos cientistas até chegar em fóton foram tendo suas variações, de acordo com o que segue abaixo:

Planck (1900): *Energiequanten* (quanta de energia).

Einstein (1905): *Lichtquanten* (quanta de luz).

(1923): *quanta of radiation* (quanta de radiação).

Lewis (1926): *photon* (fóton).

Vamos nos lembrar da sessão anterior que a cor da luz está diretamente relacionada com a energia que ela carrega, sendo no espectro visível o vermelho a de menor energia até o azul, que possui maior quantidade de energia. Assim, o vermelho seria nossa garrafa “caçulinha”, aumentando até o verde, uma garrafa de 600 mL, até o azul, uma garrafa de 2 L. Assim, a intensidade da luz, que reflete no seu brilho, não está relacionada à quantidade de energia que cada fóton carrega, mas sim com a quantidade de fótons que compõem a luz: quanto mais brilhante é uma luz mais fótons são emitidos pela fonte luminosa.

Dito isso, conseguimos entender melhor o fenômeno do efeito fotoelétrico: se aumentarmos a energia dos fótons através da mudança da luz para cores cada vez mais próximas do azul ou além, os elétrons são ejetados cada vez com maior velocidade. Diferentemente, quando o brilho da luz aumenta, o número de fótons que são emitidos a uma dada velocidade aumenta proporcionalmente. Este efeito também pode ser explicado através de um pequeno circuito elétrico acoplado a um amperímetro (aparelho que mede a corrente elétrica, ou, de forma mais simples, o número de elétrons que passa pelo fio).

Um experimento divisor de águas: fenda dupla

Discutimos anteriormente que a luz interage com uma superfície na forma de fótons, ou seja, “pacotinhos de energia”. Também já escutamos (e nós mesmos utilizamos) termos como radiação solar, espectro de emissão do sol, entre outros. Todos indicam uma propagação na forma de onda! Pois é, e se eu te falar que a luz se propaga como se fosse uma onda, mas interage como se fosse uma partícula? É deste conceito que surge a dualidade partícula-onda que atribuímos a muitas coisas na mecânica quântica. Não quer dizer que uma se transforme na outra

dependendo da situação. Longe disso!!! Na verdade, essas “entidades”³ são o que chamamos de objeto quântico e são descritas como partículas-onda, já que compartilham propriedades de ambos.

Para demonstrar tal fenômeno entre os fótons, Thomas Young, importante cientista inglês considerado o “pai da óptica ondulatória” montou um sistema como o descrito pela **Figura 2**: um laser foi colocado apontando para uma placa que possui duas fendas e, atrás dela, uma tela. A ideia é que a luz emitida pelo laser passe pelas fendas e seja observada na tela. O impressionante é que na tela se observa um padrão de interferência da luz, que consiste em várias linhas com diferentes intensidades de luz, diferente do esperado para uma luz que consiste em partículas clássicas.

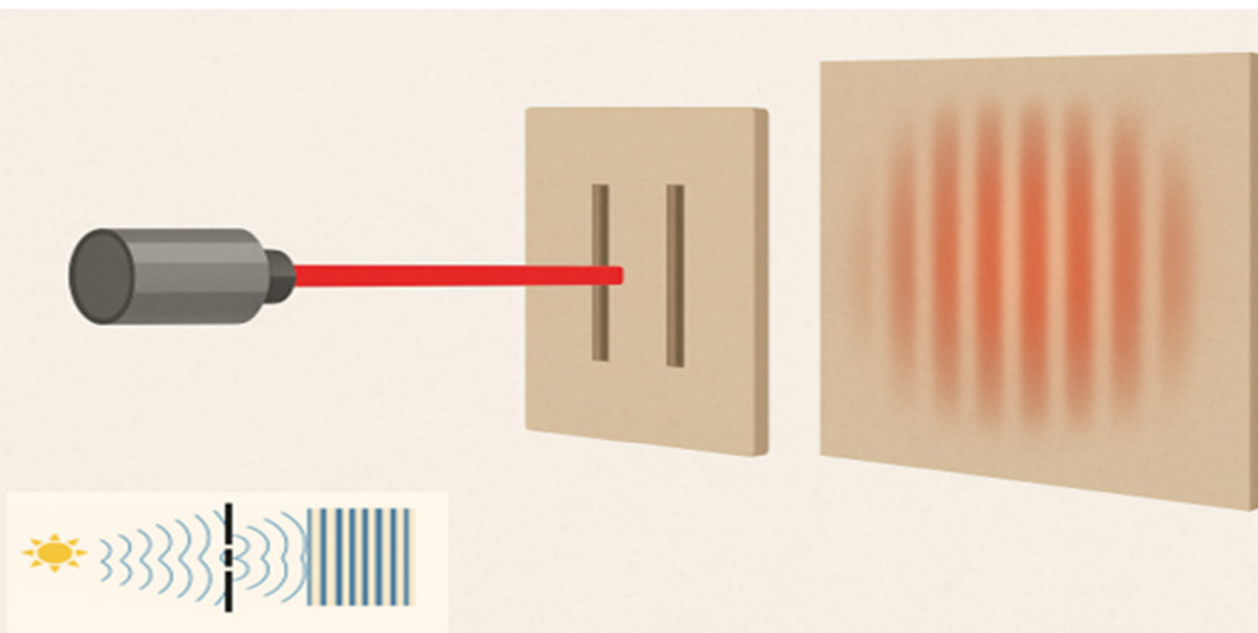


Figura 2. Ilustração sobre o experimento da fenda dupla. Fonte: ChatGPT

³ Não estamos falando de fantasmas, hein!

Um padrão de interferência pode ser bem visualizado na superfície de um lago. Imagine jogar uma pedra em um lago: ela forma ondas circulares que se espalham pela água, ficando cada vez mais fracas à medida que se afastam do centro. Agora, pense em jogar duas pedras, próximas uma da outra. As ondas criadas por cada pedra vão se encontrar e interagir (**Figura 3**). Se duas ondas se encontram no alto (as chamadas cristas de onda), elas se juntam e formam uma onda ainda maior. Se uma está no alto e a outra embaixo (vale da onda), elas podem se cancelar, ficando menores ou até sumindo. Esse desenho de várias faixas claras e escuras, que aparece quando as ondas se misturam, é chamado de padrão de interferência. Ele acontece não só na superfície da água, mas também com a luz e mostra que, mesmo sendo composta de partículas chamadas fótons, a luz pode se comportar como uma onda!



Figura 3. Duas pedras jogadas na água e formando o padrão de interferência de ondas.

Fonte: [Google Gemini](#)

Este experimento serviu para comprovar a teoria ondulatória da luz, estabelecida por Christiaan Huygens quando publicou a obra *Traité de la Lumière* (Tratado da Luz), na qual ele observou e descreveu fenômenos como a reflexão e a refração da luz, no século XVII. Observem que a convincente explicação de Huygens sobre a refração era algo que a física newtoniana não conseguia explicar. Mesmo com os padrões de interferência, a luz sempre interage com a tela (ou qualquer outra superfície) não como ondas, mas como partículas, ou seja, como fótons! Cabe ressaltar que os experimentos de Thomas Young só vieram mais de 100 anos depois do Tratado da Luz de Huygens, o que mostra a genialidade do descobridor dos anéis de Saturno.

Outro detalhe interessante da mecânica quântica se mostra presente nas versões do experimento que conta com detectores em cada uma das fendas. Esses detectores nada mais são do que equipamentos que indicam por qual fenda a “partícula de luz” passou registrando esta passagem. Neste caso, por terem que interagir com a partícula para detectá-la, a luz passa a exibir comportamento de partícula e, diferentemente de uma onda, passa apenas por uma das fendas. Nestes casos elas não geram um padrão de interferência na tela como anteriormente.

Experimentos como esses demonstram o estranho mundo quântico e suas estranhas propriedades! Outros cientistas repetiram o experimento da fenda dupla para diferentes partículas como o elétron (Davisson e Germer; George Paget Thomson e Alexander Reid) e reiteraram o comportamento dual partícula-onda, fenômeno que a mecânica clássica não era capaz de explicar até então e, ampliando o entendimento do mundo de que a matéria ao nosso redor poderia, em certas condições, também serem descritas como uma onda.

O modelo atômico de Rutherford

Finalmente chegamos a um assunto que talvez já esteja mais próximo do conhecimento escolar. É muito comum nos primeiros anos do ensino de química, normalmente no ensino médio, se falar sobre modelos atômicos e seu desenvolvimento: muitas das vezes partindo das primeiras discussões acerca da composição da matéria na Grécia antiga com Demócrito e Leucipo, passando por grandes avanços ao longo dos anos até chegar em um modelo de Schrödinger, totalmente matemático.

Um dos modelos bem estabelecidos para a descrição do átomo foi o modelo de Rutherford, que tratava o sistema atômico de forma semelhante ao sistema solar: ao contrário do que vinha sendo descrito até o momento o átomo de Rutherford não era maciço, mas possuía grande parte de seu espaço “vazio” com uma pequena e densa região no centro com carga positiva, a qual foi denominada núcleo. Praticamente toda a massa do átomo estava presente nessa pequena região central que era cercada por uma região chamada eletrosfera. A eletrosfera ocupava parte deste espaço vazio ao redor do núcleo atômico e continha as cargas negativas do átomo: os elétrons. Esse arranjo entre núcleo e eletrosfera foi descrito de forma análoga ao sistema solar com o sol na posição central (núcleo) sendo orbitado pelos planetas (elétrons) em órbitas circulares. O elétron era eletricamente neutro e isso significa que o número de prótons presentes no núcleo atômico era igual ao número de elétrons que o orbita. Este modelo por si já causou uma rachadura no meio científico, pois derrubou o modelo anterior de Thomson (o "pudim de passas") e introduziu a ideia de um núcleo atômico. Até aqui você pode não ter percebido nada de errado com este modelo, afinal ele servia até que bem para explicar o fenômeno do espalhamento de partículas alfa e a preponderância dos espaços vazios no átomo.

Quando paramos para analisar o modelo sob a ótica do que era estabelecido pela física até o momento (o que chamamos de física clássica hoje) alguns problemas ficam evidentes. Primeiramente, era impossível que o átomo proposto fosse estável. Isso acontece pois quando uma partícula carregada, como o elétron, gira em torno do núcleo positivo a teoria do magnetismo clássico prevê uma irradiação de energia contínua, ou seja, o elétron iria liberar continuamente energia enquanto realiza o movimento. Essa liberação de energia causaria uma redução de sua velocidade e uma aproximação contínua ao núcleo, até que... BOOOM! Eles iriam se chocar. O interessante é que cálculos baseados na física clássica indicavam que esse colapso deveria ocorrer em uma fração de segundo! No entanto, sabemos que isso não ocorre, uma vez que as coisas existem ao nosso redor e tudo é composto por esses átomos.

Outro fenômeno muito comum que não podia ser explicado por este modelo era a emissão e absorção dos elementos químicos. Quando gases são aquecidos, ou expostos a uma corrente elétrica, eles emitem luz com comprimentos de onda específicos (ou seja, uma luz composta de cores bem definidas). Ao passar essa luz por um prisma, observa-se que o espectro não é contínuo como o de um arco-íris, mas sim composto por uma série de linhas coloridas discretas e bem definidas, características de cada elemento. Assim, diferentemente da emissão do corpo negro que mencionamos anteriormente, essa luz é discreta, depende da composição química do gás e hoje sabemos que são resultados dos elétrons transitando entre níveis de energia específicos dentro de um átomo.

Bem, segundo o modelo de Rutherford os elétrons não possuíam órbitas definidas e podiam realizar o movimento ao redor dos núcleos a qualquer distância dele, ou seja, com qualquer energia. Como não havia caminhos preestabelecidos e a energia liberada é justamente a diferença de energia entre as órbitas, qualquer elemento químico poderia emitir basicamente qualquer luz e se geraria um espectro

contínuo, como o arco-íris, o que não é observado. Na verdade, o espectro de emissão pode ser empregado para a identificação de um elemento, sendo basicamente uma impressão digital química de cada elemento. Inclusive, é assim que são determinadas a composição de objetos que estão muito distantes de nós como as estrelas. A luz proveniente do nosso Sol, por exemplo, exhibe entre várias outras, linhas de absorção do elemento sódio, Na⁴.

Contudo, sabemos que a matéria é estável. Os átomos não colapsam, e a existência de elementos estáveis e da própria matéria como a conhecemos era uma prova contundente de que o modelo de Rutherford, na perspectiva da física clássica, estava fundamentalmente incompleto.

Sabemos o que veio depois... Para resolver este problema fundamental do modelo de Rutherford, um cientista chamado Niels Bohr contribuiu com a quantização destas órbitas circulares: se antes os elétrons poderiam orbitar o núcleo atômico com qualquer distância, agora só era possível ocupar uma distância fixa e bem definida, sendo que o elétron não emitiria e nem absorveria energia enquanto estivesse orbitando por uma dessas “vias”. É como nas pistas de corrida em que vemos os atletas ocuparem raias distintas: ao ganhar energia o corredor ocuparia uma raia mais externa e ao liberar energia, uma raia mais interna (**Figura 4**).

Niels Henrik David Bohr nasceu em 1885, em Copenhague, Dinamarca. Após obter o grau de doutor em 1911, Bohr foi para Cambridge estudar com J. J. Thomson, mas a barreira linguística foi um grande problema (Bohr falava bem dinamarquês e alemão, mas falhava no inglês). Em seguida, trabalhou por um período em Manchester com Ernest Rutherford, que o descreveu como “esse jovem dinamarquês é o rapaz mais inteligente que conheci”. O modelo de Rutherford-Bohr surge após algum tempo com muita maestria e mecânica quântica.

⁴ Apesar disso não tentem lamber para descobrir se é salgadinho!!!

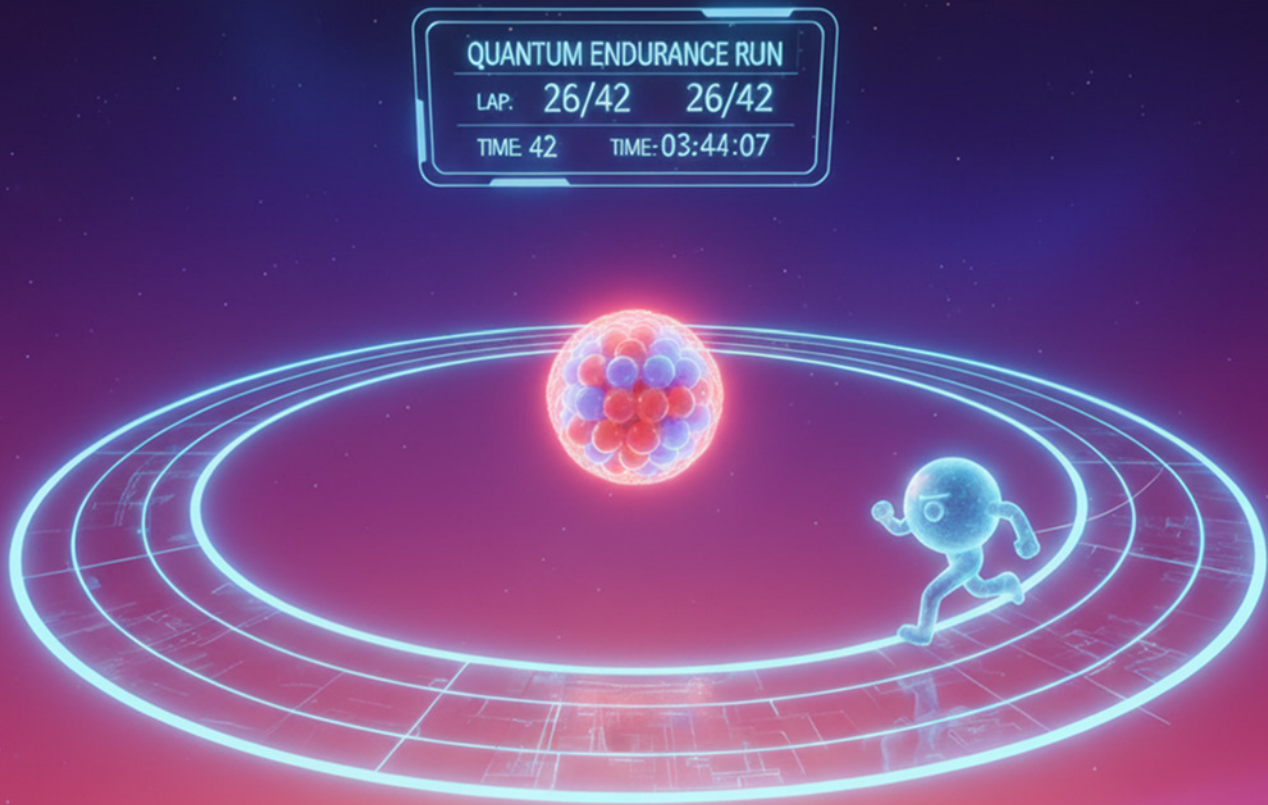


Figura 4. Imagem pitoresca de um elétron “correndo” numa determinada raia ao redor do núcleo.

Fonte: [Google Gemini](#).

No final do século XIX, a teoria clássica parecia um triunfo completo, descrevendo com sucesso desde o movimento dos planetas até as ondas eletromagnéticas. A teoria clássica, que descrevia com sucesso fenômenos macroscópicos, não era capaz de prever a emissão de radiação por um corpo aquecido, também não tinha bases para explicar o efeito fotoelétrico e o estranho padrão de difração que surgia no experimento da fenda dupla. Ademais, previa a destruição iminente de todos os átomos já que não era possível que uma espécie carregada permanecesse orbitando o núcleo atômico positivo indeterminadamente. Todos estes experimentos abriram a porta para que outra teoria, capaz de explicar esses fenômenos, e muitos outros, pudesse emergir: a **mecânica quântica!**

2. A MECÂNICA QUÂNTICA CHEGOU PARA FICAR

Sabe aquele filme de super-heróis que tem que falar da origem do personagem? Pois é, no tópico anterior demos algumas pistas e tentamos mostrar o caminho da nossa heroína, a **Mecânica Quântica!** Mas, assim como não é fácil ficar falando e desenvolvendo um personagem em um filme de cerca duas horas, também não é nada fácil colocar em poucas páginas a origem e o que define o desenvolvimento do caráter da nossa heroína.

Então, vejamos... Durante cerca de 30 anos a mecânica quântica foi se desenvolvendo baseada em experimentos e “renovações” nas suas respectivas teorias. Se voltarmos ao caso da catástrofe do ultravioleta devemos pensar como aquilo foi impactante na época. Na década de 1890, Rayleigh e Jeans, já mencionados anteriormente, estudaram a radiação de corpo negro usando a física

clássica (mecânica estatística e eletromagnetismo de Maxwell). A fórmula de Rayleigh (refinada por Jeans em 1905) descreve bem a região de baixas frequências, mas prevê que a densidade de energia iria para o infinito quando o comprimento de onda diminuía (região do ultravioleta). Esse impasse ficou conhecido como “catástrofe do ultravioleta”, como já falamos. No entanto, em 1905, Max Planck apresentou sua primeira fórmula empírica, diante dos colegas da Sociedade Alemã de Física (DPG, do alemão *Deutsche Physikalische Gesellschaft*) para ajustar experimentalmente o espectro de corpo negro. O próprio Planck era um físico profundamente ligado à tradição clássica, quase relutante em introduzir uma hipótese tão radical quanto a quantização. O Império Alemão prestigiava a ciência e via a física teórica e experimental como instrumentos de progresso e poder. Berlim, Munique e Göttingen eram centros mundiais de pesquisa com os maiores físicos da Europa, e pode-se dizer, conseqüentemente, do mundo ocidental. A relação próxima entre universidades, indústrias químicas e elétricas como Siemens, AEG e BASF, criou um ambiente fértil para descobertas aplicadas. A Alemanha era nada mais do que o grande centro científico, a referência. O sentimento de nacionalismo entre os cientistas e as disputas “saudáveis” com Inglaterra e França, outros dois grandes países na liderança científica e política, eram fortes.

A catástrofe do ultravioleta e a equação de Planck mostraram ao mundo científico que havia física além da mecânica clássica. Em 1905, Albert Einstein usou a quantização de energia introduzida por Planck na explicação do fenômeno do efeito fotoelétrico. Como já discutido, a energia estava contida em “pacotes de energia” que por sua vez, então, vão interagir com os elétrons da superfície de um metal, ou seja, parte da energia do fóton seria gasta para vencer o que chamamos de **função trabalho** do metal (ϕ), e o restante aparece como energia cinética do elétron (E_{cin} , **Equação 1**). Logicamente, poderíamos simplesmente mostrar a equação e mudar de assunto. Contudo, vamos primeiro tentar deixar claro o que isso significa. Estamos falando aqui de três características: dependência da

frequência (ϕ), independência da intensidade e instantaneidade. De forma geral, Einstein mostrou que aumentar a intensidade só aumenta o número de fótons, não a energia individual e que, bastava a chegada de um único fóton para liberar o elétron da superfície metálica.

$$E_{cin} = h\nu - \phi \quad \text{(Equação 1)}$$

Em resumo, podemos dizer que Einstein mostrou como a equação de Planck e o conceito de quantização poderiam ser aplicados à luz. No seu artigo de 1905 ele mostrou que a própria radiação eletromagnética é quantizada. Isso foi recebido com ceticismo e crítica na comunidade física de então, porque, com isso, ele “atacava” de certa forma a teoria do eletromagnetismo de Maxwell, de que a luz era uma onda contínua. Observem que aqui falamos de conceitos que envolvem uma complexidade de elementos. Estamos falando das bases da física clássica sendo, literal e comprovadamente, atacadas por novas descobertas. A ideia de dualidade partícula-onda já aparece a partir desse momento, mas só vai ser comprovada na década de 1920. Ou seja, isso mostra o que mencionamos lá atrás: a teoria quântica levou cerca de 30 a 35 anos para ser totalmente comprovada e aceita. Nem todos os cientistas a aceitaram de braços abertos, com muitos apresentando uma ferrenha oposição em seus anos iniciais dada a mudança brusca de paradigma entre as físicas clássica e quântica. O próprio Einstein, em um primeiro momento afirma, em sua icônica frase: “Deus não joga dados”, expressando sua controversa opinião acerca da natureza probabilística inferida por essa crescente teoria. Mas como assim probabilística? Bem, é só lembrarmos do

O ano de 1905 foi considerado mágico para Albert Einstein. Seu artigo *Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Standpunkt* (Sobre um ponto de vista heurístico concernente à geração e transformação da luz) foi a base da mudança dos conceitos que sustentavam a mecânica clássica. Em uma tradução acadêmica e literal de um trecho inicial do artigo, Einstein escreve: “Segundo a teoria de Maxwell, em todos os fenômenos puramente eletromagnéticos — portanto também na luz — a energia deve ser entendida como uma função contínua no espaço, enquanto a energia de um corpo ponderável, de acordo com a concepção atual dos físicos, deve ser representada como uma soma distribuída sobre os átomos e elétrons.” O destaque a esse dilema entre luz e corpo, ou seja, matéria mostra o tom do artigo e seu caráter crítico às teorias clássicas.

experimento da fenda dupla discutido anteriormente! Esse experimento levou à conclusão de que, na mecânica quântica, não existe determinismo absoluto, como no mundo descrito por Newton. Ao repetir o experimento muitas vezes, os pontos individuais se acumulam e revelam o padrão probabilístico.

A importância de outros cientistas além de Planck e Einstein

Não sabemos exatamente de onde vem, mas a verdade é que muitos fenômenos na ciência, de uma forma geral, são atribuídos à alguns cientistas especificamente, os chamados “pais”. O “pai” da genética é Mendel, o “pai” do conceito de evolução natural é Darwin, o “pai” da química moderna é Lavoisier e, por aí vai... São muitos pais!⁵

⁵ Você deve estar se perguntando se na ciência não há “mães”. Na verdade, algumas mulheres importantes também participaram ativamente de descobertas científicas, mas por muito tempo elas foram colocadas em segundo plano na perspectiva da ciência. As mais famosas são certamente Marie Curie, Rosalind Franklin e Dorothy Hodgkin.

Muitos livros e sites de pesquisa provavelmente apontarão Albert Einstein como o “pai” da Física Moderna. No entanto, apesar da sua nova interpretação sobre o efeito fotoelétrico ser fundamental para o desenvolvimento da mecânica quântica, atribuir somente a ele essa paternidade seria muito simplista. É preciso olhar os 30 primeiros anos do século XX e entender a contribuição de cada cientista. Afinal, a visão de Einstein sobre o efeito fotoelétrico iria adiante se não fosse o modelo atômico de Niels Bohr, e depois Sommerfeld? E essa bendita dualidade partícula-onda que mencionamos anteriormente? Alguém tinha que estudar isso, certo?! Pois o francês Louis De Broglie foi determinante nisso. Vamos adiante e veremos a equação do físico austríaco Erwin Schrödinger, essa digamos, definitiva (ou quase!) na interpretação matemática da nova física. O Princípio da Incerteza de Heisenberg, as probabilidades de Max Born, o Princípio da Exclusão de Wolfgang Pauli... São muitos nomes fundamentais desde a proposição, experimentação, comprovação, até chegarmos à consolidação de uma nova e revolucionária física.

Louis de Broglie: o aristocrata que sonhava com ondas de matéria

Louis-Victor de Broglie nasceu em 1892, numa família nobre francesa. O rapaz podia muito bem ter levado uma vida tranquila de conde, apreciando os privilégios da aristocracia. Mas não: ele acabou fisgado pela física teórica. Curiosamente, ele começou estudando história, só depois migrou para a ciência.

A Primeira Guerra Mundial (1914–1918) interrompeu seus estudos, mas também o colocou em contato com o mundo das telecomunicações e ondas eletromagnéticas. Isso acendeu uma faísca que mudaria tudo. Quando voltou à universidade, já tinha em mente ideias ousadas: se a luz podia se comportar como

partícula (a história do fóton de Einstein), por que a matéria não poderia se comportar como onda?

Foi assim que, em sua tese de doutorado em 1924, de Broglie propôs que qualquer partícula material — elétrons, prótons, átomos inteiros — teria um comprimento de onda associado, dado por uma fórmula bem simples: $\lambda = h/p$ (comprimento de onda igual à constante de Planck dividido pelo momento da partícula). Parece até banal quando a gente vê hoje, mas na época foi revolucionário. Einstein leu a tese e adorou a ideia, dando uma força fundamental para que de Broglie fosse levado a sério. E logo veio a confirmação experimental: em 1927, Davisson e Germer mostraram que elétrons realmente sofriam difração ao passar por cristais, exatamente como ondas de luz. Ou seja, de Broglie tinha acertado em cheio: a matéria também podia ser onda!

Essa foi uma das sementes principais da mecânica quântica. Sem ela, Schrödinger não teria se inspirado para sua famosa equação.

Erwin Schrödinger: o austríaco que escreveu a “bíblia” da mecânica quântica

Agora vamos para Viena. Schrödinger nasceu em 1887, filho de uma família culta, e cresceu num ambiente cheio de estímulos intelectuais. Sempre foi fascinado tanto por ciência quanto por filosofia. Não à toa, suas reflexões sobre física quase sempre vinham acompanhadas de preocupações filosóficas. Na década de 1920, os físicos estavam quebrando a cabeça para entender como aplicar a ideia de ondas de de Broglie às partículas reais. Como descrever isso matematicamente? Foi aí que Schrödinger teve o estalo: e se existisse uma “equação de onda” que

descrevesse o comportamento das partículas? Em 1926, ele apresentou sua famosa equação, que hoje leva seu nome.

A equação de Schrödinger (**Equação 2**) é basicamente o coração da mecânica quântica. Ela descreve como a função de onda de uma partícula evolui no tempo. E o mais incrível: ao ser aplicada, dava resultados perfeitos para problemas como o átomo de hidrogênio, que tinha sido um pesadelo para os físicos clássicos.

$$\hat{H}\Psi = E\Psi \quad \text{A famosa Equação de Schrödinger! (Equação 2)}$$

Nessa equação, que parece simples, mas guarda muita informação implicitamente, mostramos o H, conhecido como operador Hamiltoniano. Esse operador é um operador matemático, assim como qualquer outro, que “opera” a função de onda Ψ (psi) que guarda todas as informações do sistema, gerando como resultado a energia E. Quando nos referimos a sistema, estamos falando daquilo que estamos estudando, ou seja, nesse caso, nos referimos a um átomo ou molécula, enfim, um sistema químico (uma vez que é o nosso interesse direto).

Schrödinger ficou famoso quase da noite para o dia. Sua equação oferecia uma alternativa mais intuitiva ao “modelo matricial” proposto por Heisenberg e colegas, que parecia muito mais abstrato e difícil de visualizar. Enquanto Heisenberg trabalhava com matrizes meio esotéricas, Schrödinger dava uma equação de onda que lembrava muito mais as equações familiares da física clássica.

Claro que, com o tempo, percebeu-se que as duas abordagens eram equivalentes — mas a equação de Schrödinger se tornou a versão mais popular, justamente por ser mais “palatável” e aplicável.

E não dá para falar de Schrödinger sem citar seu famoso gato. Em 1935, ele bolou esse experimento mental para criticar a interpretação dominante da mecânica quântica, mostrando o absurdo de aplicar as regras quânticas diretamente ao mundo macroscópico. O pobre gato, preso numa caixa, ficava ao mesmo tempo vivo e morto até alguém observar. Hoje, o gato de Schrödinger é praticamente um ícone pop da ciência. O experimento mental consiste basicamente em uma caixa selada com um pobre gato dentro e junto a um aparato peculiar: um único átomo radioativo, um contador Geiger⁶, um martelo e um frasco de veneno. Todo o mecanismo é desenhado para se o contador Geiger detectar radiação, ou seja, o átomo radioativo decair e liberar partículas radioativas, o martelo quebre o frasco de veneno matando o pobre do gato. Todavia, como há uma probabilidade de 50% do átomo decair radioativamente e 50% dele ficar intacto, o sistema se encontra no que chamamos de estado de sobreposição: um fenômeno quântico em que na verdade ele está decaído e intacto ao mesmo tempo! Essa sobreposição só colapsa quando o átomo é medido, em que um dos estados irá ser detectado. Aqui está o ponto crucial da história: como o destino do gato está diretamente ligado ao estado do átomo, e o átomo está em uma superposição de "decaído e não decaído", a lógica quântica dita que o gato também estaria em uma superposição. Ou seja, até que a caixa seja aberta e o sistema observado⁷, o gato está, teoricamente, simultaneamente vivo e morto.

⁶ Um contador Geiger é um aparelho usado para medir os níveis de radiação de um determinado lugar.

⁷ Algo interessante a ser mencionado é que o termo “observado” na mecânica quântica se refere a ter alguma propriedade medida, detectada em um equipamento, e não necessariamente ser observada por uma pessoa. Esse papo de “*coach* quântico” de que nós definimos os estados da matéria ao nosso redor (basta acreditarmos que mudamos a “energia” de um ambiente) é balela desde o nosso protagonismo ao uso da palavra energia. Na verdade, a sobreposição é colapsada, pois, para se realizar uma observação (medição, lembre-se do nosso termo) é necessário interagir com o sistema, o que o leva a

Max Born: o intérprete probabilístico

Enquanto Schrödinger estava animado com sua função de onda, faltava uma interpretação clara: o que exatamente significava aquela “onda” que descreve a partícula? Era uma onda física, como uma onda na água? Era algo real, ou apenas uma ferramenta matemática?

É aqui que entra Max Born. Nascido em 1882 na Alemanha, ele foi um dos líderes intelectuais da Universidade de Göttingen, um centro poderoso de física na época. Born teve a grande sacada: a função de onda não descrevia uma onda física no espaço, mas sim a probabilidade de encontrar a partícula em determinado lugar.

Essa interpretação probabilística, apresentada em 1926, mudou tudo. Em vez de pensar em trajetórias definidas (como na mecânica clássica), a mecânica quântica passou a ser vista como uma resultante de probabilidades. Isso foi um choque cultural gigantesco. Muitos físicos — inclusive Einstein — nunca engoliram completamente a ideia. Einstein dizia: “Deus não joga dados com o universo”. Mas Born defendia justamente o contrário: o mundo quântico é, essencialmente, governado pelas probabilidades.

Um experimento mental muito conhecido é o Demônio de Laplace⁸, originado pelo físico Pierre Laplace: uma inteligência hipotética que conheceria as exatas condições de tudo que forma o universo e as leis físicas que regem este

demonstrar uma propriedade bem definida, apagando todas as outras possibilidades presentes na sobreposição.

⁸ A palavra “demônio” (*daimon*) no conceito de Laplace não se refere a uma entidade maligna, mas sim a uma inteligência superior com poderes ilimitados. O demônio de Laplace pressupõe que é possível conhecer com precisão arbitrária todas as variáveis do sistema. O princípio da incerteza de Heisenberg, por outro lado, mostra que isso é impossível em nível fundamental. Portanto, o sonho determinista de Laplace cai por terra no mundo quântico: não há como prever com exatidão o futuro do universo, apenas calcular probabilidades de diferentes resultados.

mundo. O resultado deste conhecimento aliado às bases da física clássica seria um ser capaz de prever o futuro de forma exata! O que conseqüentemente feriria nossas ideias de livre arbítrio. Claro que a mecânica clássica não é o único impedimento para este ser, esbarrando também em questões termodinâmicas relacionadas a reversibilidade das reações. Porém, ao deixar o determinismo de lado, o demônio de Laplace se torna incompatível com a interpretação probabilística de Copenhague, já que a probabilidade é uma característica inerente à natureza. A premissa central do demônio é conhecer a posição exata e o momento exato de cada partícula e o Princípio da Incerteza de Werner Heisenberg afirma que isso é fundamentalmente impossível. Quanto mais precisamente você mede a posição de uma partícula (como um elétron), menos precisamente você pode saber seu momento, e vice-versa. Além disso, o universo possui uma "indefinição" intrínseca e o ser não poderia obter os dados de que precisa, não por falta de capacidade, mas porque essa informação perfeitamente definida simplesmente não existe.

Essa leitura foi fundamental para consolidar a mecânica quântica como a conhecemos. A equação de Schrödinger sem a interpretação de Born seria apenas matemática sem significado físico.

O impacto coletivo

De Broglie trouxe a ideia das ondas de matéria, Schrödinger transformou isso em uma equação poderosa, e Born explicou o sentido físico da equação, colocando as probabilidades no centro do jogo. Juntos, eles moldaram o núcleo duro da mecânica quântica.

Claro que não estavam sozinhos. Heisenberg, Bohr, Dirac e outros gigantes também estavam construindo essa nova física. Mas sem esses três, a história teria sido bem diferente.

O contexto histórico também é importante. Estamos falando de uma Europa turbulenta, com guerras e crises políticas que afetaram diretamente esses cientistas. Muitos tiveram que fugir do nazismo (como Born, que acabou indo pra Inglaterra). Schrödinger também teve sua vida virada de ponta-cabeça pelo ambiente político. Apesar das dificuldades, suas contribuições atravessaram fronteiras e moldaram a ciência global.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao chegarmos ao final desta jornada, o convite é para que a conversa comece. A ciência raramente avança através de rasgos de genialidade isolados; ela é, em sua essência, uma grandiosa construção colaborativa que evolui continuamente ao longo do tempo. Cada nova descoberta, cada teoria proposta, não surge do vácuo, mas é erguida sobre os alicerces deixados por gerações anteriores de pesquisadores de diferentes culturas e partes do mundo. O conhecimento científico é como um diálogo que atravessa séculos, onde uma ideia é testada, aprimorada e, por vezes, completamente transformada por novas evidências ou tecnologias. O que hoje consideramos um fato estabelecido, como a transição da física clássica de Newton para a mecânica quântica, demonstra que a ciência não é um dogma, mas um modelo em constante refinamento, cuja maior força reside precisamente na sua capacidade de se corrigir e se aprofundar diante de novos questionamentos. É nesse esforço coletivo e contínuo que a humanidade, passo a passo, aprimora sua compreensão do mundo que nos cerca.

É crucial entender que toda grande ideia científica, incluindo a própria mecânica quântica, é uma teoria — o que significa que ela pode, a qualquer momento, ser provada errada ou incompleta por uma nova evidência. Contudo, longe de enfraquecê-la, este é o seu maior teste: ao longo dos últimos 100 anos, em vez de ser refutada, a mecânica quântica foi consolidada por uma quantidade avassaladora de experimentos que confirmaram suas previsões com uma precisão impressionante.

Nesse ponto final, convidamos o leitor a refletir se era essa a ideia que fazia sobre a mecânica quântica. Esperamos ter trazido conhecimento para vocês com a certeza de que tudo escrito aqui é um convite aberto à ciência. Sintam-se, portanto, convidados a entrar nesse mundo.

Ilustração criada com Gemini.



Referências Bibliográficas

- Strathern, P. "Bohr e a Teoria Quântica em 90 minutos". Jorge Zahar Ed. Ltda. Rio de Janeiro, 1999.
- Odenwald, S. "De Heisenberg a Schrödinger, A História da Física Quântica". Alta Books Grupo Editorial, Rio de Janeiro, 2024.
- Einstein, A. (1905) über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 322, 132-148. <http://dx.doi.org/10.1002/andp.19053220607>.
- Para uma consulta ampla sobre a participação das mulheres na ciência vejam o link: [Women in science - Wikipedia](#).
- Homem-de-Mello, P. et al "[Mulheres na Mecânica Quântica: A Força Feminina em Superposição com a Ciência](#)". Revista Virtual de Química, Vol. 17, No. 6, 2025, 888-904, <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20250073>.

Agradecimentos

"Os autores agradecem o uso da ferramenta ChatGPT (OpenAI) e Google Gemini como apoio na confecção de figuras, assim como o Prof. Marcelo Siqueira Valle - UFSJ (marcelovalle@gmail.com) no trabalho referente a tirinha da abertura do capítulo. FHCRF agradece a sua bolsa FAPEMIG que o permite trabalhar com ciência em seu doutoramento e LASC agradece o CNPq pela bolsa de produtividade 305491/2024-5"



Uma produção SBQ - Sociedade Brasileira de Química

www.sbq.org.br

