

# Mecânica Quântica

Selecionado por [www.fisica.net](http://www.fisica.net)

# Conteúdo

## Páginas

Introdução à mecânica quântica	1
Antiga teoria quântica	5
Mecânica quântica	7
Efeito fotoelétrico	15
Postulados da mecânica quântica	17
Albert Einstein	18
Constante de Planck	31
Dualidade onda-corpúsculo	32
Efeito túnel	32
Entrelaçamento quântico	33
Equação de Dirac	34
Equação de Klein–Gordon	35
Equação de Pauli	36
Equação de Schrödinger	37
Estado quântico	38
Experimento de Davisson–Germer	38
Experimento de Stern–Gerlach	39
Experiência da dupla fenda	41
Função de onda	43
Gato de Schrödinger	45
Gravitação quântica	50
Histórias consistentes	53
Integração funcional	54
Interpretação de Bohm	55
Interpretação de Copenhaga	59
Interpretação de muitos mundos	60
Interpretação transacional	69
Interpretações da mecânica quântica	70
Lógica quântica	76
Mecânica matricial	77
Princípio da incerteza de Heisenberg	77
Princípio de exclusão de Pauli	81
Representação de Dirac	84
Representação de Heisenberg	87

Representação de Schrödinger	89
Sobreposição quântica	91
Teorema de Ehrenfest	92
Teoria das variáveis ocultas	93
Teoria de tudo	95
Teoria do campo unificado	99

## Referências

Fontes e Editores da Página	102
Fontes, Licenças e Editores da Imagem	104

## Licenças das páginas

Licença	105
---------	-----

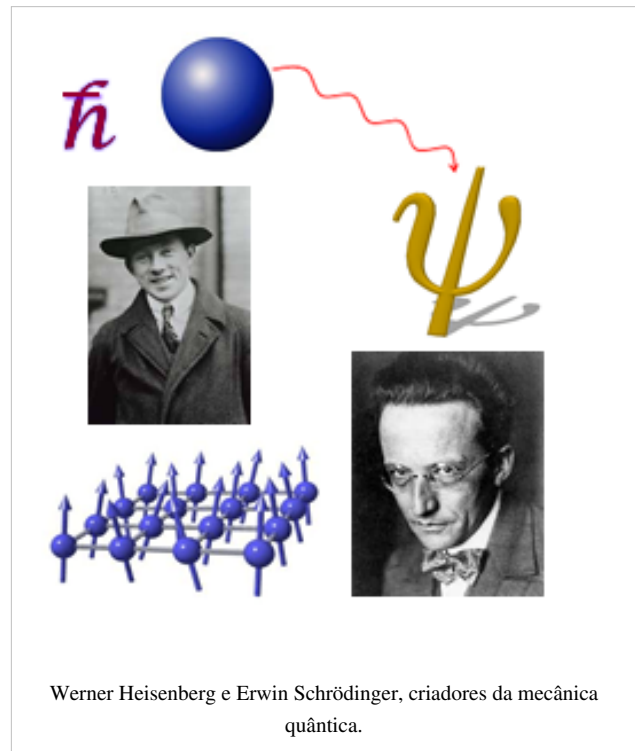
# Introdução à mecânica quântica

**Mecânica quântica** (ou *teoria quântica*) é um ramo da física que lida com o comportamento da matéria e da energia na escala de átomos e partículas subatômicas. A mecânica quântica é fundamental ao nosso entendimento de todas as forças fundamentais da natureza, exceto a gravidade.

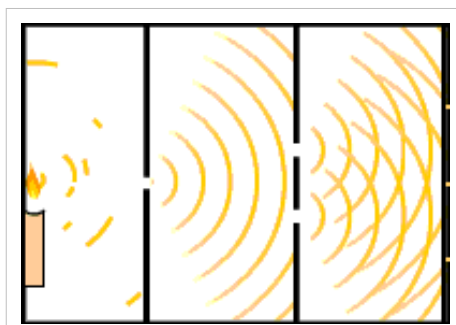
A mecânica quântica é a base de diversos ramos da física, incluindo eletromagnetismo, física de partículas, física da matéria condensada, e até mesmo partes da cosmologia. A mecânica quântica também é essencial para a teoria das ligações químicas (e portanto de toda química), biologia estrutural, e tecnologias como a eletrônica, tecnologia da informação, e nanotecnologia. Um século de experimentos e trabalho na física aplicada provou que a mecânica quântica está correta e tem utilidades práticas.

A mecânica quântica começou no início do século 20, com o trabalho pioneiro de Max Planck e Niels Bohr. Max Born criou o termo "mecânica quântica" em 1924.

A comunidade de física logo aceitou a mecânica quântica devido a sua grande precisão nas previsões empíricas, especialmente em sistemas onde a mecânica clássica falha. Um grande sucesso da mecânica quântica em seu princípio foi a explicação da dualidade onda-partícula, ou seja, como em níveis subatômicos o que os humanos vieram a chamar de partículas subatômicas têm propriedades de ondas e o que era considerado onda tem propriedade corpuscular. A mecânica quântica também pode ser aplicada a uma gama muito maior de situações do que a relatividade geral, como por exemplo sistemas nos quais a escala é atômica ou menor, e aqueles que têm energias muito baixas ou muito altas ou sujeitos às menores temperaturas.



## Um exemplo elegante



A luz não segue uma trajetória retilínea entre a fonte e a tela de detecção.  
(Perceba as três franjas à direita.)

O personagem mais elegante do palco quântico é o experimento da dupla fenda. Ele demonstra a dualidade onda-partícula, e ressalta diversas características da mecânica quântica. Fótons emitidos de alguma fonte como um laser se comportarão diferentemente dependendo da quantidade de fendas que estão em seu caminho. Quando apenas uma fenda está presente, a luz observada na tela aparecerá como um padrão de difração estreito.

**Entretanto**, as coisas começam a ficar estranhas se duas fendas forem introduzidas no experimento. Com duas fendas presentes, o que chegará em uma tela de detecção remota será uma superposição quântica de duas ondas. Como a ilustração mostra, uma onda da fenda do topo e outra da de baixo terão sobreposição na tela de detecção, e então elas são superpostas. O mesmo

experimento básico pode ser feito atirando um elétron em uma fenda dupla. A natureza ondulatória da luz faz com que as ondas luminosas passando por ambas fendas se interfiram, criando um padrão de interferência de faixas claras

e escuras na tela. Porém, na tela, a luz é sempre absorvida em partículas discretas, chamadas fótons.

O que é ainda mais estranho é o que ocorre quando a fonte de luz é reduzida ao ponto de somente um fóton ser emitido por vez. A intuição normal diz que o fóton irá atravessar ou uma ou outra fenda como uma partícula, e atingir a tela como partícula. Entretanto, qualquer fóton solitário atravessa ambas fendas como onda, e cria um padrão de onda que interfere consigo mesmo. E ainda mais um nível de estranheza - o fóton é então detectado como partícula na tela.

Onde um fóton ou elétron aparecerá na tela de detecção dependerá das probabilidades calculadas ao se adicionar as amplitudes das duas ondas em cada ponto, e elevando essa soma ao quadrado. Conquanto, a localização de onde um fóton, ou um elétron, irá atingir a tela, dependerá de um processo completamente aleatório. O resultado final estará de acordo com as probabilidades que podem ser calculadas. Como a natureza consegue realizar essa proeza é um mistério.

Os fótons funcionam como se fossem ondas enquanto eles atravessam as fendas. Quando duas fendas estão presentes, a "função de onda" pertencente a cada fóton atravessa cada fenda. As funções de onda são superpostas ao longo de toda tela de detecção, ainda assim na tela, apenas uma partícula, um fóton, aparece e sua posição está de acordo com regras de probabilidade estritas. Então o que os homens interpretam como natureza ondulatória dos fótons e como natureza corpuscular dos fótons deve aparecer nos resultados finais.

## Visão geral

### O inesperado

No final do século 19, a física clássica parecia quase completa para alguns, mas essa percepção foi desafiada por achados experimentais que tal física não era capaz de explicar. Teorias físicas que funcionavam bem para situações na escala humana de espaço e tempo falhavam para explicar situações que eram muito pequenas, muito massivas, ou que se moviam a velocidades muito elevadas. Uma visão do universo que havia sido imposta por observações comuns estava sendo desafiada por observações e teorias que previam corretamente onde a mecânica clássica havia dado resultados impossíveis. Mas a figura que emergia era a de um universo que se recusava a comportar-se de acordo com o senso comum humano.

Nas grandes escalas a teoria da relatividade dizia que o tempo não passa à mesma proporção para todos observadores, que a matéria poderia se converter em energia e vice-versa, que dois objetos, se movendo a velocidades maiores que a metade da velocidade da luz, não poderiam se aproximar a uma velocidade que excedesse aquela da luz, que o tempo progride a taxas menores próximo a corpos massivos, etc. As coisas não funcionavam da maneira que as experiências com réguas e relógios aqui na terra haviam levado os humanos a esperar.

Nas pequenas, as maravilhas eram ainda mais abundantes. Um fóton ou elétron não têm nem uma posição nem uma trajetória entre os pontos onde são emitidos e onde são detectados. Os pontos onde tais partículas podem ser detectadas não são onde alguém esperaria que fosse baseado nas experiências cotidianas. Com uma pequena probabilidade, o ponto de detecção pode até mesmo ser do outro lado de uma barreira sólida. A probabilidade é um fator saliente nas interações nessa escala. A trajetória de qualquer objeto de escala atômica é imprecisa no sentido de que qualquer medida que faça a posição de um objeto tornar-se mais precisa reduz a precisão com a qual nós podemos observar sua velocidade e vice-versa.

Na era da física clássica, Isaac Newton e seus seguidores acreditavam que a luz era constituída por um feixe de partículas, e outros acreditavam que a luz consistia de ondas se propagando em algum meio. Ao invés de encontrar um experimento que provasse que um dos lados estava certo, os físicos descobriram que um experimento designado a mostrar a frequência da luz ou outras "características de ondas" demonstrará a natureza ondulatória da luz, enquanto que um experimento designado a mostrar seu momentum linear ou outra "característica corpuscular" revelará a natureza corpuscular da luz. Ainda mais, objetos do tamanho de átomos, e até mesmo algumas moléculas, revelaram sua natureza ondulatória quando observados de maneira apropriada.

Os mais eminentes físicos avisaram que se uma explicação sobre a física quântica faz sentido no senso comum, então ela muito provavelmente tem falhas. Em 1927 Niels Bohr escreveu: "Qualquer um que não se chocar com a teoria quântica não a compreende."

### Como o inesperado veio à luz

As fundações da mecânica quântica tiveram seu início com os primeiros trabalhos sobre as propriedades da luz, no século 17, e a descoberta das propriedades da eletricidade e do magnetismo, no início do século 19. Em 1690, Christiaan Huygens empregou a teoria ondulatória para explicar a reflexão e a refração da luz. Isaac Newton acreditava que a luz consistia de partículas infinitesimalmente pequenas que ele chamou de "corpúsculos". Em 1827, Thomas Young e Augustin Fresnel conduziram experimentos sobre a interferência da luz que encontrou resultados que eram inconsistentes com a teoria corpuscular da luz. Todos resultados teóricos e empíricos ao longo do século 19 pareciam inconsistentes com a teoria corpuscular da luz de Newton.

Experimentos posteriores identificaram fenômenos, como o efeito fotoelétrico, que eram consistentes apenas com um modelo de pacotes, ou quântico, da luz. Quando a luz incide sobre um condutor elétrico, elétrons parecem se mover para longe de suas posições originais. Em um material fotoelétrico, como o medidor de luz em uma câmera, a luz incidindo sobre o detector metálico faz com que os elétrons se movam. Aumentar a intensidade de uma luz que tenha apenas uma frequência fará com que mais elétrons se movam. Mas fazer com que os elétrons se movam mais rápido requer um aumento da frequência da luz. Portanto, a intensidade da luz controla a corrente elétrica através do circuito, enquanto que sua frequência controla sua voltagem. Essas observações contrariaram a teoria ondulatória da luz derivada do estudo das ondas sonoras e ondas do mar, onde a intensidade do impulso inicial era o suficiente para prever a energia da onda resultante. No caso da luz, a energia era função somente da frequência, um fato que precisava de uma explicação. Era também necessário reconciliar experimentos que mostravam a natureza corpuscular da luz com outros experimentos que revelavam sua natureza ondulatória.

Em 1874, George Johnstone Stoney foi o primeiro a propor que uma quantidade física, a carga elétrica, não poderia variar menos que um valor irredutível. Portanto a carga elétrica foi a primeira quantidade física a ser quantizada teoricamente. Em 1873, James Clerk Maxwell demonstrou teoricamente que um circuito elétrico oscilando deveria produzir ondas eletromagnéticas. Devido às equações de Maxwell foi possível calcular a velocidade da radiação eletromagnética puramente através de medidas elétricas e magnéticas, e o valor calculado correspondia muito proximamente à velocidade da luz medida. Em 1888, Heinrich Hertz fez um aparelho elétrico que produzia radiação cuja frequência era mais baixa do que a da luz visível, radiação que nós atualmente chamamos microondas. Pesquisadores iniciais diferiam na maneira de explicar a natureza fundamental do que é chamado de radiação eletromagnética, alguns afirmando que ele era composta por partículas, enquanto outros diziam que era um fenômeno ondulatório. Na física clássica essas ideias são mutualmente exclusivas.

A mecânica quântica teve início com o artigo pioneiro de Max Planck em 1900 sobre a radiação de corpo negro, marcando a primeira aparição da hipótese quântica. O trabalho de Planck deixou claro que nem o modelo ondulatório nem o corpuscular conseguem explicar a radiação eletromagnética. Em 1905, Albert Einstein estendeu a teoria de Planck para o efeito fotoelétrico. Em 1913, Niels Bohr lançou seu modelo atômico, incorporando a teoria quântica de Planck de uma maneira essencial. Esses e outros trabalhos do início do século 20 formam a antiga teoria quântica.



Em 1924, Louis de Broglie criou a hipótese da dualidade onda-corpúsculo. Essa hipótese provou ser um ponto de virada, e rapidamente levou a uma variante mais sofisticada e completa da mecânica quântica. Contribuidores importantes em meados dos anos 20 para o que veio a ser chamado de "nova mecânica quântica" ou "nova física" foram Max Born, Paul Dirac, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli e Erwin Schrödinger. No final da década de 1940 e começo da de 1950, Julian Schwinger, Sin-Itiro Tomonaga, Richard Feynman e Freeman Dyson descobriram a eletrodinâmica quântica, que avançou significativamente nossa compreensão da teoria quântica do eletromagnetismo e do elétron. Mais tarde, Murray Gell-Mann desenvolveu uma teoria relacionada da força nuclear forte, chamada de cromodinâmica quântica.

## Espectroscopia e além

Quando a luz branca atravessa um prisma, ou a borda de um espelho ou um pedaço de vidro, ou então as gotas da chuva para formar um arco-íris, a luz branca é decomposta em um espectro. Esse espectro revela que a luz branca é composta de luz de todas as cores e portanto de todas as frequências.

Quando uma amostra composta de um elemento químico puro emite luz por aquecimento ou outros agentes, o

espectro da luz emitida, chamado de espectro de emissão, é característico àquele elemento e à temperatura a que ela é aquecida. Diferentemente do espectro da luz branca, um espectro de emissão não é uma faixa larga composta de todas as cores do vermelho ao violeta, mas consiste de faixas estreitas, de uma cor cada e separadas das outras por faixas de escuridão. Tal figura é chamada de **espectro de linha**. Um espectro de emissão também pode conter linhas fora do intervalo da luz visível, detectáveis apenas por filmes fotográficos especiais ou equipamentos eletrônicos.

Foi sugerida a hipótese de que um átomo emite radiação eletromagnética da mesma forma que a corda de um violino "irradia" som - não apenas com frequência fundamental, mas também com harmônicos maiores. Uma descrição matemática do espectro de linha só foi criada em 1885, quando Johann Jakob Balmer propôs a seguinte fórmula para descrever o espectro de linha do hidrogênio atômico:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $R$  é a constante de Rydberg, e  $n$  é um inteiro  $> 2$ . Essa fórmula pode ser generalizada para servir a átomos que não o hidrogênio, um fato que não nos deterá, exceto a percepção de que essa é a razão pela qual o denominador na primeira fração é expresso como um quadrado.

O próximo desenvolvimento foi a descoberta por Pieter Zeeman do efeito Zeeman, que teve a explicação física foi trabalhada por Hendrik Antoon Lorentz. Lorentz hipotetizou que o espectro de linha do hidrogênio resultava de elétrons vibrando. É possível obter informações a respeito do que ocorre dentro do átomo porque os elétrons em movimento geram um campo magnético. Por isso um elétron pode ser influenciado por um campo magnético externo, similar à maneira que um ímã metálico irá atrair ou repelir outro.

O efeito Zeeman poderia ser interpretado para significar que o espectro de linha resulta de elétrons vibrando em suas órbitas, mas a física clássica não conseguia explicar por que um elétron não cai em espiral no núcleo, nem por que as órbitas dos elétrons têm as propriedades requeridas para produzir o espectro de linha observado, descritível pela fórmula de Balmer. Mais precisamente, por qual razão os elétrons se comportam de tal maneira que o espectro de

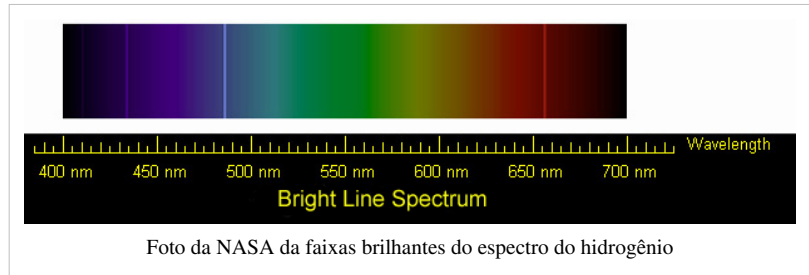


Foto da NASA da faixas brilhantes do espectro do hidrogênio



Foto da faixas brilhantes do nitrogênio

emissão não é contínuo, mas em linhas?

## Ver também

- Mecânica quântica
- Computador quântico
- Efeito túnel
- Filosofia da física
- Função de onda
- Interpretações da mecânica quântica
- Gato de Schrödinger
- Teoria quântica de campos
- Vácuo Quântico

## Antiga teoria quântica

---

A **antiga teoria quântica** é uma coleção de resultados dos anos 1900 a 1925 que antecede a moderna mecânica quântica. A teoria nunca foi completa ou auto-consistente, mas uma coleção de prescrições heurísticas que são tidas atualmente como as primeiras correções quânticas feitas à mecânica clássica.

A antiga teoria quântica sobrevive como uma técnica de aproximação na mecânica quântica, chamada de método WKB. Aproximações semi-clássicas foram um popular objeto de estudos no anos 70 e 80.

## História

A antiga teoria quântica foi iniciada pelo trabalho de Max Planck na emissão e absorção de luz, e começou para valer após o trabalho de Albert Einstein nos calores específicos dos sólidos. Einstein, seguido por Debye, aplicou princípios quânticos ao movimento de átomos, explicando a anomalia do calor específico.

Em 1913, Niels Bohr identificou o princípio da correspondência e o usou para formular um modelo para o átomo de hidrogênio que explicava o espectro de emissão. Nos anos seguintes Arnold Sommerfeld estendeu a regra quântica para sistemas integráveis arbitrários fazendo uso do princípio da invariância adiabática de números quânticos introduzido por Lorentz e Einstein. O modelo de Sommerfeld estava muito mais próximo à figura da moderna mecânica quântica do que o de Bohr.

Durante a década de 1910 e começo da década de 1920 muitos problemas foram atacados usando a antiga teoria quântica com resultados diversos. A rotação molecular e o espectro de vibração foram entendidos e o spin do elétron descoberto, levando à confusão de números quânticos meio inteiros. Max Planck introduziu o ponto de energia zero e Arnold Sommerfeld quantizou semiclassicamente o átomo de hidrogênio relativístico. Hendrik Kramers explicou o efeito Stark. Bose e Einstein fizeram a estatística quântica certa para fótons.

Kramers deu a fórmula para calcular a probabilidade de transição entre estados quânticos em termos de componentes de Fourier de movimento, ideias que foram estendidas em colaboração com Werner Heisenberg para uma descrição semiclassica em forma de matriz das probabilidades de transição atômicas. Heisenberg reformulou toda a teoria quântica em termos de uma versão dessas matrizes de transição, criando a mecânica das matrizes.

Em 1924, Louis de Broglie introduziu a teoria ondulatória da matéria, que foi estendida para uma equação semiclassica para ondas de matéria por Einstein pouco tempo depois. Em 1926 Erwin Schrödinger encontrou uma função de onda completamente quântica, que reproduzia com sucesso todos os sucessos da antiga teoria quântica sem ambiguidades e inconsistências. A mecânica ondulatória de Schorödinger se desenvolveu separadamente da mecânica das matrizes até que Schrödinger e outros provaram que os dois métodos previam as mesmas

---



consequências experimentais. Paul Dirac provou em 1926 que ambos os métodos podem ser obtidos de um método mais geral chamado teoria da transformação.

A mecânica das matrizes e a mecânica ondulatória puseram um fim à era da antiga teoria quântica.

## Princípios básicos

A ideia básica da antiga teoria quântica é a de que o movimento em um sistema atômico é quantizado, ou discreto. O sistema obedece à mecânica clássica exceto que nem todo movimento é permitido, apenas aqueles que obedecem a *antiga condição quântica*:

$$\int p_i dq_i = n_i h$$

onde os  $p_i$  são os momentos do sistema e os  $q_i$  são as coordenadas correspondentes. O números quânticos  $n_i$  são inteiros e a integral é tomada ao longo de um período do movimento. A integral é uma área no espaço de fase, que é a quantidade chamada ação, que é quantizada em unidades da constante de Planck. Por essa razão, a constante de Planck era frequentemente chamada de *quantum de ação*.

Para as antigas condições quânticas fazerem sentido, o movimento clássico deve ser separável, indicando que existem coordenadas separadas  $q_i$  em termos das quais o movimento é periódico. Os períodos dos diferentes movimentos não têm que ser os mesmos, eles podem ser até mesmo imensuráveis, mas deve haver um conjunto de coordenadas onde o movimento se decompõe em uma maneira multi-periódica.

A motivação da antiga condição quântica era o princípio da correspondência, complementado pela observação física de que as quantidades que são quantizadas devem ser invariantes adiabáticas. Dada a regra da quantização de Planck para o oscilador harmônico, qualquer das condições determina a quantidade clássica correta para quantizar em um sistema geral até uma constante aditiva.

## Ondas de De Broglie

Em 1905, Einstein percebeu que a entropia dos osciladores eletromagnéticos quantizados dentro de uma caixa é, para pequenos comprimentos de onda, igual à entropia de um gás de partículas pontuais na mesma caixa. O número de partículas pontuais é igual ao número de quanta. Einstein concluiu que os quanta eram objetos localizáveis, partículas de luz, e os chamou de fótons.

Ele então concluiu que a luz tem atributos tanto de onda como de partícula, mais precisamente, que uma onda eletromagnética estacionária com frequência  $\omega$  com energia quantizada:

$$E = n\hbar\omega$$

deve ser pensado como consistindo de  $n$  fótons, cada um com energia  $\hbar\omega$ . Einstein não conseguiu descrever como os fótons eram relacionados à onda.

Os fótons têm momento assim como energia, e o momento tinha que ser  $\hbar k$  onde  $k$  é o número de onda da onda eletromagnética. Tal condição é necessária para a relatividade, pois o momento e a energia formam um quadrivetor, assim como fazem a frequência e o número de onda.

Em 1924, como um candidato a PhD, Louis de Broglie propôs uma nova interpretação à condição quântica. Ele sugeriu que toda matéria, elétrons, assim como fótons, são descritos por ondas obedecendo as relações:

$$p = \hbar k$$

Ele então percebeu que a condição quântica:

$$\int p dx = \hbar \int k dx = 2\pi\hbar n$$

conta a mudança de fase para a onda enquanto ela viaja ao longo da órbita clássica, e requer que ele seja um múltiplo inteiro de  $2\pi$ . Expressado em comprimentos de onda, o número de comprimentos de onda ao longo da órbita

clássica deve ser um inteiro. Essa é a condição para interferência construtiva, e explicou a razão para as órbitas quantizadas - as ondas de matéria geram ondas estacionárias apenas a frequências discretas, com energias discretas.

Por exemplo, para uma partícula confinada em uma caixa, uma onda estacionária deve ter um número inteiro de comprimentos de onda entre o dobro da distância entre as paredes. A condição torna-se:

$$n\lambda = 2L$$

de forma que os momentos quantizados são:

$$p = \frac{nh}{2L}$$

reproduzindo os antigos níveis quânticos de energia.

Einstein deu um tratamento mais matemático a esse desenvolvimento, percebendo que a função de fase para as ondas:  $\theta(J, x)$  em um sistema mecânico deve ser identificado com a solução para a equação de Hamilton-Jacobi, uma equação que até mesmo Hamilton considerava como um limite pequeno de comprimento de onda da mecânica ondulatória.

Essas ideias levaram ao desenvolvimento da equação de Schrödinger.

## Mecânica quântica

---

A **mecânica quântica** é a teoria física que obtém sucesso no estudo dos sistemas físicos cujas dimensões são próximas ou abaixo da escala atômica, tais como moléculas, átomos, elétrons, prótons e de outras partículas subatômicas, muito embora também possa descrever fenômenos macroscópicos em diversos casos. A Mecânica Quântica é um ramo fundamental da física com vasta aplicação. A teoria quântica fornece descrições precisas para muitos fenômenos previamente inexplicados tais como a radiação de corpo negro e as órbitas estáveis do elétron. Apesar de na maioria dos casos a Mecânica Quântica ser relevante para descrever sistemas microscópicos, os seus efeitos específicos não são somente perceptíveis em tal escala. Por exemplo, a explicação de fenômenos macroscópicos como a super fluidez e a supercondutividade só é possível se considerarmos que o comportamento microscópico da matéria é quântico. A quantidade característica da teoria, que determina quando ela é necessária para a descrição de um fenômeno, é a chamada constante de Planck, que tem dimensão de momento angular ou, equivalentemente, de ação.

A mecânica quântica recebe esse nome por prever um fenômeno bastante conhecido dos físicos: a quantização. No caso dos estados ligados (por exemplo, um elétron orbitando em torno de um núcleo positivo) a Mecânica Quântica prevê que a energia (do elétron) deve ser quantizada. Este fenômeno é completamente alheio ao que prevê a teoria clássica.

### Um panorama

A palavra “quântica” (do Latim, quantum) quer dizer quantidade. Na mecânica quântica, esta palavra refere-se a uma unidade discreta que a teoria quântica atribui a certas quantidades físicas, como a energia de um elétron contido num átomo em repouso. A descoberta de que as ondas eletromagnéticas podem ser explicadas como uma emissão de pacotes de energia (chamados quanta) conduziu ao ramo da ciência que lida com sistemas moleculares, atômicos e subatômicos. Este ramo da ciência é atualmente conhecido como mecânica quântica.

A mecânica quântica é a base teórica e experimental de vários campos da Física e da Química, incluindo a física da matéria condensada, física do estado sólido, física atômica, física molecular, química computacional, química quântica, física de partículas, e física nuclear. Os alicerces da mecânica quântica foram estabelecidos durante a primeira metade do século XX por Albert Einstein, Werner Heisenberg, Max Planck, Louis de Broglie, Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Max Born, John von Neumann, Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Richard Feynman e outros. Alguns

---

aspectos fundamentais da contribuição desses autores ainda são alvo de investigação.

Normalmente é necessário utilizar a mecânica quântica para compreender o comportamento de sistemas em escala atômica ou molecular. Por exemplo, se a mecânica clássica governasse o funcionamento de um átomo, o modelo planetário do átomo – proposto pela primeira vez por Rutherford – seria um modelo completamente instável. Segundo a teoria eletromagnética clássica, toda a carga elétrica acelerada emite radiação. Por outro lado, o processo de emissão de radiação consome a energia da partícula. Dessa forma, o elétron, enquanto caminha na sua órbita, perderia energia continuamente até colapsar contra o núcleo positivo! Com efeito, o modelo planetário do átomo é um modelo ineficaz. Para explicar o comportamento de um elétron em torno de um átomo de hidrogênio é necessário utilizar as leis da mecânica quântica.

## O conceito de estado na mecânica quântica

Em física, chama-se "sistema" um fragmento concreto da realidade que foi separado para estudo. Dependendo do caso, a palavra sistema refere-se a um elétron ou um próton, um pequeno átomo de hidrogênio ou um grande átomo de urânio, uma molécula isolada ou um conjunto de moléculas interagentes formando um sólido ou um vapor. Em todos os casos, sistema é um fragmento da realidade concreta para o qual deseja-se chamar atenção.

Dependendo da partícula pode-se inverter polarizações subsequentes de aspecto neutro.

A especificação de um sistema físico não determina unicamente os valores que experimentos fornecem para as suas propriedades (ou as probabilidades de se medirem tais valores, em se tratando de teorias probabilísticas). Além disso, os sistemas físicos não são estáticos, eles *evoluem* com o tempo, de modo que o mesmo sistema, preparado da mesma forma, pode dar origem a resultados experimentais diferentes dependendo do tempo em que se realiza a medida (ou a histogramas diferentes, no caso de teorias probabilísticas). Essa idéia conduz a outro conceito-chave: o conceito de "estado". Um estado é uma quantidade matemática (que varia de acordo com a teoria) que determina completamente os valores das propriedades físicas do sistema associadas a ele num dado instante de tempo (ou as probabilidades de cada um de seus valores possíveis serem medidos, quando se trata de uma teoria probabilística). Em outras palavras, *todas as informações possíveis de se conhecer em um dado sistema constituem seu estado*

Cada sistema ocupa um estado num instante no tempo e as leis da física devem ser capazes de descrever como um dado sistema parte de um estado e chega a outro. Em outras palavras, as leis da física devem dizer como o sistema evolui (de estado em estado).

Muitas variáveis que ficam bem determinadas na mecânica clássica são substituídas por distribuições de probabilidades na mecânica quântica, que é uma teoria intrinsecamente probabilística (isto é, dispõe-se apenas de probabilidades não por uma simplificação ou ignorância, mas porque isso é tudo que a teoria é capaz de fornecer).

## A representação do estado

No formalismo da mecânica quântica, o estado de um sistema num dado instante de tempo pode ser representado de duas formas principais:

1. O estado é representado por uma função complexa das posições ou dos momenta de cada partícula que compõe o sistema. Essa representação é chamada função de onda.
2. Também é possível representar o estado por um vetor num espaço vetorial complexo.<sup>[1]</sup> Esta representação do estado quântico é chamada vetor de estado. Devido à notação introduzida por Paul Dirac, tais vetores são usualmente chamados kets (sing.: ket).

Em suma, tanto as "funções de onda" quanto os "vetores de estado" (ou kets) representam os estados de um dado sistema físico de forma *completa e equivalente* e as leis da mecânica quântica descrevem como vetores de estado e funções de onda evoluem no tempo.

Estes objetos matemáticos abstratos (kets e funções de onda) permitem o cálculo da probabilidade de se obter resultados específicos em um experimento concreto. Por exemplo, o formalismo da mecânica quântica permite que

se calcule a probabilidade de encontrar um elétron em uma região particular em torno do núcleo.

Para compreender seriamente o cálculo das probabilidades a partir da informação representada nos vetores de estado e funções de onda é preciso dominar alguns fundamentos de álgebra linear.

## Primeiros fundamentos matemáticos

É impossível falar seriamente sobre mecânica quântica sem fazer alguns apontamentos matemáticos. Isso porque muitos fenômenos quânticos difíceis de se imaginar concretamente podem ser representados sem mais complicações com um pouco de abstração matemática.

Há três conceitos fundamentais da matemática - mais especificamente da álgebra linear - que são empregados constantemente pela mecânica quântica. São estes: (1) o conceito de operador; (2) de autovetor; e (3) de autovalor.

## Vetores e espaços vetoriais

Na álgebra linear, um **espaço vetorial** (ou o espaço linear) é uma coleção dos objetos abstratos (chamados **vetores**) que possuem algumas propriedades que não serão completamente detalhadas aqui.

Por agora, importa saber que tais objetos (vetores) podem ser adicionados uns aos outros e multiplicados por um número escalar. O resultado dessas operações é sempre um vetor pertencente ao mesmo espaço. Os espaços vetoriais são os objetos básicos do estudo na álgebra linear, e têm várias aplicações na matemática, na ciência, e na engenharia.

O espaço vetorial mais simples e familiar é o espaço Euclidiano bidimensional. Os vetores neste espaço são pares ordenados e são representados graficamente como "setas" dotadas de módulo, direção e sentido. No caso do espaço euclidiano bidimensional, a soma de dois vetores quaisquer pode ser realizada utilizando a regra do paralelogramo.

Todos os vetores também podem ser multiplicados por um escalar - que no espaço Euclidiano é sempre um número real. Esta multiplicação por escalar poderá alterar o módulo do vetor e seu sentido, mas preservará sua direção. O comportamento de vetores geométricos sob estas operações fornece um bom modelo intuitivo para o comportamento dos vetores em espaços mais abstratos, que não precisam de ter a mesma interpretação geométrica. Como exemplo, é possível citar o espaço de Hilbert (onde "habitam" os vetores da mecânica quântica). Sendo ele também um espaço vetorial, é certo que possui propriedades análogas àquelas do espaço Euclidiano.

## Os operadores na mecânica quântica

Um **operador** é um ente matemático que estabelece uma relação funcional entre dois espaços vetoriais. A relação funcional que um operador estabelece pode ser chamada **transformação linear**. Os detalhes mais formais não serão apontados aqui. Interessa, por enquanto, desenvolver uma idéia mais intuitiva do que são esses operadores.

Por exemplo, considere o Espaço Euclidiano. Para cada vetor nesse espaço é possível executar uma rotação (de um certo ângulo) e encontrar outro vetor no mesmo espaço. Como essa rotação é uma relação funcional entre os vetores de um espaço, podemos definir um operador que realize essa transformação. Assim, dois exemplos bastante concretos de operadores são os de rotação e translação.

Do ponto de vista teórico, a semente da ruptura entre a física quântica e clássica está no emprego dos operadores. Na mecânica clássica, é usual descrever o movimento de uma partícula com uma função *escalar* do tempo. Por exemplo, imagine que vemos um vaso de flor caindo de uma janela. Em cada instante de tempo podemos calcular a que altura se encontra o vaso. Em outras palavras, descrevemos a grandeza *posição* com um número (escalar) que varia em função do tempo.

Uma característica distintiva na mecânica quântica é o uso de operadores para representar grandezas físicas. Ou seja, não são somente as rotações e translações que podem ser representadas por operadores. Na mecânica quântica grandezas como posição, momento linear, momento angular e energia também são representados por operadores.

Até este ponto já é possível perceber que a mecânica quântica descreve a natureza de forma bastante abstrata. Em suma, os estados que um sistema físico pode ocupar são representados por vetores de estado (kets) ou funções de onda (que também são vetores, só que no espaço das funções). As grandezas físicas não são representadas diretamente por escalares (como 10 m, por exemplo), mas por operadores.

Para compreender como essa forma abstrata de representar a natureza fornece informações sobre experimentos reais é preciso discutir um último tópico da álgebra linear: o problema de autovalor e autovetor.

## O problema de autovalor e autovetor

O problema de autovalor e autovetor é um problema matemático abstrato sem o qual não é possível compreender seriamente o significado da mecânica quântica.

Em primeiro lugar, considere o operador  $\hat{A}$  de uma transformação linear arbitrária que relacione vetores de um espaço  $\mathbf{E}$  com vetores do mesmo espaço  $\mathbf{E}$ . Neste caso, escreve-se [eq.01]:

$$\hat{A} : E \mapsto E$$

Observe que qualquer matriz quadrada satisfaz a condição imposta acima desde que os vetores no espaço  $\mathbf{E}$  possam ser representados como matrizes-coluna e que a atuação de  $\hat{A}$  sobre os vetores de  $\mathbf{E}$  ocorra conforme o produto de matrizes a seguir:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_m \end{bmatrix}$$

Como foi dito, a equação acima ilustra muito bem a atuação de um operador do tipo definido em [eq.01]. Porém, é possível representar a mesma idéia de forma mais compacta e geral sem fazer referência à representação matricial dos operadores lineares [eq.02]:

$$\hat{A} \cdot \vec{b} = \vec{c}$$

Para cada operador  $\hat{A}$  existe um conjunto  $\{\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n\}$  tal que cada vetor do conjunto satisfaz [eq.03]:

$$\hat{A} \cdot \vec{v}_i = \lambda_i \cdot \vec{v}_i$$

$$\lambda_i \in \mathbb{C}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

A equação acima é chamada *equação de autovalor e autovetor*. Os vetores do conjunto  $\{\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n\}$  são chamados **autovetores**. Os escalares do conjunto  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$  são chamados **autovalores**. O conjunto dos autovalores  $\lambda_i$  também é chamado espectro do operador  $\hat{A}$ .

Para cada autovalor corresponde um autovetor e o número de pares autovalor-autovetor é igual à dimensão do espaço  $\mathbf{E}$  onde o operador  $\hat{A}$  está definido. Em geral, o espectro de um operador  $\hat{A}$  qualquer não é contínuo, mas discreto. Encontrar os autovetores e autovalores para um dado operador  $\hat{A}$  é o chamado **problema de autovalor e autovetor**.

De antemão o problema de autovalor e autovetor possui duas características:

(1)  $\vec{v}_i = \vec{0}$  satisfaz o problema para qualquer operador  $\hat{A}$ . Por isso, o vetor nulo  $\vec{0}$  não é considerado uma resposta do problema.

(2) Se  $\vec{v}_i$  satisfaz a equação de autovalor e autovetor, então seu múltiplo  $c \cdot \vec{v}_i$  também é uma resposta ao problema para qualquer  $c \in \mathbb{C}$ .

Enfim, a solução geral do problema de autovalor e autovetor é bastante simples. A saber:

$$\hat{A} \cdot \vec{v} = \lambda \cdot \vec{v}$$

$$\therefore \hat{A} \cdot \vec{v} = \hat{\lambda} \cdot \vec{v}$$

$$\therefore \{\hat{A} - \hat{\lambda}\} \cdot \vec{v} = \vec{0}$$

Onde:

$$\hat{\lambda} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda \end{bmatrix}$$

Como  $\vec{v}_i = \vec{0}$  não pode ser considerado uma solução do problema, é necessário que:

$$\det\{\hat{A} - \hat{\lambda}\} = 0$$

A equação acima é um polinômio de grau  $n$ . Portanto, para qualquer operador  $\hat{A} : E \mapsto E$  há  $n$  quantidades escalares  $\lambda_i \in \mathbb{C}$  distintas ou não tais que a equação de autovetor e autovalor é satisfeita.

Os autovetores correspondentes aos autovalores  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$  de um operador  $\hat{A}$  podem ser obtidos facilmente substituindo os autovalores um a um na [eq.03].

### O significado físico dos operadores, seus autovetores e autovalores

Para compreender o significado físico de toda essa representação matemática abstrata, considere o exemplo do operador de Spin na direção  $z$ :  $\hat{S}_z$ .

Na mecânica quântica, cada partícula tem associada a si uma quantidade sem análogo clássico chamada spin ou momento angular intrínseco. O spin de uma partícula é representado como um vetor com projeções nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . A cada projeção do vetor spin :  $\vec{S}$  corresponde um operador:

$$\vec{S} = (\hat{S}_x, \hat{S}_y, \hat{S}_z)$$

O operador  $\hat{S}_z$  é geralmente representado da seguinte forma:

$$\hat{S}_z = \hbar/2 \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

É possível resolver o problema de autovetor e autovalor para o operador  $\hat{S}_z$ . Nesse caso obtem-se:

$$\det(\hat{S}_z - \hat{\lambda}) = 0$$

ou seja

$$\det \left( \begin{bmatrix} \hbar/2 - \lambda & 0 \\ 0 & -\hbar/2 - \lambda \end{bmatrix} \right) = \left( \frac{\hbar}{2} - \lambda \right) \cdot \left( \frac{\hbar}{2} + \lambda \right) = 0$$

Portanto, os autovalores são  $\frac{\hbar}{2}$  e  $-\frac{\hbar}{2}$ .

### Aspectos históricos

A **história da mecânica quântica** começou essencialmente em 1838 com a descoberta dos raios catódicos por Michael Faraday, a enunciação em 1859 do problema da radiação de corpo negro por Gustavo Kirchhoff, a sugestão 1877 por Ludwig Boltzmann que os estados de energia de um sistema físico poderiam ser discretos, e a hipótese por Planck em 1900 de que toda a energia é irradiada e absorvida na forma de elementos discretos chamados *quanta*. Segundo Planck, cada um desses quanta tem energia proporcional à frequência  $\nu$  da radiação eletromagnética emitida ou absorvida.

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

Planck insistiu que este foi apenas um aspecto dos processos de absorção e emissão de radiação e não tinha nada a ver com a realidade física da radiação em si.<sup>[2]</sup> No entanto, naquele tempo isso parecia não explicar o efeito fotoelétrico (1839), ou seja, que a luz brilhante em certos materiais pode ejetar elétrons do material. Em 1905, baseando seu trabalho na hipótese quântica de Planck, Albert Einstein postulou que a própria luz é formada por

quanta individuais.<sup>[3]</sup>

Em meados da década de 1920, a evolução da mecânica quântica rapidamente fez com que ela se tornasse a formulação padrão para a física atômica. No verão de 1925, Bohr e Heisenberg publicaram resultados que fechavam a "Antiga teoria quântica". Quanta de luz vieram a ser chamados fótons (1926). Da simples postulação de Einstein nasceu uma enxurrada de debates, teorias e testes e, então, todo o campo da física quântica, levando à sua maior aceitação na quinta Conferência de Solvay em 1927.

## Princípios

### • Primeiro princípio: Princípio da superposição

Na mecânica quântica, o **estado de um sistema físico** é definido pelo conjunto de todas as informações que podem ser extraídas desse sistema ao se efetuar alguma medida.

Na mecânica quântica, todos os estados são representados por vetores em um espaço vetorial complexo: o Espaço de Hilbert  $H$ . Assim, cada vetor no espaço  $H$  representa um estado que poderia ser ocupado pelo sistema. Portanto, dados dois estados quaisquer, a soma algébrica (superposição) deles também é um estado.

Como a norma (matemática) dos vetores de estado não possui significado físico, todos os vetores de estado são preferencialmente normalizados. Na notação de Dirac, os vetores de estado são chamados "Kets" e são representados como aparece a seguir:

$$|\psi\rangle$$

Usualmente, na matemática, são chamados funcionais todas as funções lineares que associam vetores de um espaço vetorial qualquer a um escalar. É sabido que os funcionais dos vetores de um espaço também formam um espaço, que é chamado espaço dual. Na notação de Dirac, os funcionais - elementos do Espaço Dual - são chamados "Bras" e são representados como aparece a seguir:

$$\langle\psi|$$

### • Segundo princípio: Medida de grandezas físicas

a) Para toda grandeza física  $A$  é associado um operador linear auto-adjunto  $\hat{A}$  pertencente a  $A$ :  $\hat{A}$  é o *observável* (autovalor do operador) representando a grandeza  $A$ .

b) Seja  $|\psi(t)\rangle$  o estado no qual o sistema se encontra no momento onde efetuamos a medida de  $A$ . Qualquer que seja  $|\psi(t)\rangle$ , os únicos resultados possíveis são os autovalores de  $a_\alpha$  do observável  $\hat{A}$ .

c) Sendo  $\hat{A}_\alpha$  o projetor sobre o subespaço associado ao valor próprio  $a_\alpha$ , a probabilidade de encontrar o valor  $a_\alpha$  em uma medida de  $A$  é:

$$\mathcal{P}(a_\alpha) = \|\psi_\alpha\|^2 \text{ onde } |\psi_\alpha\rangle = \hat{A}_\alpha$$

d) Imediatamente após uma medida de  $A$ , que resultou no valor  $a_\alpha$ , o novo estado  $|\psi'\rangle$  do sistema é

$$|\psi'\rangle = |\psi_\alpha\rangle / \|\psi_\alpha\|^2$$

### • Terceiro princípio: Evolução do sistema

Seja  $|\psi(t)\rangle$  o estado de um sistema ao instante  $t$ . Se o sistema não é submetido a nenhuma observação, sua evolução, ao longo do tempo, é regida pela equação de Schrödinger:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle$$

onde  $\hat{H}$  é o hamiltoniano do sistema.

## Conclusões

As conclusões mais importantes desta teoria são:

- Em estados ligados, como o elétron girando ao redor do núcleo de um átomo, a energia não se troca de modo contínuo, mas sim de modo discreto (descontínuo), em transições cujas energias podem ou não ser iguais umas às outras. A idéia de que estados ligados têm níveis de energias discretas é devida a Max Planck.
- O fato de ser impossível atribuir *ao mesmo tempo* uma posição e um momentum exatas a uma partícula, renunciando-se assim ao conceito de trajetória, vital em Mecânica Clássica. Em vez de trajetória, o movimento de partículas em Mecânica Quântica é descrito por meio de uma função de onda, que é uma função da posição da partícula e do tempo. A função de onda é interpretada por Max Born como uma medida da **probabilidade** de se encontrar a partícula em determinada posição e em determinado tempo. Esta interpretação é a mais aceita pelos físicos hoje, no conjunto de atribuições da Mecânica Quântica regulamentados pela Escola de Copenhagen. Para descrever a dinâmica de um sistema quântico deve-se, portanto, achar sua função de onda, e para este efeito usam-se as equações de movimento, propostas por Werner Heisenberg e Erwin Schrödinger independentemente.

Apesar de ter sua estrutura formal basicamente pronta desde a década de 1930, a interpretação da Mecânica Quântica foi objeto de estudos por várias décadas. O principal é o problema da medição em Mecânica Quântica e sua relação com a não-localidade e causalidade. Já em 1935, Einstein, Podolski e Rosen publicaram seu *Gedankenexperiment*, mostrando uma aparente contradição entre localidade e o processo de Medida em Mecânica Quântica. Nos anos 60 J. S. Bell publicou uma série de relações que seriam respeitadas caso a localidade — ou pelo menos como a entendemos classicamente — ainda persistisse em sistemas quânticos. Tais condições são chamadas desigualdades de Bell e foram testadas experimentalmente por A. Aspect, P. Grangier, J. Dalibard em favor da Mecânica Quântica. Como seria de se esperar, tal interpretação ainda causa desconforto entre vários físicos, mas a grande parte da comunidade aceita que estados correlacionados podem violar causalidade desta forma.

Tal revisão radical do nosso conceito de realidade foi fundamentada em explicações teóricas brilhantes para resultados experimentais que não podiam ser descritos pela teoria clássica, e que incluem:

- Espectro de Radiação do Corpo negro, resolvido por Max Planck com a proposição da quantização da energia.
- Explicação do experimento da dupla fenda, no qual elétrons produzem um padrão de interferência condizente com o comportamento ondular.
- Explicação por Albert Einstein do efeito fotoelétrico descoberto por Heinrich Hertz, onde propõe que a luz também se propaga em *quanta* (pacotes de energia definida), os chamados fótons.
- O Efeito Compton, no qual se propõe que os fótons podem se comportar como partículas, quando sua energia for grande o bastante.
- A questão do calor específico de sólidos sob baixas temperaturas, cuja discrepância foi explicada pelas teorias de Einstein e de Debye, baseadas na equipartição de energia segundo a interpretação quantizada de Planck.
- A absorção ressonante e discreta de energia por gases, provada no experimento de Franck-Hertz quando submetidos a certos valores de diferença de potencial elétrico.
- A explicação da estabilidade atômica e da natureza discreta das raíes espectrais, graças ao modelo do átomo de Bohr, que postulava a quantização dos níveis de energia do átomo.

O desenvolvimento formal da teoria foi obra de esforços conjuntos de muitos físicos e matemáticos da época como Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Einstein, P.A.M. Dirac, Niels Bohr e John von Neumann, entre outros (de uma longa lista).



## Formalismos

Mais tarde, foi introduzido o formalismo hamiltoniano, baseado matematicamente no uso do lagrangiano, mas cuja elaboração matemática é muitas vezes mais fácil.

- [1] Greiner, Walter; Müller, Berndt (1994), *Quantum Mechanics Symmetries, Second Edition, cap. 2*, (<http://books.google.com/books?id=gCfvWx6vuzUC&pg=PA52>), Springer-Verlag, p. 52, ISBN 3-540-58080-8,
- [2] T.S. Kuhn, *Black-body theory and the quantum discontinuity 1894-1912*, Clarendon Press, Oxford, 1978.
- [3] A. Einstein, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt (Um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz)*, *Annalen der Physik* **17** (1905) 132-148 (reimpresso em *The collected papers of Albert Einstein*, John Stachel, editor, Princeton University Press, 1989, Vol. 2, pp. 149-166, em alemão; ver também *Einstein's early work on the quantum hypothesis*, *ibid.* pp. 134-148).

## Bibliografia

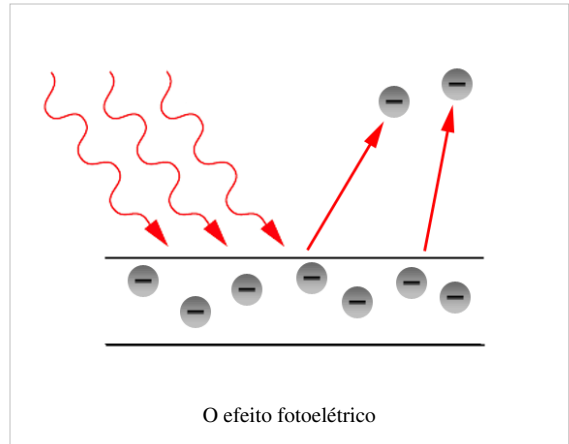
- Mehra, J.; Rechenberg, H.. *The historical development of quantum theory* (em inglês). [S.l.]: Springer-Verlag, 1982.
- Kuhn, T.S.. *Black-body theory and the quantum discontinuity 1894-1912* (em inglês). Oxford: Clarendon Press, 1978. *Nota: O "Princípio da Incerteza" de Heisenberg é parte central dessa teoria e daí nasceu a famosa equação de densidade de probabilidade de Schrödinger.*

## Ver também

- Introdução à mecânica quântica
- Teoria quântica de campos
- Vácuo quântico
- Efeito túnel
- Interpretações da mecânica quântica

# Efeito fotoelétrico

O **efeito fotoelétrico** é a emissão de elétrons por um material, geralmente metálico, quando exposto a uma radiação eletromagnética (como a luz) de frequência suficientemente alta, que depende do material. Ele pode ser observado quando a luz incide numa placa de metal, literalmente arrancando elétrons da placa. Observado a primeira vez por Heinrich Hertz em 1887<sup>[1]</sup>, o fenômeno é também conhecido por "efeito Hertz"<sup>[2]</sup> <sup>[3]</sup>, não sendo porém este termo de uso comum.



Os elétrons que giram à volta do núcleo são aí mantidos por forças de atração. Se a estes for fornecida energia suficiente, eles abandonarão as suas órbitas. O efeito fotoelétrico implica

que, normalmente sobre metais, se faça incidir um feixe de radiação com energia superior à energia de remoção dos elétrons do metal, provocando a sua saída das órbitas: sem energia cinética (se a energia da radiação for igual à energia de remoção) ou com energia cinética, se a energia da radiação exceder a energia de remoção do elétrons.

A grande dúvida que se tinha a respeito do efeito fotoelétrico era que quando se aumentava a intensidade da luz, ao contrário do esperado, a luz não arrancava os elétrons do metal com maior energia cinética. O que acontecia era que uma maior quantidade de elétrons era ejetado.

Por exemplo, a luz vermelha de baixa frequência estimula os elétrons para fora de uma peça de metal. Na visão clássica, a luz é uma onda contínua cuja energia está espalhada sobre a onda. Todavia, quando a luz fica mais intensa, mais elétrons são ejetados, contradizendo, assim a visão da física clássica que sugere que os mesmos deveriam se mover mais rápido (energia cinética) do que as ondas.

Quando a luz incidente é de cor azul, essa mudança resulta em elétrons muito mais rápidos. A razão é que a luz pode se comportar não apenas como ondas contínuas, mas também como feixes discretos de energia chamados de fótons. Um fóton azul, por exemplo, contém mais energia do que um fóton vermelho. Assim, o fóton azul age essencialmente como uma "bola de bilhar" com mais energia, desta forma transmitindo maior movimento a um elétron. Esta interpretação corpuscular da luz também explica por que a maior intensidade aumenta o número de elétrons ejetados - com mais fótons colidindo no metal, mais elétrons têm probabilidade de serem atingidos.

A explicação satisfatória para esse efeito foi dada em 1905, por Albert Einstein, e em 1921 deu ao cientista alemão o prêmio Nobel de Física.

## Equações

Analisando o efeito fotoelétrico quantitativamente usando o método de Einstein, as seguintes equações equivalentes são usadas:

Energia do fóton = Energia necessária para remover um elétron + Energia cinética do elétron emitido

Algebricamente:

$$hf = \phi + E_{c_{max}}$$

onde

- $h$  é a constante de Planck,
- $f$  é a frequência do foton incidente,
- $\phi = hf_0$  é a função trabalho, ou energia mínima exigida para remover um elétron de sua ligação atômica,

- $E_{c_{max}} = \frac{1}{2}mv_m^2$  é a energia cinética máxima dos elétrons expelidos,
- $f_0$  é a frequência mínima para o efeito fotoelétrico ocorrer,
- $m$  é a massa de repouso do elétron expelido, e
- $v_m$  é a velocidade dos elétron expelidos.

Notas:

Se a energia do fóton ( $hf$ ) não é maior que a função trabalho ( $\phi$ ), nenhum elétron será emitido. A função trabalho é ocasionalmente designada por  $W$ .

Em física do estado sólido costuma-se usar a energia de Fermi e não a energia de nível de vácuo como referencial nesta equação, o que faz com que a mesma adquira uma forma um pouco diferente.

Note-se ainda que ao aumentar a intensidade da radiação incidente não vai causar uma maior energia cinética dos elétrons (ou electrões) ejectados, mas sim um maior número de partículas deste tipo removidas por unidade de tempo.

[1] Sears, Francis W., Mark W. Zemansky e Hugh D. Young, *University Physics*, 6 edição, Addison-Wesley, 1983, pp. 843-4. ISBN 0-201-07195-9.

[2] The American journal of science (<http://books.google.com/books?vid=0K0iBwtYewSsTOZn0bYsGb4&id=BPcQAAAAIAAJ>). New Haven : J.D. & E.S. Dana. 1880, p. 234

[3] Weisstein, Eric W., "Eric Weisstein's World of Physics", 2007 (<http://scienceworld.wolfram.com/physics/HertzEffect.html>), *Eric Weisstein's World of Science*, Wolfram Research

## Ver também

- Célula fotoelétrica
- Espectroscopia de elétrons
- Espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X
- Função trabalho
- Energia de limiar de fotoemissão

# Postulados da mecânica quântica

---

Na Mecânica Clássica a descrição de um sistema físico é resumida da seguinte forma:

- O estado físico do sistema em um dado tempo  $t_0$  é descrito por especificando-se as  $N$  coordenadas generalizadas  $q_i(t_0)$  e seus momentos conjugados  $p_i(t_0)$
- O valor dessas grandezas físicas em um dado tempo é completamente determinado se o estado desse sistema neste tempo é conhecido. Ou seja, se o estado do sistema é conhecido podemos determinar com exatidão o estado posterior do sistema após a medida feita em  $t_0$
- A evolução no estado do sistema é dado pelas leis de Newton ou por formulações equivalentes (mecânica lagrangiana ou hamiltoniana). O estado do sistema fica completamente determinado se conhecemos suas condições iniciais

Na Mecânica Quântica a descrição de um sistema físico não se dá de forma tão simples. Esta teoria está fundamentada nos seguintes postulados.

## Postulados

### Postulado I

O estado físico do sistema em um dado tempo  $t_0$  é definido especificando-se um ket  $|\psi\rangle$  pertencente ao espaço dos estados  $\xi$ .

### Postulado II

Toda grandeza física  $A$  é descrita por um observável atuando no espaço dos estados  $\xi$ .

### Postulado III

Os resultados possíveis em uma medida de uma grandeza física  $A$  são os respectivos autovalores do observável correspondente.

### Postulado IV

Seja  $A$  uma grandeza física correspondente ao observável  $A$ . Supondo que o sistema esteja no estado normalizado  $|\psi\rangle$ , isto é,  $\langle\psi|\psi\rangle = 1$ . Se é feita uma medida em  $A$  a probabilidade  $P(a_n)$  de ser encontrado o autovalor  $a_n$  é dada por:

$$P(a_n) = \sum_{i=1}^{g_n} |\langle u_k^i | \psi \rangle|^2, \text{ onde } g_n \text{ é o grau de degenerescência de } a_n.$$

### Postulado V

Se em uma medida da grandeza física  $A$  no estado  $|\psi\rangle$  encontramos um resultado  $a_n$ , imediatamente após a medida o estado do sistema será a projeção de  $|\psi\rangle$  no subespaço  $\xi_n$  associado a  $a_n$ . Isto é,

$$\frac{1}{\sqrt{\langle\psi|P_n|\psi\rangle}} P_n |\psi\rangle,$$

onde  $P_n$  é a projeção de  $|\psi\rangle$  no subespaço  $\xi_n$ .

---

## Postulado VI

A evolução no tempo  $|\psi(t)\rangle$  do vetor de estado de um sistema físico é governada pela Equação de Schrödinger.

$$H(t) |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$$

## Postulado VII

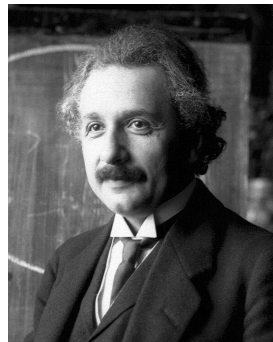
O Postulado da simetrização nos diz que quando um sistema possui várias partículas idênticas somente alguns kets do espaço dos estados podem descrever um sistema físico. Estes kets são, dependendo da natureza das partículas, completamente simétricos ou completamente assimétricos com respeito à permutação das partículas. Partículas que possuem vetores de estado simétricos são chamadas de **bósons** enquanto que as que possuem vetores de estado assimétrico são chamadas de **férmions**.

## Referências bibliográficas






- COHEN-TANNOUJ, C.; DIU, B.; LALOË, F. Quantum Mechanics, 1ª edição. Wiley, Vol. 1, p. 1442-1446, 1977.



# Albert Einstein

Albert Einstein 🧠



Albert Einstein, em 1921.

<b>Nascimento</b>	14 de Março de 1879 Ulm, Baden-Württemberg Alemanha
<b>Morte</b>	18 de abril de 1955 (76 anos) Princeton, Estados Unidos Aneurisma
<b>Residência</b>	Alemanha, Itália, Suíça, Estados Unidos
<b>Nacionalidade</b>	<p> Alemã (1879 — 1896, 1914 — 1933)</p> <p> Sem nacionalidade (1896 — 1901)</p> <p> Suíça (1901 — 1955)</p> <p> Austríaca (1911 — 1912)</p> <p> Americana (1940 — 1955)</p>
<b>Etnicidade</b>	Judeu
<b>Progenitores</b>	Mãe: Pauline Koch Pai: Hermann Einstein

<b>Casamento dos progenitores</b>	8 de agosto de 1876
<b>Campo(s)</b>	Física
<b>Instituições</b>	Escritório de patentes suíço (Berna), Universidade de Zurique, Universidade Carolina, Academia de Ciências da Prússia, Instituto Kaiser Wilhelm, Universidade de Leiden, Instituto de Estudos Avançados de Princeton
<b>Alma mater</b>	Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, Universidade de Zurique
<b>Tese</b>	1905: <i>Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen</i>
<b>Orientador(es)</b>	Alfred Kleiner
<b>Orientado(s)</b>	Ernst Gabor Straus
<b>Conhecido(a) por</b>	Relatividade geral Relatividade restrita Movimento browniano Efeito fotoelétrico $E=mc^2$ Equações de campo de Einstein Estatística de Bose-Einstein Paradoxo EPR
<b>Prêmio(s)</b>	 Nobel de Física (1921), Medalha Matteucci (1921), Medalha Copley (1925), Medalha de Ouro da Royal Astronomical Society (1926), Medalha Max Planck (1929), Medalha Franklin (1935)
<b>Assinatura</b>	

**Albert Einstein** (em alemão AFI: [ˈalbɐt ˈaɪnʃtaɪn] Media:Albert\_Einstein\_german.oggAjuda:Guia de consulta e reprodução/introdução à mídiaImage:Albert\_Einstein\_german.ogg, em inglês: AFI: [ˈælbɜːt ˈaɪnstɑɪn]; Ulm, 14 de Março de 1879 — Princeton, 18 de Abril de 1955) foi um físico teórico alemão radicado nos Estados Unidos.

100 físicos renomados o elegeram, em 2009, o mais memorável físico de todos os tempos.<sup>[1]</sup>

É conhecido por desenvolver a teoria da relatividade. Recebeu o Nobel de Física de 1921, pela correta explicação do efeito fotoelétrico; no entanto, o prêmio só foi anunciado em 1922. O seu trabalho teórico possibilitou o desenvolvimento da energia atômica, apesar de não prever tal possibilidade.

Devido à formulação da teoria da relatividade, Einstein tornou-se mundialmente famoso. Nos seus últimos anos, sua fama excedeu a de qualquer outro cientista na cultura popular: "Einstein" tornou-se um sinónimo de génio. Foi por exemplo eleito pela revista *Time* como a "Pessoa do Século", e a sua face é uma das mais conhecidas em todo o mundo. Em 2005 celebrou-se o Ano Internacional da Física, em comemoração aos cem anos do chamado "Annus Mirabilis" (ano miraculoso) de Einstein, em que este publicou quatro dos mais fundamentais artigos científicos da física do século XX. Em sua honra, foi atribuído o seu nome a uma unidade usada na fotoquímica, o *einstein*, bem como a um elemento químico, o einstênio.

## Biografia

Albert Einstein nasceu na região alemã de Württemberg, na cidade de Ulm, numa família judaica. Em 1852, o avô materno de Einstein, Julius Koch, estabelece-se como comerciante de cereais em Bad Cannstatt, nos arredores de Estugarda. Os pais de Einstein, Hermann Einstein e Pauline Koch, casaram-se em 8 de agosto de 1876. Hermann, que era comerciante, muda-se de Bad Buchau para a cidade de Ulm, onde passou a viver com a esposa. É em Ulm que nasce Albert Einstein, em 14 de março de 1879.<sup>[2]</sup>

## Munique

Em 21 de Junho de 1880, a família Einstein muda-se para Munique, onde Hermann e seu irmão mais novo Jakob, então solteiro, que era engenheiro, dinâmico e empreendedor, fundam a empresa de materiais eléctricos *Jakob Einstein & Cie*. Em 1885 os irmãos Einstein vendem sua parte da firma e investem seu capital, adicionado ao crédito de parentes, fundando a "Elektrotechnische Fabrik J. Einstein & Cie", convencidos de que este setor em pleno crescimento oferece melhor rentabilidade do que o tradicional negócio de penas de colchão.

Na década de 1880, a cidade de Munique, em processo de industrialização (relativamente tardio) desenvolveu-se muito, crescendo a população a um ritmo de dezessete mil novos habitantes por ano. O material eléctrico, uma tecnologia relativamente recente, tem alta conjuntura nestes anos. A empresa do pai de Einstein chegou a ter entre 150 e 200 trabalhadores nos seus melhores dias. Dois dos contratos que a empresa obteve foram a electrificação da cidade de Schwabing (hoje um bairro de Munique) e de Theresienwiese onde se realiza a famosa Oktoberfest de Munique.<sup>[carece de fontes?]</sup>

A 18 de Novembro de 1881, nasce Maria Einstein (Maja). Einstein teria sempre uma relação muito íntima com a irmã. Einstein e Maja recebem uma educação não religiosa. Em casa não se come *casher*, a família não frequenta a sinagoga. O pai considera os ritos judeus como superstições antiquadas. Na casa dos Einstein imperava o espírito não dogmático. Com três anos, Einstein tinha ainda dificuldades de fala, o que preocupou os pais; apesar disso, revelou-se um aluno brilhante.<sup>[3]</sup> <sup>[4]</sup> A juventude de Einstein é solitária. As outras crianças chamam-lhe "Bruder Langweil" (irmão tédio) e "Biedermann" (mesquinho). Aos cinco anos de idade, Einstein recebe instrução de uma professora em casa. Sua instrução termina quando Einstein aborrecido arremesa uma cadeira sobre sua professora. Nesta altura, o seu pai mostra-lhe uma bússola de bolso; Einstein apercebeu-se de que algo fazia flutuar a agulha no espaço e descreveu mais tarde a "impressão profunda e duradoura" desta experiência.<sup>[5]</sup> Aos seis anos de idade, Einstein tem aulas de violino com Herr Schimied, que a princípio não lhe agradam, terminando por abandoná-las. Mas ao longo da sua vida tocar violino, e em particular as sonatas de Mozart, torna-se uma das suas actividades preferidas.

A 1 de Outubro de 1885, Einstein começa a frequentar uma escola primária *Volksschule*, escola católica em Munique (uma cidade fortemente conservadora que sempre permaneceu maioritariamente católica, apesar das simpatias iniciais por Lutero, bem cedo combatidas pelos Jesuítas). Os pais de Einstein, por não serem judeus praticantes, não se importaram que o filho frequentasse inclusive a catequese, que agradou bastante a Einstein.<sup>[6]</sup> Curiosamente Einstein desenvolve sozinho uma fervente fé judaica e passa a cumprir os rituais judeus incluindo o Shabat e a comida kosher. Einstein era aluno seguro e persistente, no entanto um pouco lento na resolução de problemas. Suas notas estavam entre as melhores da classe, e seu boletim era brilhante, segundo sua mãe Pauline. Durante esses anos obteve as mais altas notas em latim e em matemática.<sup>[carece de fontes?]</sup>

Uma lenda amplamente divulgada,<sup>[7]</sup> diz que Einstein teria sido reprovado em matemática quando era estudante, inclusive reproduzida no famoso *Ripley's believe it or not!* ("Acredite se quiser"). Entretanto quando lhe mostraram um recorte de jornal com esta questão, Einstein riu <sup>[carece de fontes?]</sup>. "*Nunca fui reprovado em matemática*", retrucou.<sup>[carece de fontes?]</sup> "*Antes dos quinze anos, já dominava cálculo diferencial e integral*"<sup>[carece de fontes?]</sup>.

Aos dez anos, Albert conhece Max Talmud, um jovem estudante de medicina que costuma jantar com a família Einstein. Max foi uma influência importantíssima na vida de Albert porque o introduziu, apesar da sua tenra idade, à leitura de importantes obras científicas e filosóficas, como por exemplo Os Elementos de Euclides ou a Crítica da Razão Pura de Kant. Em consequência dos seus estudos sobre ciência, Einstein abandona completamente a fé judaica aos doze anos.<sup>[carece de fontes?]</sup>

Einstein estudou cálculo diferencial e integral dos doze (idade em que ganhou de seu tio um livrinho de geometria euclidiana) aos dezesseis anos de idade. Mais tarde frequentou o Luitpold Gymnasium (equivalente à escola secundária) em Munique até aos quinze anos. Este período para Einstein foi de intensa religiosidade, motivada pela escola. O seu pai pretendia que Einstein estudasse engenharia eléctrica, mas este incompatibilizou-se com as autoridades e o regime escolar. Descreveria mais tarde como o pensamento criativo e a aprendizagem eram perdidos

com a utilização de aprendizagem por memorização.<sup>[carece de fontes?]</sup>

Entretanto, os negócios do pai de Einstein começam a correr pior do que se esperava. Há uma grande concentração da indústria do sector eléctrico. Como é típico com os mercados tecnológicos, após o período de grandes números de empresas pequenas e inovadoras, há um ciclo de reestruturações e concentração. Hermann Einstein vê-se obrigado a largar o controle da sua empresa de Munique. A firma é comprada em 1894 pela AEG (Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft). Poucos anos depois, em 1910, existiriam apenas duas grandes empresas no sector: Siemens & Halske e a AEG.<sup>[carece de fontes?]</sup>

## Itália

Em 1894 Hermann Einstein muda-se com a família para Itália, primeiro para Milão e, alguns meses mais tarde, para Pavia. Ele tencionava abrir ali um novo negócio no setor elétrico com o dinheiro de que dispunha, uma ideia que acabaria por levá-lo à falência.<sup>[carece de fontes?]</sup>

O jovem Albert Einstein (tem quinze anos) permanece em Munique por mais uns meses ao cuidado de familiares, a fim de terminar o ano letivo. Einstein porém fica deprimido por sentir-se só e parte para junto de sua família na Itália. Einstein escreveu neste período o seu primeiro trabalho científico: "A Investigação do Estado do Éter em Campos Magnéticos".<sup>[8]</sup>

## Suíça

Em 1895, decide entrar na universidade antes de terminar o ensino secundário. Com esse objectivo fez exames de admissão à ETH Zürich (Eidgenössische Technische Hochschule, Universidade Federal Suíça em Zurique), mas é reprovado na parte de humanidades dos exames.<sup>[9]</sup> Einstein descreveu que foi nesse mesmo ano, aos dezesseis anos de idade, que realizou a sua primeira experiência mental, visualizando uma viagem lado a lado com um feixe de luz.<sup>[10]</sup> Foi então enviado para a cidade de Aarau no cantão suíço de Argóvia para terminar a escola secundária, onde estudou a teoria electromagnética de Maxwell. Em 1896 recebe o seu diploma.

Em 1896, Einstein (com dezassete anos de idade) renuncia à cidadania alemã com o intuito de assim evitar o serviço militar alemão.<sup>[carece de fontes?]</sup>

Cursou o ensino superior na Suíça, na ETH Zürich, onde mais tarde foi docente. Concluiu a graduação em Física em 1900.<sup>[11]</sup> Também em 1900, conheceu Michele Besso, que o apresentou às obras de Ernst Mach. No ano seguinte, publicou um artigo sobre forças capilares no *Annalen der Physik*,<sup>[12]</sup> uma das mais prestigiadas publicações científicas em Física.

Pede então a naturalização suíça, que receberia a 21 de Fevereiro de 1901. Pagou os vinte francos suíços que o seu passaporte custou (uma quantia considerável) com as suas próprias poupanças. Nunca deixaria de ser cidadão suíço.<sup>[13]</sup> Nas inúmeras viagens que faria no futuro, Einstein usaria o seu passaporte suíço.

A 6 de Janeiro de 1903 casou-se com Mileva Marić, sem a presença dos pais da noiva. Albert e Mileva tiveram três filhos: Lieserl Einstein, Hans Albert Einstein e Eduard Einstein. A primeira, presume-se que tenha morrido ainda bebé ou que tenha sido dada para adoção, o do meio tornou-se um importante professor de Hidráulica na Universidade da Califórnia e o mais jovem, formado em Música e Literatura, morreu num hospital psiquiátrico suíço.<sup>[carece de fontes?]</sup>



O casal Albert e Mileva.



## Annus Mirabilis

Obteve o doutorado em 1905. No mesmo ano escreveu quatro artigos fundamentais para a Física Moderna, afirmando-se por esta razão que 1905 foi o "*annus mirabilis*" para Einstein.<sup>[carece de fontes?]</sup>

O primeiro artigo de 1905<sup>[14]</sup> propôs a ideia dos "quanta de luz" (os atuais fótons) e mostrou como é que poderiam ser utilizados para explicar fenômenos como o efeito fotoelétrico. A teoria dos quanta de luz de Einstein não recebeu quase nenhum apoio por parte dos físicos durante vinte anos, pois contradizia a teoria ondulatória da luz subjacente às equações de Maxwell. Mesmo depois das experiências terem demonstrado que as equações de Einstein para o efeito fotoelétrico eram exatas, a explicação proposta por ele não foi aceita. Em 1921, quando recebeu o prêmio Nobel pelo seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico, a maior parte dos físicos ainda pensava que as equações estavam correctas, mas que a ideia de quanta de luz seria impossível.

O segundo artigo deste ano foi sobre o movimento browniano,<sup>[15]</sup> que constitui uma evidência experimental da existência dos átomos. Antes deste artigo, os átomos eram considerados um conceito útil, mas sua existência concreta era controversa. Einstein relacionou as grandezas estatísticas do movimento browniano com o comportamento dos átomos e deu aos experimentalistas um método de contagem dos átomos através de um microscópio vulgar. Wilhelm Ostwald, um dos que se opunham à ideia dos átomos, disse mais tarde a Arnold Sommerfeld que mudou de opinião devido à explicação de Einstein do movimento browniano.

O terceiro artigo de 1905,<sup>[16]</sup> sobre eletrodinâmica de corpos em movimento, introduziu a relatividade restrita. Estabeleceu uma relação entre os conceitos de tempo e distância. Algumas das ideias matemáticas já haviam sido introduzidas um ano antes pelo físico neerlandês Hendrik Lorentz, mas Einstein mostrou como era possível entender esses conceitos. O seu trabalho baseou-se em dois axiomas: um foi a ideia de Galileu de que as leis da natureza são as mesmas para todos os observadores que se movem a uma velocidade constante relativamente uns aos outros; o outro, a ideia de que a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores. A relatividade restrita tem algumas consequências importantes, já que são rejeitados conceitos absolutos de tempo e tamanho. A teoria ficou conhecida mais tarde por "*Teoria da Relatividade Restrita*" para ser distinguida da teoria geral que Einstein desenvolveu mais tarde, a qual considera que todos os observadores são equivalentes.

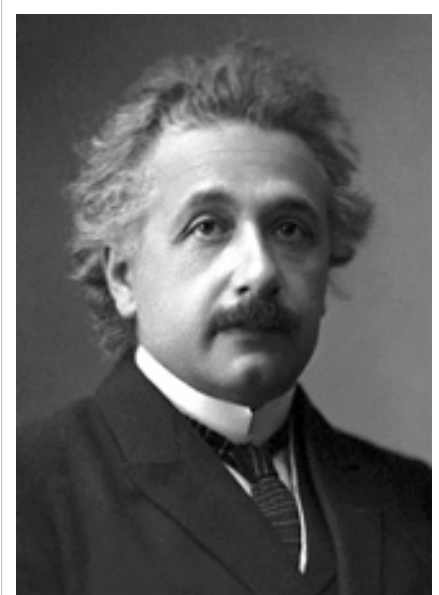


Foto para o Prêmio Nobel, em 1921.



A famosa equação é mostrada no Taipei 101 durante o evento do ano mundial da Física em 2005.

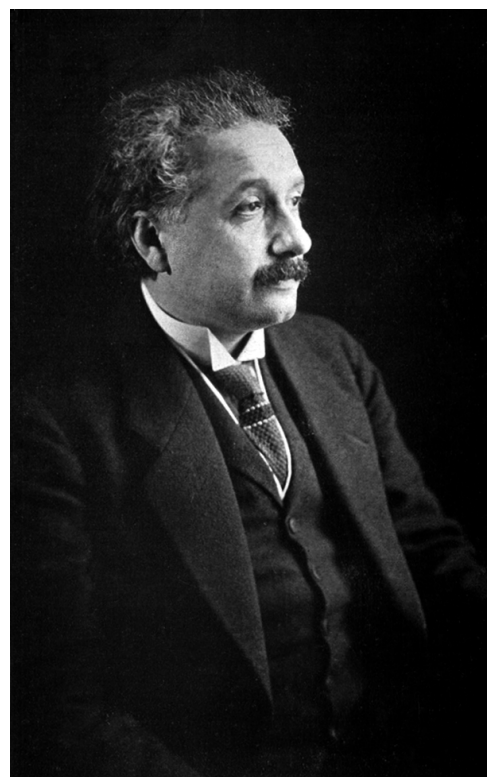
No quarto artigo,<sup>[17]</sup> uma extensão do terceiro, Einstein introduz o conceito de massa inercial. Nele, Einstein deduziu a famosa relação entre a massa e a energia:  $E = mc^2$ . (Embora Umberto Bartocci, tenha afirmado que a equação teria sido publicada primeiramente em 1903, pelo italiano Olinto De Pretto).<sup>[18]</sup> Esta equação esteve na base de construção de bombas nucleares. A ideia serviu mais tarde para explicar como é que o Big Bang, uma explosão de energia, poderia ter dado origem à matéria.

## Berlim

Em 1914, pouco antes do início da Primeira Guerra Mundial, Einstein instalou-se em Berlim onde foi nomeado director do Instituto Kaiser Wilhelm de Física (1917 - 1933), sendo senador da Sociedade Kaiser Wilhelm (1923 - 1933), e professor da Universidade de Berlim, tornando-se, novamente, cidadão alemão no mesmo ano. <sup>[carece de fontes?]</sup>

Em novembro de 1915, Einstein apresentou perante a Academia de Ciências da Prússia uma série de conferências onde apresentou a sua teoria da relatividade geral sob o título "*As equações de campo da gravitação.*" A conferência final culminou com a apresentação de uma equação que substituiu a lei da gravitação de Isaac Newton. Esta teoria considera que todos os observadores são equivalentes, e não só aqueles que se movem a velocidade uniforme. Na relatividade geral, a gravidade não é uma força (como na segunda lei de Newton) mas uma consequência da curvatura do espaço-tempo. A teoria serviu de base para o estudo da cosmologia e deu aos cientistas ferramentas para entenderem características do universo que só foram descobertas bem depois da morte de Einstein. <sup>[carece de fontes?]</sup>

A relação de Einstein com a Física Quântica é bastante interessante. Ele foi o primeiro a afirmar que a teoria quântica era revolucionária. A sua ideia de luz quântica foi um corte com a Física clássica. Em 1909, Einstein sugeriu numa conferência que era necessário encontrar uma forma de entender em conjunto partículas e ondas. No entanto, em



Einstein, 1921.

meados dos anos 1920, quando a teoria quântica original foi substituída pela nova mecânica quântica, Einstein discordou da interpretação de Copenhaga porque ela defendia que a realidade era aleatória ou probabilística. Einstein concordava que a Mecânica Quântica era a melhor teoria disponível, mas procurou sempre uma explicação determinista, isto é não-probabilística. <sup>[carece de fontes?]</sup>

A famosa afirmação de Einstein, "*A mecânica quântica está a impor-se. Mas uma voz interior diz-me que ainda não é a teoria certa. A teoria diz muito, mas não nos aproxima do segredo do Velho (the Old One). Eu estou convencido que Ele não joga aos dados.*", apareceu numa carta a Max Born datada de 12 de Dezembro de 1926. Não era uma rejeição da teoria estatística. Ele tinha usado a análise estatística no seu trabalho sobre movimento browniano e sobre o efeito fotoelétrico. Mas Einstein não acreditava que, na sua essência, a realidade fosse aleatória. <sup>[carece de fontes?]</sup>

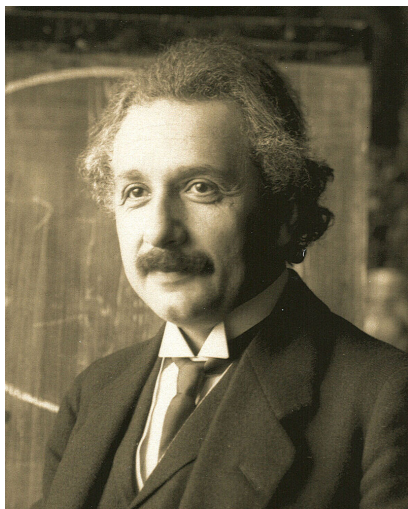
O seu pacifismo e a sua origem judaica tornaram-no impopular entre os nacionalistas alemães. Depois de se ter tornado mundialmente famoso (em 7 de Novembro de 1919, quando o Times de Londres anunciou o sucesso da sua teoria da gravidade) o ódio dos nacionalistas tornou-se ainda mais forte. <sup>[carece de fontes?]</sup>

Em 1919, ano da famosa confirmação do desvio de luz em Sobral e Príncipe, Albert Einstein divorcia-se de Mileva e casa-se com a sua prima divorciada Elsa. <sup>[carece de fontes?]</sup>

Em 1920, durante uma de suas aulas em Berlim, há um incidente com manifestações anti-semitas, o que levou Einstein a deter-se com mais atenção aos factos que então ocorriam na Alemanha. <sup>[carece de fontes?]</sup>



Albert Einstein e sua esposa Elsa.



Albert Einstein em 1921.

Em 1921, Einstein acompanha uma delegação Sionista à Palestina. Ele propõe para a Palestina um estado baseado no modelo suíço, onde muçulmanos e judeus poderiam viver lado a lado em paz. Sendo um físico famoso, Einstein participa numa campanha de angariação de fundos para a Universidade Hebraica de Jerusalém. Ele apoia o plano de uma universidade onde judeus de todo o mundo possam estudar sem serem vítimas de discriminação. <sup>[carece de fontes?]</sup>

Recebeu o Nobel de Física de 1921 pela explicação do efeito fotoelétrico; no entanto, o prémio só foi anunciado em 1922. Einstein receberia a quantia de 120 000 coroas suecas. Einstein não participou da cerimónia de atribuição do prémio pois encontrava-se no Japão nessa altura. Ao longo de sua vida, Einstein visitaria diversos países, incluindo alguns da América Latina. Entre 1925 e 1928, Einstein foi presidente da Universidade Hebraica de Jerusalém. <sup>[carece de fontes?]</sup>

Em 1933, Adolf Hitler chega ao poder na Alemanha. Einstein, judeu, encontra-se agora em perigo. É avisado por amigos de que há planos para o seu assassinato e é aconselhado a fugir. Einstein renuncia mais uma vez à cidadania alemã. <sup>[carece de fontes?]</sup>

A 7 de Outubro de 1933, Einstein parte do porto de Southampton num navio para os Estados Unidos, o seu novo lar. Nunca voltaria a viver na Europa. <sup>[carece de fontes?]</sup>

Participou da 1ª, 2ª, 5ª e 7ª Conferência de Solvay.

## Brasil

Einstein fez uma viagem à América do Sul, em 1925, visitando países como Argentina, Uruguai e também o Brasil.<sup>[19]</sup> Além de fazer conferências científicas, visitou universidades e instituições de pesquisas. O navio que o trouxe ao Brasil foi o Cap Polonio. Ficou hospedado no Hotel Glória e gostou da goiaba, servida no café da manhã. Em 21 de março passou pelo Rio de Janeiro, onde foi recebido por jornalistas, cientistas e membros da comunidade judaica. Visitou o Jardim Botânico e fez o seguinte comentário, por escrito, para o jornalista Assis Chateaubriand: *"O problema que minha mente formulou foi respondido pelo luminoso céu do Brasil"*.<sup>[20]</sup> Tal afirmação dizia respeito a uma observação do eclipse solar registrada na cidade cearense de Sobral por uma equipe de cientistas britânicos, liderada por Sir Arthur Stanley Eddington, que buscava vestígios que pudessem comprovar a Teoria da Relatividade, até então mera especulação. Albert Einstein nunca chegou a visitar a cidade de Sobral.<sup>[carece de fontes?]</sup>



Carlos Chagas e a equipe do Instituto Oswaldo Cruz, em recepção a Albert Einstein.

Em 24 de abril de 1925, Einstein deixou Buenos Aires e alcançou Montevideú. Fez ali três conferências e, tal como na Argentina, participou de várias recepções e visitou o presidente da República. Permaneceu no Uruguai por uma semana, de onde saiu no primeiro dia de maio, em direção ao Rio de Janeiro, no navio Valdívia. Desembarcou novamente no Rio de Janeiro em 4 de maio. Nos dias seguintes percorreria vários pontos turísticos da cidade, incluindo o Pão de Açúcar, o Corcovado e a Floresta da Tijuca. As anotações de seu diário ilustram bem suas percepções quanto à natureza tropical do local.<sup>[21]</sup> No dia 6 de Maio, visitou o então presidente da República, Artur Bernardes, além de alguns ministros.<sup>[20]</sup>

Seu programa turístico-científico no Brasil incluiu diversas visitas a instituições, como o Museu Nacional, a Academia Brasileira de Ciências e o Instituto Oswaldo Cruz, e duas conferências: uma no Clube de Engenharia do Rio de Janeiro e a outra na Escola Politécnica do Largo de São Francisco, atual Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro.<sup>[carece de fontes?]</sup>

Através de ondas da rádio Sociedade, criada em 1923, Einstein proferiu em alemão uma mensagem à população, que foi traduzida pelo químico Mário Saraiva.<sup>[19]</sup> Nesta mensagem, o cientista destacou a importância dos meios radiofônicos para a difusão da cultura e do aprendizado científico, desde que sejam utilizados e preservados por profissionais qualificados.<sup>[19]</sup>

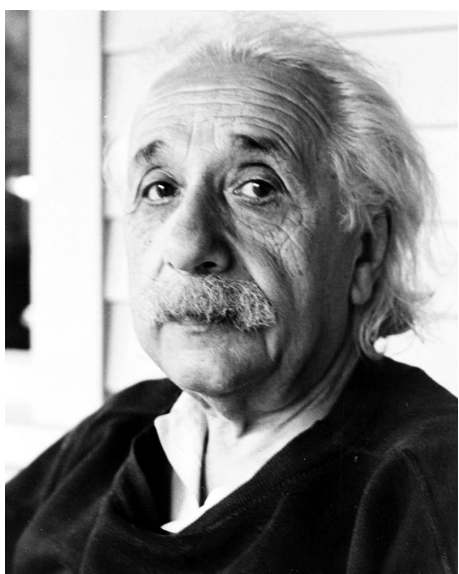
Einstein deixaria o Rio no dia 12 de maio. Essa sua visita foi amplamente divulgada pela imprensa e influenciou na luta pelo estabelecimento de pesquisa básica e para a difusão das ideias da física moderna no Brasil.<sup>[19]</sup> Deixando o Rio, o já famoso físico alemão enviou, do navio, uma carta ao Comitê Nobel. Nesta carta, sugeria o nome do marechal Cândido Rondon para o Nobel da Paz.<sup>[20]</sup> Einstein teria se impressionado com o que se informou sobre as atividades de Rondon em relação à integração de tribos indígenas ao homem civilizado, sem o uso de armas ou algo do tipo.<sup>[20]</sup>

## Princeton

Em 1932 aceitou uma posição no Instituto de Estudos Avançados da Universidade de Princeton, Nova Jersey como professor de física teórica e em 1933 com a subida dos Nazis decidiu viver permanentemente aí.

Einstein passou os últimos quarenta anos de sua vida tentando unificar os campos eletromagnético e o gravitacional numa única teoria que ele chamava de Teoria do Campo Unificado. Procurou unificar as forças fundamentais, isto é a força gravitacional e a força electromagnética, numa teoria que descrevesse as forças como uma única força, do mesmo modo que a teoria de Maxwell une as forças eléctrica e magnética. No entanto não incluía no seu modelo as forças nucleares forte e fraca, que na época, e até 1970, não eram compreendidas como forças separadas. <sup>[carece de fontes?]</sup>

Em 1941 tem início o Projecto Manhattan (o desenvolvimento de uma bomba atômica). Pronunciamento oficial do próprio Albert Einstein sobre o referido tema:<sup>[22]</sup>



Albert Einstein em seu último ano de vida.

“ *Minha responsabilidade na questão da bomba atômica se limita a uma única intervenção: escrevi uma carta ao Presidente Roosevelt. Eu sabia ser necessária e urgente a organização de experiências de grande envergadura para o estudo e a realização da bomba atômica. E o disse. Conhecia também o risco universal causado pela descoberta da bomba. Mas os sábios alemães se encarniçavam sobre o mesmo problema e tinham todas as chances de resolvê-lo. Assumi portanto minhas responsabilidades. E no entanto sou apaixonadamente pacifista e minha maneira de ver não é diferente diante da mortandade em tempo de paz. Já que as nações não se resolvem a suprimir a guerra por uma ação conjunta, já que não superam os conflitos por uma arbitragem pacífica e não baseiam seu direito sobre a lei, elas se vêem inexoravelmente obrigadas a preparar a guerra. Participando da corrida geral dos armamentos e não querendo perder, concebem e executam os planos mais detestáveis. Precipitam-se para a guerra. Mas hoje, a guerra se chama o aniquilamento da humanidade. Protestar hoje contra os armamentos não quer dizer nada e não muda nada. Só a supressão definitiva do risco universal da guerra dá sentido e oportunidade à sobrevivência do mundo. Daqui em diante, eis nosso labor cotidiano e nossa inabalável decisão: lutar contra a raiz do mal e não contra os efeitos. O homem aceita lucidamente esta exigência. Que importa que seja acusado de anti-social ou de utópico? Gandhi encarna o maior gênio político de nossa civilização. Definiu o sentido concreto de uma política e soube encontrar em cada homem um inesgotável heroísmo quando descobre um objetivo e um valor para sua ação. A Índia, hoje livre, prova a justiça de seu testemunho. Ora, o poder material, em aparência invencível, do Império Britânico foi submergido por uma vontade inspirada por ideias simples e claras* ”

—  
Albert  
Einstein

Em 1945, Einstein reforma-se da carreira universitária. <sup>[carece de fontes?]</sup>

Em 1952, David Ben-Gurion, então o primeiro-ministro de Israel, convida Albert Einstein para suceder a Chaim Weizmann no cargo de presidente do estado de Israel. Einstein agradece mas recusa, alegando que não está à altura

do cargo.<sup>[carece de fontes?]</sup>

Morreu em 18 de Abril de 1955, aos 76 anos, em consequência de um aneurisma. O seu corpo foi cremado mas seu cérebro foi doado ao cientista Thomas Harvey, patologista do Hospital de Princeton.<sup>[carece de fontes?]</sup> O cérebro de Einstein pesava 1230 g, enquanto a média para homens é de 1400 g. Seu volume também era menor, estava quatro centímetros abaixo da média. Essa diminuição de peso e volume pode estar relacionada à idade com que o cientista morreu: 76 anos.<sup>[23]</sup>

## Política e religião

Einstein considerava-se um socialista.<sup>[24]</sup> Neste artigo de 1949, descreveu a "fase predatória do desenvolvimento humano", exemplificada pelo anarquismo capitalista da sociedade, como uma origem de mal a ser ultrapassada. Não concordava com os regimes totalitários de inspiração socialista. No início, foi a favor da construção da bomba atômica para derrotar Adolf Hitler, mas depois da guerra fez pressão a favor do desarmamento nuclear e de um governo mundial.

Pelo facto de defender os direitos civis e das suas ideias socialistas, Einstein chamou a atenção do FBI, que o investigou sob a acusação de pertencer ao Partido Comunista. O governo americano recentemente liberou os arquivos que contêm a sua visão sobre a pessoa de Einstein e as suas actividades pessoais e políticas. Num desses arquivos comenta-se que o cientista era "inadmissível para os Estados Unidos" por várias razões, principalmente porque, segundo as palavras dos serviços, cria, aconselhava e ensinava uma doutrina anarquista, além de ser membro e afiliado a grupos que admitiam "actuar ilegalmente contra os princípios fundamentais do governo organizado".

Einstein era profundamente pacifista, tendo intervindo diversas vezes a favor da paz no mundo e do abandono das armas nucleares. Em 1944, um manuscrito do seu trabalho de 1905, devidamente autografado, foi leiloado, e os cerca de seis milhões de dólares arrecadados foram revertidos para a ajuda às vítimas da Segunda Guerra Mundial. Este documento encontra-se hoje na Biblioteca do Congresso dos EUA.<sup>[carece de fontes?]</sup>

Uma semana antes de sua morte assinou a sua última carta, endereçada a Bertrand Russell, concordando em que o seu nome fosse incluído numa petição exortando todas as nações a abandonar as armas nucleares.<sup>[carece de fontes?]</sup>



Einstein e Robert Oppenheimer.

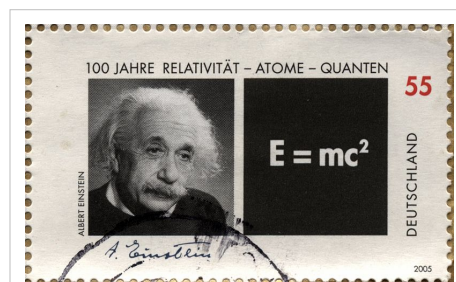
Einstein era também um sionista cultural convicto, tendo em diversas ocasiões defendido o desenvolvimento do Estado Judaico na Palestina. Em particular, foi membro do conselho de governadores da Universidade Hebraica de Jerusalém. Sendo antinacionalista e pacifista, esteve no entanto contra alguns dos acontecimentos que levaram ao nascimento do Estado Judaico. Einstein acreditava que o estado de Israel deveria acolher judeus e palestinos de modo pacífico, num modelo confederacional semelhante ao do estado suíço.<sup>[carece de fontes?]</sup>

Einstein era religioso, no entanto não professava a fé judaica. Do ponto de vista religioso, ele se encontrava entre o panteísmo de Baruch Spinoza e o deísmo na qual se acredita que é com a razão, e não com a Fé, que se chega a Deus. Alguns historiadores argumentam que, devido a suas declarações, tanto panteístas quanto deístas ao longo de sua vida, talvez ele seja melhor classificado como um pandeísta.<sup>[carece de fontes?]</sup>

Acreditava que Deus se revelava através da harmonia das leis da natureza e rejeitava o Deus pessoal que intervém na História. Era também crente no total determinismo do universo e excluía a possibilidade do livre arbítrio dos seres

humanos. Para Einstein "o Homem é livre de fazer o que quer, mas não é livre de querer o que quer", o que significa que o Homem age sempre de forma compulsiva, sem uma verdadeira liberdade, todos os seus actos sendo determinados pelas leis da natureza. <sup>[carece de fontes?]</sup>

A seguinte carta breve de Einstein, escrita a 24 de setembro de 1946 a Isaac Hirsch, o presidente da Congregação B'er Chaym, ilustra bem a relação de Einstein com a religião judaica e o seu senso de humor típico:



Selo mostrando Albert Einstein. Este selo foi confeccionado em 2005 em comemoração ao ano da física.

“ *Meu caro Sr. Hirsch,*

*muito obrigado pelo seu gentil convite. Apesar de eu ser uma espécie de Santo Judeu, tenho estado ausente da Sinagoga há tanto tempo, que receio que Deus não me iria reconhecer, e se me reconhecesse seria ainda pior.*

*Com os meus melhores cumprimentos e votos de bons feriados para si e para a sua congregação. Agradecendo mais uma vez,*

<sup>[carece de fontes?]</sup>

Em sua obra Como Vejo o Mundo no tema religiosidade, Einstein procura enfatizar seu ponto de vista do mundo e suas concepções em temas fundamentais à formação do homem, tais como o sentido da vida, o lugar do dinheiro, o fundamento da moral e a liberdade individual. O Estado, a educação, o senso de responsabilidade social, a guerra e a paz, o respeito às minorias, o trabalho, a produção e a distribuição de riquezas, o desarmamento, a convivência pacífica entre as nações são alguns dos temas que ele trata, entre outros. <sup>[carece de fontes?]</sup>

Um breve discurso de Albert Einstein:

“ *O espírito científico, fortemente armado com seu método, não existe sem a religiosidade cósmica. Ela se distingue da crença das multidões ingênuas que consideram Deus um Ser de quem esperam benignidade e do qual temem o castigo - uma espécie de sentimento exaltado da mesma natureza que os laços do filho com o pai, um ser com quem também estabelecem relações pessoais, por respeitadas que sejam. Mas o sábio, bem convencido, da lei de causalidade de qualquer acontecimento, decifra o futuro e o passado submetidos às mesmas regras de necessidade e determinismo. A moral não lhe suscita problemas com os deuses, mas simplesmente com os homens. Sua religiosidade consiste em espantar-se, em extasiar-se diante da harmonia das leis da natureza, revelando uma inteligência tão superior que todos os pensamentos humanos e todo seu engenho não podem desvendar, diante dela, a não ser seu nada irrisório. Este sentimento desenvolve a regra dominante de sua vida, de sua coragem, na medida em que supera a servidão dos desejos egoístas. Indubitavelmente, este sentimento se compara àquele que animou os espíritos criadores religiosos em todos os tempos.*

<sup>[carece de fontes?]</sup>

Em 2008,<sup>[25]</sup> veio ao público uma carta de propriedade de um colecionador particular, cuja autoria é de Einstein, que levantou a hipótese que ele se tornou ateu no fim da sua vida. Ele escreve em determinado trecho que Deus segundo crenças populares é fruto da fraqueza humana, sendo a Bíblia uma coleção de lendas honradas ainda que primitivas, infantis. Nesta suposta carta Einstein ainda cita a religião judaica, desprezando qualquer diferença entre o povo judeu em relação aos outros povos. Essa carta mostra questões sobre a posição de Einstein em relação ao fanatismo religioso e as superstições, ele apresenta uma posição bastante crítica em relação a religião. Lembrando que na sua juventude, na visão de Einstein, Deus não tinha formas antropomórficas, mas ele tinha uma visão de Deus semelhante a Bento de Espinosa e a do Deísmo, levando alguns historiadores a classificá-lo como Pandeísta <sup>[carece de fontes?]</sup> - vale ressaltar que esta validade da carta ainda está passando a exame de provas históricas.

## Música

Era apreciador de música:<sup>[carece de fontes?]</sup>

“ Se eu não fosse físico, seria provavelmente músico. ”

- "Was ich zu Bachs Lebenswerk zu sagen habe: Hören, spielen, lieben, verehren und – das Maul halten!"  
-Tradução: "O que tenho a dizer sobre a obra de Bach? Ouvir, tocar, amar, adorar ... ficar calado!"  
-Albert Einstein em resposta a um inquérito da revista alemã *Illustrierten Wochenschrift*, 1928.

## Obras

### Científica

- *Movimento Browniano*, 1905
- *Efeito Fotoelétrico*, 1905
- *Teoria Especial da Relatividade*, 1905
- *Teoria Geral da Relatividade*, 1916
- *Investigações sobre a Teoria do Movimento Browniano*, 1926
- *Evolução da Física*, 1938

### Literária

- *Como Vejo o Mundo*, 1922-1934
- *Sobre o Sionismo*, 1930
- *A Minha Filosofia*, 1934
- *Meus últimos anos*, 1950
- *Escritos da Maturidade*, 1934-1950
- *Notas Autobiográficas*

## Bibliografia

- I.C. Moreira e A.T. Tolmasquim, Um manuscrito de Einstein encontrado no Brasil, *Ciência Hoje*, vol. 21, n. 124, 22-29, (1995).
- I.C. Moreira and A.T. Tolmasquim, Einstein in Brazil: the communication to the Brazilian Academy of Sciences on the constitution of light, in *History of Modern Physics*, H. Kragh, G. Vanpaemel and P. Marage (eds.), pp. 229–242, BREPOLs, Turnhout, Belgium, 2002.
- A.T. Tolmasquim, *Einstein - O viajante da relatividade na América do Sul*, Vieira&Lent, Rio de Janeiro, 2004.
- "Como Vejo o Mundo", 1922-1934
- Pais, Abraham. "**Sutil é o Senhor.**": a ciência e a vida de Albert Einstein. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

[1] *Einstein the greatest* (<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/541840.stm>) (em inglês).

[2] Página do Nobel: *The Nobel Prize in Physics 1921* ([http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1921/](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1921/))

[3] Ze'ev Rosenkranz. *Albert Einstein — Derrière l'image*. [S.l.]: Editions NZZ, Zürich, 2005. ISBN 3-03823-182-7

[4] Thomas Sowell utilizou o nome de Einstein num livro sobre este tipo de crianças. Thomas Sowell. "**The Einstein Syndrome: Bright Children Who Talk Late**". [S.l.]: Basic Books, 2001. pp. 89–150. ISBN 0-465-08140-1

[5] P. A. Schilpp (Ed.). *Albert Einstein — Autobiographical Notes*. [S.l.]: Open Court, 1979. pp. 8–9.

[6] Time Magazine: *Einstein & Faith* (<http://www.time.com/time/magazine/article/0,9171,1607298,00.html>)

[7] ([http://mundoestranho.abril.com.br/historia/pergunta\\_287394.shtml](http://mundoestranho.abril.com.br/historia/pergunta_287394.shtml))

[8] Mehra, Jagdish. *Albert Einstein's first paper* ([http://www.worldscibooks.com/phy\\_etextbook/4454/4454\\_chap1.pdf](http://www.worldscibooks.com/phy_etextbook/4454/4454_chap1.pdf)) (PDF).

[9] Roger Highfield. *The Private Lives of Albert Einstein*. London: Faber and Faber, 1993. pp. 21. 0-571-17170-2

[10] Albert Einstein. *Autobiographical Notes (Centennial ed.)*. Chicago: Open Court, 1979. pp. 48-51. 0-875-48352-6

[11] *A Brief Biography of Albert Einstein* (<http://www.ssqq.com/archive/alberteinstein.htm>) (em inglês) (Abril 2005).

[12] Einstein, Albert (1901). "Folgerungen aus den Capillaritätserscheinungen (Conclusions Drawn from the Phenomena of Capillarity)". *Annalen der Physik* **4**: 513.



- [13] *Einstein's nationalities at einstein-website.de* ([http://www.einstein-website.de/z\\_information/variousthings.html#national](http://www.einstein-website.de/z_information/variousthings.html#national)). Página visitada em 4 de Outubro de 2006.
- [14] Einstein, Albert (1905). "On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light". *Annalen der Physik* **17**: 132–148.
- [15] Einstein, Albert (1905). "On the Motion—Required by the Molecular Kinetic Theory of Heat—of Small Particles Suspended in a Stationary Liquid". *Annalen der Physik* **17**: 549-560.
- [16] Einstein, Albert (1905). " On the Electrodynamics of Moving Bodies (<http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/specrel.pdf>)" (PDF) (em inglês). *Annalen der Physik* **17**: 891–921.
- [17] Einstein, Albert (1905). "Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy Content?". *Annalen der Physik* **18**: 639–641.
- [18] (em inglês) Guardian - Einstein's  $E=mc^2$  was Italian's idea (<http://www.guardian.co.uk/world/1999/nov/11/rorycarroll>) (acessado em 24 de agosto de 2009).
- [19] [I. C. MOREIRA E A. A. P. VIDEIRA (orgs.): *Einstein e o Brasil*, Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.]
- [20] Site Oficial da Sociedade Brasileira de Física ([http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/amf/einstein/visita\\_ao\\_brasil.asp](http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/amf/einstein/visita_ao_brasil.asp))
- [21] [I. C. Moreira e A. T. Tolmasquim, *Um manuscrito de Einstein encontrado no Brasil*, Ciência Hoje, vol. 21, n. 124, 22-29, (1995).]
- [22] [Albert Einstein: *Como vejo o mundo*, ed. 15, 1981]
- [23] *A mente de um gênio* (<http://veja.abril.com.br/noticia/ciencia-tecnologia/mente-genio-506363.shtml>). Veja.com. Página visitada em 18 de outubro de 2009.
- [24] Monthly Review: *Why Socialism?* (<http://www.monthlyreview.org/598einst.htm>), acessado em 2 de maio de 2007
- [25] Carta que revela desdém de Einstein por religião vai a leilão ([http://www.bbc.co.uk/portuguese/reporterbbc/story/2008/05/080513\\_einsteinreligiao\\_ba.shtml](http://www.bbc.co.uk/portuguese/reporterbbc/story/2008/05/080513_einsteinreligiao_ba.shtml))

## Ver também

- Leopold Koppel

## Ligações externas

- Biografia (<http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Einstein.html>) em MacTutor (em inglês)
- Albert Einstein (<http://www.genealogy.ams.org//id.php?id=53269>) em Mathematics Genealogy Project
- Perfil no sítio oficial do Nobel de Física 1921 ([http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1921/](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1921/)) (em inglês)
- Breve biografia na revista *Quantum*. (<http://fisica.fc.ul.pt/~quantum/numeros/1/9.htm>)
- Biografia em pdf pelo Prof. P. Crawford. (<http://cosmo.fis.fc.ul.pt/~crawford/artigos/Albert Einstein 1b.pdf>)
- Biografia na revista *Morashá*. ([http://www.morasha.com.br/conteudo/artigos/artigos\\_view.asp?a=139&p=0](http://www.morasha.com.br/conteudo/artigos/artigos_view.asp?a=139&p=0))
- Albert Einstein, sítio do Instituto de Física da UFRGS. (<http://www.if.ufrgs.br/einstein>)
- Albert Einstein Online*. (<http://www.westegg.com/einstein/>) (em inglês)
- 1905, O ANO-LUZ* ([http://tvescola.mec.gov.br/index.php?&option=com\\_zoo&view=item&item\\_id=460](http://tvescola.mec.gov.br/index.php?&option=com_zoo&view=item&item_id=460)). tvescola.mec.gov.br. Página visitada em 2010-06-08.

Precedido por <b>Max Planck</b>	<b>Presidente da Deutsche Physikalische Gesellschaft</b> 1916 — 1918	Sucedido por <b>Max Wien</b>
Precedido por <b>Charles Edouard Guillaume</b>	<b>Nobel de Física</b> 1921	Sucedido por <b>Niels Bohr</b>
Precedido por <b>Henry Moseley</b>	<b>Medalha Matteucci</b> 1921	Sucedido por <b>Niels Bohr</b>
Precedido por <b>Edward Albert Sharpey-Schafer</b>	<b>Medalha Copley</b> 1925	Sucedido por <b>Frederick Gowland Hopkins</b>
Precedido por <b>Frank Dyson</b>	<b>Medalha de Ouro da Royal Astronomical Society</b> 1926	Sucedido por <b>Frank Schlesinger</b>

Precedido por —	<b>Medalha Max Planck</b> 1929 com Max Planck	Sucedido por <b>Niels Bohr</b>
Precedido por <b>Irving Langmuir e Henry Norris Russell</b>	<b>Medalha Franklin</b> 1935 com John Ambrose Fleming	Sucedido por <b>Frank Baldwin Jewett e Charles Kettering</b>

## Constante de Planck

A **constante de Planck**, representada por  $h$ , é uma das constantes fundamentais da Física, usada para descrever o tamanho dos quanta. Tem um papel fundamental na teoria de Mecânica Quântica, aparecendo sempre no estudo de fenômenos em que a explicação por meio da mecânica quântica se torna influente. Tem o seu nome em homenagem a Max Planck, um dos fundadores da Teoria Quântica. Seu valor é de aproximadamente:

$$h = 6,626\ 069\ 3(11) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s},$$

ou, com eV como unidade de energia:

$$h = 4,135\ 667\ 43(35) \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s},$$

ou, ainda, no sistema CGS:

$$h = 6,6 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$$

Um dos usos dessa constante é a equação da energia do fóton, dada pela seguinte equação:

$$E = h \cdot \nu$$

onde:

$E$  = energia do fóton, denominada *quantum*;

$h$  = **constante de Planck**;

$\nu$  = frequência da radiação. Lê-se "ni".

## Constante reduzida de Planck

Em algumas equações de física, tal como a equação de Schrödinger, aparece o símbolo  $\hbar$ , que é apenas uma abreviação conveniente para  $\frac{h}{2\pi}$ , chamada de **constante reduzida de Planck**, ou para alguns, constante de Dirac, diferindo da constante de Planck pelo fator  $2\pi$ . Consequentemente:

# Dualidade onda-corpúsculo

---

A **dualidade onda-partícula**, também denominada **dualidade onda-corpúsculo** ou **dualidade matéria-energia**, constitui uma propriedade básica da mecânica quântica e consiste na capacidade das partículas subatômicas de se comportarem ou terem propriedades tanto de partículas como de ondas.

Foi enunciada pela primeira vez, em 1924, pelo físico francês Louis-Victor de Broglie, que anunciou que os elétrons apresentavam características tanto ondulatórias como corpusculares, comportando-se de um ou outro modo dependendo do experimento específico. A experiência de Young (experiência da dupla fenda) de Thomas Young exemplifica de maneira sensível esta dualidade.

De Broglie se baseou no efeito fotoelétrico para chegar a esta conclusão, já que Albert Einstein havia concluído que os fótons que atuavam no efeito fotoelétrico eram partículas com energia  $E=h\cdot f$ , onde  $f$  é a frequência de onda. Einstein, concluiu desta forma que, em determinados processos, as ondas se comportam como corpúsculos. Então, de Broglie associou o inverso, ou seja, que toda a partícula se comportava como uma onda. O físico francês foi capaz de relacionar o comprimento de onda com a massa da partícula, mediante a fórmula  $\lambda=h/m\cdot v$ , onde o produto  $m\cdot v$  representa o módulo do vetor P, ou quantidade de movimento,  $h$  é a constante de Planck, e ' $\lambda$ ', o comprimento de onda. Observando-se a fórmula verifica-se facilmente que, à medida que a massa ou sua velocidade aumenta, diminui consideravelmente o comprimento de onda. Os corpos macroscópicos têm associada uma onda, porém a massa é tão grande que se pode afirmar que apresenta um comprimento de onda desprezível, porém não nula. Por isso, na hora de falar sobre partículas é muito importante considerar a dualidade, já que o comprimento de onda que possuem explica muitos de seus fenômenos.

## Efeito túnel

---

**Nota:** Se procura o fenômeno parapsíquico, consulte Experiência de quase-morte.

**Efeito túnel**, em mecânica quântica, consiste no evento de uma partícula atravessar uma região em que a energia potencial é maior do que a sua energia total - esta barreira é intransponível na mecânica clássica, pois a energia cinética da partícula seria negativa na região<sup>[1] [2]</sup>

### Efeito túnel, Tunelamento ou penetração de barreira

O **tunelamento quântico** ou **efeito túnel** ocorre quando uma onda encontra no seu percurso um obstáculo, a intensidade ou amplitude desta não termina imediatamente no obstáculo, mas decresce exponencialmente após o contato.

De acordo com a mecânica clássica, quando um elétron com uma certa energia  $E$  incide sobre uma barreira de potencial com energia  $P$  (sendo  $P>E$ ), ele é totalmente refletido. A mesma situação, agora abordada pela mecânica quântica, mostra que há uma probabilidade de que o Elétron "atravesse" barreira, aparecendo do outro lado. Este efeito pode ser observado experimentalmente e é o princípio de tecnologias tais como os diodos túnel, os transistores de efeito de campo e os microscópios de varredura por sonda, onde os elétrons "tunelam" da superfície até a ponta microscópica do equipamento, sem que estas se toquem. A razão para que este efeito ocorra é que o Elétron, do ponto de vista quântico, pode manifestar o comportamento tanto de partícula como de onda. Nesta abordagem o elétron é descrito como uma onda de matéria. Comportando-se como uma onda, podemos atribuir ao elétron uma probabilidade de reflexão e uma probabilidade de transmissão: que o elétron seja refletido ou transmitido pela barreira de potencial. A probabilidade de transmissão é extremamente sensível à amplitude do potencial e à largura da barreira. Assim, mesmo sem conter energia suficiente para atravessar a barreira, o elétron a atravessa por "tunelamento", comportando-se como onda.

Uma experiência simples deste princípio envolve um LASER e dois prismas de vidro. Este prisma pode ser usado como refletor no ar ou no vácuo, já que o ângulo de reflexão total (ângulo mínimo em relação a normal onde a luz é completamente refletida) é menor que 45 graus. Assim, quando a luz incide por uma das faces perpendiculares do prisma, esta é completamente refletida e sai pela outra face.

Quando utilizamos o LASER, e um pouco de fumaça numa sala escura, é fácil verificar isso, assim como o fato de nenhuma luz escapar pela face inclinada do prisma. No entanto, aproximando-se a face inclinada de outro prisma, nota-se que, bem próximo, antes de se tocarem, uma parte do LASER emerge do outro prisma, comprovando o efeito túnel.

## História

O físico japonês Leo Esaki descobriu o tunelamento de elétrons, o que lhe rendeu o Premio Nobel de Física do ano de 1973.

## Ver Também

[1] Barrier Penetration (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/barr.html>), *site* hyperphysics.phy-astr.gsu.edu

[2] Evidence Of Macroscopic Quantum Tunneling Detected In Nanowires (<http://www.sciencedaily.com/releases/2009/05/090527130836.htm>), *site* www.sciencedaily.com

# Entrelaçamento quântico

---

O **entrelaçamento quântico** ou **emaranhamento quântico** é um fenômeno da mecânica quântica que permite que **dois** ou mais objetos estejam de alguma forma tão ligados que um objeto não possa ser corretamente descrito sem que a sua contra-parte seja mencionada - mesmo que os objetos possam estar espacialmente separados. Isso leva a correlações muito fortes entre as propriedades físicas observáveis dos diversos sub-sistemas.

Essas fortes correlações fazem com que as medidas realizadas num sistema pareçam estar a influenciar instantaneamente outros sistemas que estão emaranhados com ele, e sugerem que alguma influência estaria a propagar-se instantaneamente entre os sistemas, apesar da separação entre eles. Mas o emaranhamento quântico não permite a transmissão de informação a uma velocidade superior à da velocidade da luz, porque nenhuma informação útil pode ser transmitida desse modo. Só é possível a transmissão de informação usando um conjunto de estados emaranhados em conjugação com um canal de informação clássico - aquilo a que se chama o teletransporte quântico.

O emaranhamento quântico é a base para tecnologias emergentes, tais como computação quântica, criptografia quântica e tem sido usado para experiências como o teletransporte quântico. Ao mesmo tempo, isto produz alguns dos aspectos teóricos e filosóficos mais perturbadores da teoria, já que as correlações previstas pela mecânica quântica são inconsistentes com o princípio intuitivo do realismo local, que diz que cada partícula deve ter um estado bem definido, sem que seja necessário fazer referência a outros sistemas distantes. Os diferentes enfoques sobre o que está a acontecer no processo do entrelaçamento quântico dão origem a diferentes interpretações da mecânica quântica.

# Equação de Dirac

Na mecânica quântica, **equação de Dirac** é uma equação de onda relativística proposta por Paul Dirac em 1928 que descreve com sucesso partículas elementares de spin-1/2, como o elétron. Anteriormente, a equação de Klein-Gordon (uma equação de segunda ordem nas derivadas temporais e espaciais) foi proposta para a mesma função, mas apresentou severos problemas na definição de densidade de probabilidade. A equação de Dirac é uma equação de primeira ordem, o que eliminou este tipo de problema. Além disso, a equação de Dirac introduziu teoricamente o conceito de antipartícula, confirmado experimentalmente pela descoberta em 1932 do pósitron, e mostrou que spin poderia ser deduzido facilmente da equação, ao invés de postulado. Contudo, a equação de Dirac não é perfeitamente compatível com a teoria da relatividade, pois não prevê a criação e destruição de partículas, algo que apenas uma teoria quântica de campos poderia tratar.

A equação propriamente dita é dada por:

$$\left( \alpha_0 m c^2 + \sum_{j=1}^3 \alpha_j p_j c \right) \psi(\mathbf{x}, t) = i \hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(\mathbf{x}, t),$$

na qual  $m$  é a massa de repouso do elétron,  $c$  é a velocidade da luz,  $p$  é o operador momentum linear  $\hbar$  é a constante de Planck dividida por  $2\pi$ ,  $\mathbf{x}$  e  $t$  são as coordenadas de espaço e tempo e  $\psi(\mathbf{x}, t)$  é uma função de onda com quatro componentes.

Cada  $\alpha$  é um operador linear que se aplica à função de onda. Escritos como matrizes 4x4, são conhecidos como **matrizes de Dirac**. Uma das escolhas possíveis de matrizes é a seguinte:

$$\alpha_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \alpha_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\alpha_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & i & 0 \\ 0 & -i & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \alpha_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

# Equação de Klein–Gordon

A **equação de Klein–Gordon** (também chamada de **Klein–Fock–Gordon** ou *Klein–Gordon–Fock*) é a versão relativista da equação de Schrödinger.

É a equação de movimento de um campo escalar ou pseudo-escalar quântico. Este campo descreve partículas sem spin. Esta equação não corresponde a uma densidade de probabilidade definida positiva e além disso é de segunda ordem na derivada temporal, o que impede uma interpretação física simples. Ela descreve uma partícula pontual que se propaga nos dois sentidos temporais e a sua interpretação é possível recorrendo à teoria de antipartículas desenvolvida por Feynman e Stueckelberg. Todas soluções da equação de Dirac são soluções da equação de Klein-Gordon, mas o inverso é falso.

## A equação

A equação de Klein–Gordon em unidades SI tem a forma

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi - \nabla^2 \psi + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \psi = 0.$$

mas utiliza-se mais frequentemente a descrição em unidades naturais:

$$-\partial_t^2 \psi + \nabla^2 \psi = m^2 \psi$$

A sua forma é obtida exigindo que as soluções de ondas planas:

$$\psi = e^{-i\omega t + ik \cdot x} = e^{ik_\mu x^\mu}$$

obedeçam à relação entre a energia e o momento linear da relatividade restrita:

$$-p_\mu p^\mu = E^2 - P^2 = \omega^2 - k^2 = -k_\mu k^\mu = m^2$$

Ao contrário da equação de Schrödinger, esta equação tem dois valores para  $\omega$  para cada  $k$ , um positivo e outro negativo. Esta equação descreve uma função de onda relativista apenas se as partes com frequência positiva e negativa forem separadas.

## História

A equação foi nomeada em honra dos físicos Oskar Klein e Walter Gordon, que a propuseram no ano de 1927 para descrever electrões relativistas. No entanto, foi mais tarde descoberto que os electrões são partículas com spin e correctamente descritos pela equação de Dirac. A equação de Klein Gordon descreve correctamente partículas escalares como o pião.

# Equação de Pauli

A **equação de Pauli**, também conhecida como Equação Schrödinger-Pauli, é uma formulação da Equação de Schrödinger para um spin-partícula que leva em consideração a interação da rotação de uma partícula com o campo eletromagnético. Essas situações são os casos não-relativísticos da Equação de Dirac, onde as partículas em questão tem uma velocidade muito baixa para que os efeitos da relatividade tenham importância, podendo ser ignorados.

A equação de Pauli foi formulada por Wolfgang Pauli no ano de 1927.

## Detalhes

A equação de Pauli é mostrada como:

$$\left[ \frac{1}{2m} (\vec{\sigma} \cdot (\vec{p} - q\vec{A}))^2 + q\phi \right] |\psi\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle$$

Onde:

- $m$  é a massa da partícula.
- $q$  é a carga da partícula.
- $\vec{\sigma}$  é um vetor de três componentes do dois-por-dois das matrizes de Pauli. Isto significa que cada componente do vetor é uma matriz de Pauli.
- $\vec{p}$  é o vetor de três componentes da dinâmica dos operadores. Os componentes desses vetores são:  $-i\hbar \frac{\partial}{\partial x_n}$
- $\vec{A}$  é o vetor de três componentes do potencial magnético.
- $\phi$  é o potencial escalar elétrico.
- $|\psi\rangle$  são os dois componentes spinor da onda, podem ser representados como  $\begin{pmatrix} \psi_0 \\ \psi_1 \end{pmatrix}$ .

De forma mais precisa, a equação de Pauli é:

Mostra que o espaço Hamiltoniano (a expressão entre parênteses ao quadrado) é uma matriz operador dois-por-dois, por conta das matrizes  $\sigma$  de Pauli.

# Equação de Schrödinger

---

Em Física, a **Equação de Schrödinger**, proposta pelo físico austríaco Erwin Schrödinger em 1925, descreve a evolução temporal de um estado quântico de um sistema físico. Essa equação tem uma importância capital na teoria da mecânica quântica, e seu papel é similar ao da segunda Lei de Newton na Mecânica Clássica.

Pela formulação matemática da mecânica quântica, todo sistema é associado a um espaço de Hilbert complexo, tal que cada estado instantâneo do sistema é descrito por um vetor unitário nesse espaço. Este vetor de estados guarda as probabilidades para os resultados de todas as possíveis medições aplicadas ao sistema. Em geral, o estado de um sistema varia no tempo e o vetor de estados é uma função do tempo. A equação de Schrödinger provê uma descrição quantitativa da taxa de variação deste vetor.

Usando a notação de Dirac, o vetor de estados é dado, num tempo  $t$  por  $|\psi(t)\rangle$ . A equação de Schrödinger é:

$$H(t) |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$$

Nas equações,  $i$  é o número imaginário,  $\hbar$  é a constante de Planck dividida por  $2\pi$  e o Hamiltoniano  $H(t)$  é um operador auto-adjunto atuando no vetor de estados. O Hamiltoniano representa a energia total do sistema. Assim como a força na segunda Lei de Newton, ele não é definido pela equação e deve ser determinado pelas propriedades físicas do sistema.

## Veja também

- Mecânica Quântica
- Gato de Schrödinger
- Nobel de Física



# Estado quântico

---

Um **estado quântico** é qualquer estado possível em que um sistema mecânico quântico possa se encontrar. Um estado quântico plenamente especificado pode ser descrito por um vetor de estado, por uma função de onda ou por um conjunto completo de números quânticos para um dado sistema.

Ao estado quântico de menor energia possível dá-se o nome de estado quântico fundamental.

## Experimento de Davisson–Germer

---

O **experimento de Davisson–Germer** foi um experimento físico conduzido pelos físicos americanos Clinton Davisson e Lester Germer em 1927, que confirmou a hipótese de de Broglie. A hipótese de de Broglie dizia que as partículas de matéria (tais como os elétrons) possuem propriedades ondulatórias. Esta demonstração da dualidade onda-partícula foi importante historicamente no estabelecimento da mecânica quântica e da equação de Schrödinger.

### História

Em 1924 Louis de Broglie apresentou sua tese com respeito da onda-partícula, propondo a ideia de que toda matéria apresentava propriedades a dualidade onda-partícula dos fótons.<sup>[1]</sup> De acordo com de Broglie, para toda matéria  $e$  para radiação, a energia  $E$  das partículas era relacionada com a frequência de sua onda associada  $\nu$ , a partir da relação de Planck relation]]

$$E = h\nu$$

e que o momentum de partícula  $p$  era relacionada ao seu comprimento de onda  $\lambda$  pelo qual é atualmente conhecido como relação de de Broglie

$$p = \frac{h}{\lambda},$$

onde  $h$  é a constante de Planck.

Em 1926, após o conhecimento dos resultados preliminares de Davisson and Germer, Walter Elsasser observou que a natureza ondulatória da matéria poderia ser investigada por experimentos de espalhamento de elétrons em sólidos cristalinos, como, assim como a natureza ondulatória do raio X foi confirmada através dos experimentos de espalhamento de raio X em sólidos cristalinos.<sup>[1] [2]</sup>

Em 1927, no Bell Labs, Clinton Davisson e Lester Germer lançaram elétrons lentos em um alvo de níquel cristalino.<sup>[3]</sup> A dependência angular da intensidade dos elétrons refletidos foi medida, e foi verificada que há algum padrão de difração semelhante àqueles previstos por Bragg para os raios X. Esse experimento foi replicado por George Paget Thomson.<sup>[1]</sup>

O experimento confirmou a hipótese de de Broglie, na qual a matéria pode apresentar propriedade ondulatória. Isto, em combinação com o experimento de Arthur Compton, estabeleceu a hipótese da dualidade onda-partícula, que é um passo fundamental na teoria quântica.

[1] R. Eisberg, R. Resnick. *Quantum Physics: of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*. 2nd ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1985.

[2] H. Rubin. *Biographical Memoirs* ([http://www.nap.edu/openbook.php?record\\_id=4990&page=103](http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=4990&page=103)). [S.l.]: National Academy Press, 1995. vol. 68.

[3] C. Davisson, L.H. Germer (1927). "Reflection of electrons by a crystal of nickel". *Nature* **119**: 558–560. DOI: 10.1038/119558a0 (<http://dx.doi.org/10.1038/119558a0>).

## Ligações externas

- R. Nave. *Davisson–Germer Experiment* (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/davger2.html>). *HyperPhysics*. Georgia State University, Physics Department.

# Experimento de Stern-Gerlach

Na mecânica quântica, o **experimento de Stern-Gerlach**, nomeado em homenagem a Otto Stern e Walther Gerlach, é um experimento que foi realizado em 1922 que mostra a deflexão de partículas elementares, freqüentemente usado para ilustrar princípios básicos da mecânica quântica. Ele pode ser usado para mostrar que elétrons e átomos tem propriedades quânticas intrínsecas, e como medidas em mecânica quântica afetam o sistema que está sendo medido.

## Teoria básica e descrição

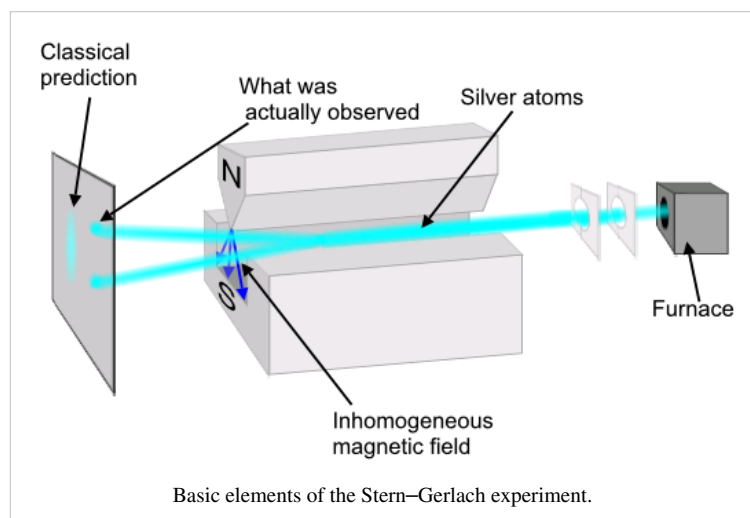
Otto Stern e Walther Gerlach planejaram um experimento para determinar se partículas tem algum momento angular intrínseco. Em um sistema clássico, como a Terra orbitando o sol, a Terra tem momento angular de sua órbita em torno do sol e da órbita em torno de seu eixo. O experimento procurou determinar se partículas individuais como elétrons tem algum momento angular de spin. Se o elétron é tratado como um dipolo clássico com duas metades de carga girando rapidamente, ele começará a pressionar um campo magnético, por causa do torque que o campo exerce sobre o dipolo.

Se a partícula viaja em um campo homogêneo, a força exercida em direções opostas do dipolo se cancelam e o movimento da partícula é inalterado. Se o experimento é conduzido usando elétrons, um campo elétrico de magnitude apropriada e orientado transverso ao caminho da partícula carregada é usado para compensar a tendência de qualquer partícula carregada entrar em movimento circular em seu caminho através de um campo magnético, e o fato de que elétrons são carregados pode ser ignorado. O experimento de Stern-Gerlach pode ser conduzido usando

partículas neutras e a mesma conclusão é obtida, uma vez que foi designado para testar momento angular, e não fenômenos eletrostáticos.

Se a partícula viaja através de um campo não homogêneo, então a força em um dipolo será ligeiramente maior que a força oposta no outro extremo. Isso faz com que a partícula seja deflexionada no campo magnético não homogêneo. A direção na qual as partículas são deflexionadas é tipicamente chamada de direção "z". Se as partículas são clássicas então a distribuição de seus vetores de spin para ser verdadeiramente aleatórios, cada partícula deve ser deflexionada por uma quantidade diferente, produzindo uma distribuição uniforme na tela do detector. As partículas que passam através do dispositivo são deflexionadas acima ou para baixo por uma quantidade específica. Isto significa que o momentum angular da rotação é quantizado, isto é pode somente fazer exame em valores discretos. Não há uma distribuição contínua de momenta angulares possíveis.

Elétrons são partículas de spin- $1/2$ . Eles tem apenas duas possibilidades de valores de spin, chamado spin-up e spin-down. O valor exato de seu spin é  $+\hbar/2$  ou  $-\hbar/2$ . Se estes valores crescem como resultado da rotação das partículas como um planeta gira, então as partículas individuais deve girar extremamente rápido. A velocidade de



rotação deve exceder a velocidade da luz, o que é impossível. Então, o momento angular de spin não tem nada a ver com a rotação é um fenômeno puramente quântico. Esse é o motivo pelo qual às vezes é conhecido como momentum angular intrínseco. Para elétrons, duas possibilidades de valores de spin existem, assim como para prótons e nêutrons, que são partículas compostas de 3 quarks cada, que são partículas de spin-1/2. Outras partículas podem ter diferentes números de possibilidades. Delta bárions ( $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$ ), por exemplo, são partículas de spin -3/2 e têm quatro possíveis valores para o momentum angular de spin. Vetores mésons, assim como fótons, W e Z bósons, e glúons são partículas spin -1 e têm três possíveis valores para o momentum angular de spin. Para descrever matematicamente o experimento com partículas de spin -1/2 é mais fácil usar a notação bra-ket de Dirac. Enquanto as partículas passam através do dispositivo de Stern-Gerlach, elas são observadas. O ato de observação na mecânica quântica é equivalente à medição. Nosso dispositivo de observação é um detector e neste caso nós podemos observar um dos dois valores possíveis, spin-up ou spin-down. Eles são descritos pelo número j, e a medição corresponde ao operador  $J_z$ . Em termos matemáticos,

$$|\psi\rangle = c_1 \left| \psi_{j=+\frac{\hbar}{2}} \right\rangle + c_2 \left| \psi_{j=-\frac{\hbar}{2}} \right\rangle$$

As constantes  $c_1$  e  $c_2$  são números complexos. A raiz quadrada de seus valores absolutos determina a probabilidade do estado  $|\psi\rangle$  ser encontrado com um dos dois valores possíveis para j. A constante também precisa ser normalizada para que a probabilidade de encontrar a função de onda em um de seus estados seja unitária. Aqui nós sabemos que a probabilidade de encontrar a partícula em cada estado é 0,5. Consequentemente nós também sabemos que os valores das constantes são

$$c_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$c_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

## Experimentos Seqüenciais

Se combinarmos alguns aparatos de Stern-Gerlach, podemos claramente ver que eles não agem como simples seletores, mas alteram os estados observados (como na polarização da luz), de acordo com as leis da mecânica quântica:

## Histórico

A experiência de Stern-Gerlach foi realizada em Frankfurt, Alemanha em 1922 por Otto Stern e Walther Gerlach. Nesse época Stern era um assistente de Max Born no Instituto de Física Teórica da Universidade de Frankfurt, e Gerlach eram um assistente da mesma Universidade no Instituto de Física Experimental.

Na época da experiência, o modelo que prevalecia para descrever o átomo era o modelo de Bohr, que descrevia elétrons circundando um núcleo carregado positivamente somente em determinadas órbitas ou níveis de energia atômicos discretos. Desde que o elétron foi quantizado, podendo estar somente em determinadas posições no espaço, a separação em órbitas distintas foi chamada de quantização espacial.



A plaque at the Frankfurt institute commemorating the experiment

## Impacto

A experiência de Stern-Gerlach teve um dos maiores impactos na física moderna:

- Na década que seguiu, cientistas mostraram, usando técnicas similares, que o núcleo de alguns átomos tem também o momentum angular quantizado. Isto é, a interação com o spin do elétron que é responsável pela estrutura hiperfina das linhas espectroscópicas.
- Nos anos 30, usando uma versão prolongada do instrumento de S-G, Isidor Rabi e colegas mostraram que usando um campo magnético variável, podemos forçar o momentum magnético para ir de um estado ao outro. Uma série de experiências culminou em 1937 na descoberta que as transições do estado poderiam ser induzidas usando campos variáveis no tempo ou campos de RF. A assim chamada Oscilação de Rabi é o mecanismo de trabalho para a Ressonância Magnética por Imagem, equipamento encontrado em hospitais.
- Mais tarde Norman F. Ramsey modificou o instrumento de Rabi para aumentar o tempo da interação com o campo. A extrema sensibilidade devido à frequência da radiação faz com que isso seja muito útil para manter o tempo exato, e é ainda usada hoje em relógios atômicos.
- No início dos anos 60, Ramsey e Daniel Kleppner usaram um sistema de Stern-Gerlach para produzir um feixe de hidrogênio polarizado como fonte da energia para o Maser de Hidrogênio, que é um dos mais populares relógios atômicos.
- A observação direta do spin é a prova mais direta da quantização na mecânica quântica.

## Experiência da dupla fenda

---

A **experiência da dupla fenda** ou **experiência de Thomas Young** é fundamental para a determinação da natureza quântica da física atômica.

Quando se tenta utilizar a eletrodinâmica e a mecânica clássica para explicar os fenômenos atômicos, os resultados a que chegamos se encontram em franca contradição com a experiência prática.

### Contradição

O que se vê com mais clareza é a contradição a que se chega ao aplicar a eletrodinâmica ordinária ao modelo de átomo em que os elétrons se movem em torno do núcleo seguindo órbitas clássicas.

Neste movimento, como em qualquer movimento acelerado das cargas, os elétrons deveriam irradiar continuamente ondas eletromagnéticas. Ao irradiar, os elétrons perderiam sua energia o que deveria conduzir no final a sua queda no núcleo atômico. Para tal, o átomo deveria ser obrigatoriamente instável.

### Difração dos elétrons

A profunda contradição entre a teoria e a prática experimental atesta a construção de uma teoria aplicável aos fenômenos atômicos. Os fenômenos que ocorrem com partículas de massa muito pequena e em regiões muito pequenas do espaço, exige um caminho especial onde as leis e as idéias clássicas fundamentais devem ser reordenadas.

O ponto de partida para esclarecer esta troca de mentalidade para a dedução das leis que regem a física atômica, foi o fenômeno observado e chamado de difração de elétrons.

Na verdade, este fenômeno foi descoberto depois de criada a teoria da mecânica quântica.

Se fizermos passar um feixe homogêneo de elétrons através de um prisma, o que se observa é uma figura constituída de máximos e mínimos de intensidade variável que se sucedem entre si, análoga à figura que se obtêm na difração das ondas eletromagnéticas.

## Ondulatória

O comportamento das partículas materiais, os elétrons, apresentam a peculiaridade comportamental dos processos ondulatórios.

A profundidade com que este fenômeno contradiz as idéias ordinárias sobre o movimento, se revela com particular evidência quando imaginamos o experimento que constitui uma idealização da difração eletrônica por um cristal.

Para verificarmos a validade da natureza quântica da física atômica, existe uma experiência bastante simples de ser realizada cujos resultados foram no mínimo intrigantes quando realizados pela primeira vez.

Esta experiência é a conhecida como dupla fenda.

## Dupla fenda

A experiência da dupla fenda consiste em deixar que a luz visível se difracte através de duas fendas, produzindo bandas num écran. As bandas formadas, ou padrões de interferência, mostram regiões claras e escuras que correspondem aos locais onde as ondas luminosas interferiram entre si construtivamente e destrutivamente.

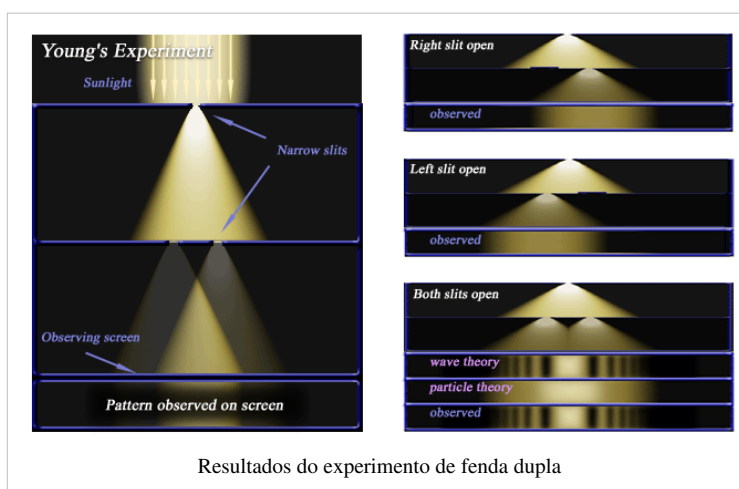
### Descrição da experiência

No caso da realização da experiência da dupla fenda com um feixe eletrônico, imaginemos uma tela opaca aos elétrons, e nela fazemos duas pequenas fendas. Observando o passar do feixe de elétrons por uma destas fendas, com a outra fechada, obtemos numa tela plana (ou écran) colocada atrás da fenda uma certa figura de distribuição das intensidades; da mesma maneira obtemos outra figura semelhante à primeira abrindo a segunda fenda e fechando a primeira.

Mas, observando a *imagem* que se faz dos elétrons passando pelas duas fendas abertas ao mesmo tempo, baseando-nos nas idéias ordinárias, deveríamos observar uma figura consistente onde houvesse a simples superposição dos feixes complementares. Ou seja, a soma natural dos dois feixes que se projetariam na tela, uma vez que cada elétron partícula material movendo-se em sua trajetória fixa e bem delineada passa pela fenda sem exercer influência alguma sobre os outros elétrons que passam pela outra fenda.

O fenômeno da difração eletrônica mostra que na realidade obtemos uma figura de difração que ocorre em virtude da interferência e não se reduz de modo algum à simples soma das figuras produzidas por cada uma das fendas separadamente.

Isso pode ser explicado simplesmente se for observado que em pontos mais distantes do lado direito da *figura* as ondas provenientes do "slit" direito chegam primeiro do que as ondas do "slit" esquerdo ocasionando um atraso no comprimento de onda original (que estavam exatamente sobre postos no ponto central entre os "slits") gerando uma destruição ou construção da luz.



Resultados do experimento de fenda dupla

## Diferenças de fase

Está claro que é impossível fazer coincidir este resultado com a idéia de movimento dos elétrons por uma trajetória. Pois a interferência que aparece é devido à somatória ora construtiva, ora destrutiva que indica diferenças de fase, isto é, neste caso, se há diferença de fase, então temos a natureza ondulatória dos elétrons que devem ser encarados, em analogia, como onda eletromagnética que se propaga pelo espaço e não como partícula material com movimento balístico, isto é disparada..

## Mecânica quântica e mecânica clássica

A experiência da dupla fenda prova inequivocamente a chamada mecânica quântica, ou ondulatória, que deve basear-se em noções essencialmente diferentes da mecânica clássica. Pois na quântica não existe o conceito de trajetória da partícula. Esta circunstância constitui o conteúdo do chamado princípio da incerteza, ou princípio da indeterminação, que é um dos fundamentais da mecânica quântica e foi descoberto em 1927 por Werner Heisenberg.

# Função de onda

---

**Função de onda** é uma ferramenta matemática que a física quântica usa para descrever um sistema físico qualquer.

## Problemas de nomenclatura

O termo **função de onda** segundo a mecânica quântica tem um significado bastante diferente dependendo do contexto, seja na física clássica, seja no eletromagnetismo clássico.

Por causa da relação concreta entre função de onda e localização de uma partícula num espaço de posições, muitos textos sobre mecânica quântica têm um enfoque "ondulatório". Assim, embora o termo "função de onda" seja usado como sinônimo "coloquial" para vetor de estado, não é recomendável, já que não só existem sistemas que não podem ser representados por funções de onda, mas também que o termo função de onda leva a imaginar erroneamente que há algum meio que ondula no sentido mecânico.

Na química, especialmente, um dos objetivos da função de onda de elétrons é descrever os chamados orbitais eletrônicos; com isso, aumenta ainda mais a confusão de termos que se referem a um mesmo conceito.

## Definição

O uso moderno do termo **função de onda** é para qualquer vetor ou função que descreva o estado de um sistema físico pela expansão em termos de outros estados do mesmo sistema. Normalmente, uma função de onda é:

- um vetor complexo com finitos componentes:

$$\vec{\psi} = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix},$$

- um vetor complexo com infinitos componentes:

$$\vec{\psi} = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \\ \vdots \end{bmatrix},$$

- ou uma função complexa de uma ou mais variáveis,

$$\psi(x_1, \dots, x_n).$$

Em todos os casos, a função de onda provê uma descrição completa do sistema físico ao qual está associado. Porém, deve-se frisar que uma função de onda não é unicamente determinada pelo sistema ao qual está associada, já que muitas funções de onda diferentes podem descrever o mesmo cenário físico.

## Interpretação

A interpretação física da função de onda depende do contexto. Veja alguns exemplos a seguir:

Uma partícula em uma dimensão espacial

A função de onda espacial associada a uma partícula em uma dimensão é uma função complexa  $\psi(x)$  definida no conjunto dos números reais. O quadrado complexo da função de onda,  $|\psi|^2$ , é interpretado como a densidade de probabilidade associada à posição da partícula e, por isso, a probabilidade de a medição da posição da partícula dar um valor no intervalo  $[a, b]$  é

$$\int_a^b |\psi(x)|^2 dx .$$

Isto leva à condição de normalização

$$N^2 \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx = 1 .$$

já que a medição da posição de uma partícula deve resultar em um número real.

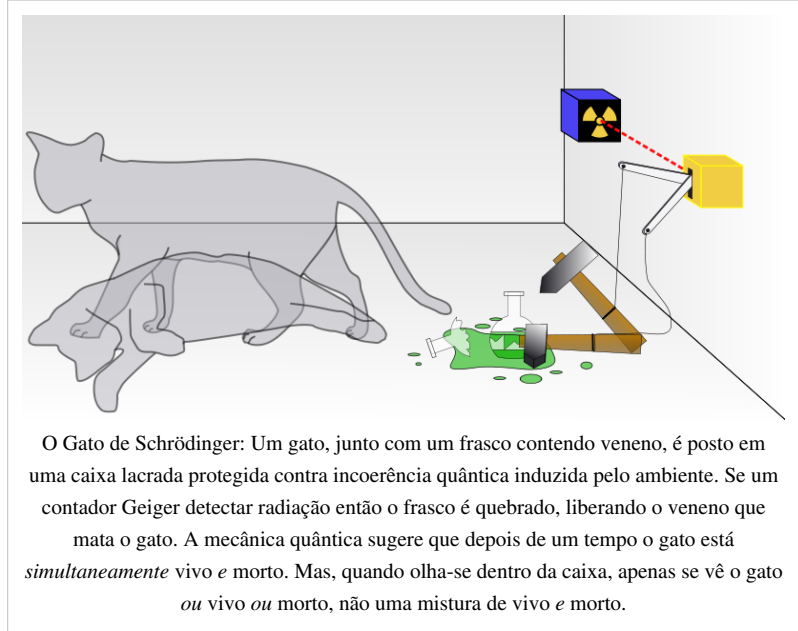
## Significado filosófico da função de onda

A função de onda é a descrição mais completa possível de um sistema regido pela mecânica quântica. Se na mecânica clássica a descrição completa de um sistema consistia na tarefa de encontrar a posição e a velocidade de todas as partículas e, com esta descrição, ser possível prever todos os movimentos futuros e passados do sistema, na mecânica quântica não se pode descrever todas as grandezas desejadas com a mesma certeza (ver Princípio da incerteza de Heisenberg). De acordo com a mecânica quântica, a descrição do sistema termina ao nível da função de onda, com suas probabilidades de posição.

Por isso, depois do nascimento da mecânica quântica, a ciência alcançou um patamar que encerra o contraste entre o determinismo e o indeterminismo e, sob os auspícios da ciência contemporânea, temos a função de onda, que está na fronteira entre o determinismo e o indeterminismo.

# Gato de Schrödinger

O **Gato de Schrödinger** é um experimento mental, frequentemente descrito como um paradoxo, desenvolvido pelo físico austríaco Erwin Schrödinger em 1935. Isso ilustra o que ele observou como o problema da interpretação de Copenhague da mecânica quântica sendo aplicado a objetos do dia-a-dia, no exemplo de um gato que pode estar vivo ou morto, dependendo de um evento aleatório precedente. No curso desse experimento, ele criou o termo **Verschränkung** (entrelaçamento).



## Origem e motivação

O experimento mental de Schrödinger foi proposto como discussão do artigo EPR, nomeado devido aos seus autores: Albert Einstein, Podolsky, Rosen em 1935.<sup>[1]</sup> O paradoxo EPR esclareceu a estranha natureza das superposições quânticas. Amplamente exposto, a superposição quântica é a combinação de todos os possíveis estados do sistema (por exemplo, as possíveis posições de uma partícula subatômica). A interpretação de Copenhague implica que a superposição apenas sofre colapso em um estado definido no exato momento da medição quântica.

Schrödinger e Einstein trocaram cartas sobre o artigo EPR de Einstein, durante o qual Einstein indicou que a superposição quântica de um barril instável de pólvora irá, após um tempo, conter ambos componentes explodidos e não-explodidos.

Para melhor ilustrar o paradigma incompleto da mecânica quântica, Schrödinger aplicou a teoria da mecânica quântica em uma entidade viva que podia ou não estar consciente. No experimento mental original de Schrödinger ele descreveu como um poderia, em princípio, transformar a superposição dentro de um átomo para uma superposição em grande escala de um gato morto e vivo por relacionar gato e átomo com a ajuda de um "mecanismo diabólico". Ele propôs um cenário com um gato em uma caixa lacrada, onde a vida ou morte do gato é dependente do estado de uma partícula subatômica. De acordo com Schrödinger, a interpretação de Copenhague implica que o gato permanece vivo e morto até que a caixa seja aberta.

Schrödinger *não* desejava promover a ideia de gatos vivos-e-mortos como uma séria possibilidade; o experimento mental serve para ilustrar a bizarrice da mecânica quântica e da matemática necessária para descrever os estados quânticos. Entendida como uma crítica da interpretação de Copenhague – a teoria prevalecente em 1935 – o experimento mental do gato de Schrödinger permanece um tópico padrão para todas as interpretações da mecânica quântica; a maneira como cada interpretação lida com o gato de Schrödinger é frequentemente usada como meio de ilustrar e comparar características particulares de cada interpretação, seus pontos fortes e fracos.



## O experimento mental

Schrödinger escreveu:

“ Qualquer um pode mesmo montar casos bem ridículos. Um gato é preso em uma câmara de aço, enquanto com o dispositivo seguinte (o qual deve estar seguro contra interferência direta do gato): em um contador Geiger tem uma pequena quantidade de substância radioativa, tão pequena, que talvez durante o período de uma hora, um dos átomos decaia, mas também, com a mesma probabilidade, talvez nenhum; se isso acontecer, o tubo do contador descarrega e através de um relé libera um martelo que quebra um pequeno frasco de ácido cianídrico. Se algum deles tiver saído do seu sistema natural por uma hora, alguém pode concluir que o gato permanece vivo enquanto o átomo não tiver decaído. A função-psi do sistema poderia ser expresso por ter dentro dele o gato morto-vivo (com o perdão da palavra) misturada ou dividido em partes iguais.

É típico desses casos que uma indeterminação originalmente restrita ao domínio atômico tenha sido transformada em uma indeterminação macroscópica, o qual pode então ser resolvido por observação direta. Isso nos previne de aceitar tão inocentemente como válido um "modelo confuso" para representar a realidade. Por ele mesmo ele não explicaria qualquer coisa imprecisa ou contraditória. Existe uma diferença entre uma fotografia tremida ou desfocada e uma foto de nuvens e neblina.

”  
—  
[2]

O texto acima é a tradução de dois parágrafos do artigo original bem mais extenso, o qual aparece na revista alemã *Naturwissenschaften* ("Ciências Naturais") em 1935.<sup>[3]</sup>

A famosa experiência mental de Schrödinger coloca a questão: *quando* o sistema quântico para de ser uma mistura de estados e se torna ou um ou o outro? (Mais tecnicamente, quando o atual estado quântico para de ser uma combinação linear de estados, cada um dos quais se parece com estados clássicos diferentes, e em vez disso começa a ter apenas uma clássica descrição?) Se o gato sobreviver, isso lembra que ele está apenas vivo. Mas as explicações das experiências EPR que são consistentes com a mecânica quântica microscópica padrão requer que objetos macroscópicos, como gatos e cadernos, não podem ter sempre apenas uma descrição clássica. O propósito da experiência mental é para ilustrar esse aparente paradoxo: nossa intuição diz que nenhum observador pode estar em uma mistura de estados, mesmo que eles sejam gatos, por exemplo, eles não podem estar em tal mistura. É necessário que os gatos sejam observadores, ou sua existência em um estado clássico simples e bem definido exige outro observador externo? Cada alternativa pareceu absurda para Albert Einstein, que estava impressionado pela habilidade do experimento mental para esclarecer esses problemas; em uma carta à Schrödinger datada de 1950 ele escreveu:

“ Você é o único físico contemporâneo, além de Laue, que vê o que ninguém consegue sobre a assunção da realidade – se pelo menos alguém estiver sendo honesto. A maioria deles simplesmente não vê o tipo de jogo arriscado que eles estão jogando com a realidade – a realidade é algo independente do que já foi experimentalmente visto. A interpretação deles é, entretanto, refutada mais elegantemente pelo seu sistema de átomo radioativo + amplificador + carga de pólvora + gato em uma caixa, no qual a função-psi do sistema contém ambos gato vivo e explodido em pedaços. Ninguém realmente duvida que a presença ou ausência do gato é algo independente do ato de observação.

”  
—  
[4]

Note que nenhuma carga de pólvora é mencionada no esquema de Schrödinger, que usa um contador Geiger como amplificador e cianeto no lugar de pólvora; a pólvora foi apenas mencionada na sugestão original de Einstein para Schrödinger 15 anos antes.

## Interpretação de Copenhague

Na interpretação de Copenhague na mecânica quântica, um sistema para a superposição de estados se torna um ou outro quando uma observação acontece. Essa experiência torna aparente o fato de que a natureza da medição, ou observação, não é bem definida nessa interpretação. Alguns interpretam a experiência, enquanto a caixa estiver fechada, como um sistema onde simultaneamente existe uma superposição de estados "núcleo decaído/gato morto" e "núcleo não-decaído/gato vivo", e apenas quando a caixa é aberta e uma observação é feita é que, então, a função de onda colapsa em um dos dois estados. Mais intuitivamente, alguns pensam que a "observação" é feita quando a partícula do núcleo atinge o detector. Essa linha de pensamento pode ser desenvolvida pela teoria de colapso objetiva. Por outro lado, a interpretação de muitos mundos nega que esse colapso sequer ocorra.

Steven Weinberg disse:

“ Toda essa história familiar é verdade, mas ela deixa uma ironia. A versão de Bohr da mecânica quântica estava profundamente cheia de falhas, mas não pela razão que Einstein pensa. A interpretação de Copenhague descreve o que acontece quando um observador realize uma medição, mas o observador e o ato de medição são ambos tratados classicamente. Isso é totalmente errado: Físicos e seus aparatos devem ser comandados pelas mesmas regras da mecânica quântica que comandam todo o universo. Mas essas regras são expressas em termos de uma função de onda (ou, mais precisamente, um vetor de estado) que evolui de um jeito perfeitamente determinístico. Então de onde as regras probabilísticas da interpretação de Copenhague vêm? ”

[5]

Um progresso considerável tem sido feito nos últimos anos em direção a resolução do problema, o qual eu não irei entrar em detalhes aqui. É suficiente que se diga que nem Bôhr nem Einstein se concentraram no problema verdadeiro da mecânica quântica. As regras de Copenhague claramente funcionam, mas elas tem que ser aceitas. Mas isso deixa a tarefa de explicá-las aplicando a equação determinística para a evolução da função de onda, a Equação de Schrödinger, tanto para o observador quanto para os aparatos.

## A interpretação de muitos mundos de Everett & Histórias consistentes

Na interpretação de muitos mundos da mecânica quântica, a qual não isola a observação como um processo especial, ambos estados vivo e morto do gato persistem, mas são incoerentes entre si. Nos outros mundos, quando a caixa é aberta, a parte do universo contendo o observador e o gato são separados em dois universos distintos, um contendo um observador olhando para um gato morto, outro contendo um observador vendo a caixa com o gato vivo. Como os estados vivo e morto do gato são incoerentes, não têm comunicação efetiva ou interação entre eles. Quando um observador abre a caixa, ele se entrelaça com o gato, então, as opiniões dos observadores do gato sobre ele estar vivo ou morto são formadas e cada um deles não tem interação com o outro. O mesmo mecanismo de incoerência quântica é também importante para a interpretação em termos das Histórias consistentes. Apenas "gato morto" ou "gato vivo" pode ser parte de uma história consistente nessa interpretação.

Roger Penrose criticou isso:

“ Eu desejo tornar isso claro, que o que está sendo debatido está longe de resolver o paradoxo do gato. Até agora não há nada no formalismo da mecânica quântica que necessita que um estado de consciência não possa envolver a percepção simultânea de um gato morto-vivo. ”

[6]

Embora a visão mais aceita (sem necessariamente endossar os Vários-Mundos) é que a incoerência é o mecanismo que proíbe tal percepção simultânea.<sup>[7] [8]</sup>

Uma variante da experiência do Gato de Schrödinger conhecida como máquina de suicídio quântico foi proposta pelo cosmologista Max Tegmark. Ele examinou a experiência do Gato de Schrödinger do ponto de vista do gato, e argumentou que essa teoria pode ser distinta entre a interpretação de Copenhague e a de muitos mundos.

## Interpretação conjunta

A interpretação conjunta afirma que superposições não são nada mas subconjuntos de um grande conjunto estatístico. Sendo esse o caso, o vetor estado não se aplicaria individualmente ao experimento do gato, mas apenas às estatísticas de muitos experimentos semelhantes. Os proponentes dessa interpretação afirmam que isso faz o paradoxo do Gato de Schrödinger um problema trivial não resolvido.

Indo por esta interpretação, ela descarta a idéia que um simples sistema físico tem uma descrição matemática que corresponde a isso de qualquer jeito.

## Teorias de colapso objetivas

De acordo com as teorias de colapso objetivo, superposições são destruídas espontaneamente (independente de observação externa) quando algum princípio físico objetivo (de tempo, massa, temperatura, irreversibilidade etc) é alcançado. Assim, espera-se que o gato tenha sido estabelecido em um estado definido muito tempo antes da caixa ser aberto. Isso poderia vagamente ser dito como "o gato se observa", ou "o ambiente observa o gato".

Teorias do colapso objetivo requerem uma modificação da mecânica quântica padrão, para permitir superposições de serem destruídas pelo processo de evolução no tempo.

Em teoria, como cada estado é determinado pelo estado imediatamente anterior, e este pelo anterior, *ad infinitum*, a pré-determinação para cada estado teria sido determinada instantaneamente pelo "princípio" inicial do Big Bang. Assim o estado do gato vivo ou morto não é determinada pelo observador, ele já foi pré-determinado pelos momentos iniciais do universo e pelos estados subsequentes que sucessivamente levaram ao estado referenciado no experimento mental.

## Aplicações práticas

O experimento é puramente teórico, e o esquema proposto jamais poderá ser construído. Efeitos análogos, entretanto, tem algum uso prático em computação quântica e criptografia quântica. É possível enviar luz em uma superposição de estados através de um cabo de fibra óptica. Colocando um grampo no meio do cabo que intercepta e retransmite, a transmissão irá quebrar a função de onda (na interpretação de Copenhague, "realizar uma observação") e irá provocar que a luz caia em um estado ou em outro. Por testes estatísticos realizados na luz recebida na outra ponta do cabo, o observador pode saber se ele permanece na superposição de estados ou se ele já foi observado e retransmitido. Em princípio, isso permite o desenvolvimento dos sistemas de comunicação que não possam ser grampeados sem que o grampo seja notado na outra ponta. O experimento pode ser citado para ilustrar que a "observação" na interpretação de Copenhague não tem nada a ver com percepção (a não ser em uma versão do Panpsiquismo onde é verdade), e que um grampo perfeitamente imperceptível irá provocar que as estatísticas no fim do cabo sejam diferentes.

Em computação quântica, a frase "cat state" (Estado do gato) frequentemente refere-se ao emaranhamento dos qubits onde os qubits estão em uma superposição simultânea de todos sendo 0 e todos sendo 1, ou seja,  $|00\dots0\rangle + |11\dots1\rangle$ .

## Extensões

Embora a discussão desse experimento mental fala sobre *dois* possíveis estados (gato vivo e gato morto), na realidade teria um *número enorme* de estados possíveis, pois a temperatura e grau e estado de decomposição do gato iria depender em exatamente quando e como, assim como se, o mecanismo foi acionado, assim como o estado do gato imediatamente antes da morte.

Em outra extensão, físicos foram tão longe como sugerir que astrônomos observando matéria escura no universo durante 1998 poderiam ter "reduzido sua expectativa de vida" através de um cenário de pseudo-Gato de Schrödinger, embora esse seja um ponto de vista controverso.<sup>[9] [10]</sup>

Outra variação do experimento é do Amigo de Wigner, no qual tem dois observadores externos, o primeiro que abre e inspeciona a caixa e quem então comunica suas observações a um segundo observador. O problema aqui é, a função de onda entra em colapso quando o primeiro observador abre a caixa, ou apenas quando o segundo observador é informado das observações do primeiro observador?

## Ver também

- Problema da medição quântica
- Função de base
- Experiência da dupla fenda
- Interpretações da mecânica quântica
- Efeito Zeno quântico
- Problema de Elitzur-Vaidman
- Amigo de Wigner
- Suicídio e Imortalidade quântica
- Schroedinbug

- [1] (em inglês) Artigo EPR: Pode a descrição da mecânica quântica da realidade física ser considerada completa? ([http://prola.aps.org/abstract/PR/v47/i10/p777\\_1](http://prola.aps.org/abstract/PR/v47/i10/p777_1))
- [2] (em inglês) Schrödinger: "A situação atual da Mecânica Quântica" (<http://www.tu-harburg.de/rzt/rzt/it/QM/cat.html#sect5>)
- [3] (em alemão) Schrödinger, Erwin (1935). "Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik (A situação Atual da Mecânica Quântica)". *Naturwissenschaften*.
- [4] (em inglês) Link para a carta de Einstein (<http://www.jstor.org/pss/687649>)
- [5] (em inglês) Weinberg, Steven (2005). "Os enganos de Einstein". *Physics Today* **58**: 31. DOI: 10.1063/1.2155755 (<http://dx.doi.org/10.1063/1.2155755>).
- [6] (em inglês) Penrose, R. *The Road to Reality* (A estrada para a realidade), pág. 807.
- [7] (em inglês) Wojciech H. Zurek, Incoerência, *einselection* (Seleção induzida pelo ambiente), e as origens quânticas do clássico, *Reviews of Modern Physics* (Críticas à Física Moderna) 2003, 75, págs. 71-75 ou (<http://arxiv.org/abs/quant-ph/0105127>)
- [8] (em inglês) Wojciech H. Zurek, Incoerência e a transição da quântica para a clássica, *Physics Today* (Física Hoje), 44, págs. 36-44 (1991)
- [9] Highfield, Roger (2007-11-21). *Mankind 'shortening the universe's life'* (<http://www.telegraph.co.uk/earth/main.jhtml?xml=/earth/2007/11/21/scicosmos121.xml&CMP=ILC-mostviewedbox>). The Daily Telegraph. Página visitada em 25/11/2007.
- [10] Chown, Marcus (2007-11-22). *Has observing the universe hastened its end?* (<http://www.newscientist.com/channel/fundamentals/mg19626313.800-has-observing-the-universe-hastened-its-end.html>). New Scientist. Página visitada em 25/11/2007.

## Ligações externas

- (em inglês) A situação atual da Mecânica Quântica por Erwin Schrödinger (<http://www.tu-harburg.de/rzt/rzt/it/QM/cat.html>)

# Gravitação quântica

**Gravidade Quântica** é o campo da física teórica que busca unificar a teoria da mecânica quântica, a qual descreve três das forças fundamentais, com a relatividade geral, a teoria da quarta força fundamental: gravidade. O desafio final de alguns é um arcabouço unificado de todas as forças fundamentais — uma teoria do tudo.

Muito da dificuldade em se fundir estas teorias origina-se das hipóteses radicalmente diferentes que estas teorias utilizam para explicar como nosso universo funciona. Enquanto a teoria de campo quântico baseia-se em campo de partículas embutidas no espaço-tempo da relatividade restrita, a **relatividade geral** modela a gravidade como uma curvatura no espaço-tempo que afeta o movimento das massas.

O caminho mais óbvio para combinar estas duas (que é tratar a gravidade como simplesmente outro campo de partícula) conduz rapidamente para aquilo que conhecemos como problema da renormalização. Partículas de gravidade devem atrair-se mutuamente, somando juntas todas as interações, resultando em muitos valores infinitos os quais não podem ser facilmente cancelados sem ajuste sensível. Isto contrasta com a eletrodinâmica quântica onde algumas vezes se atinge resultados infinitos, mas estes, por serem bem poucos, podem ser removidos via renormalização.

Ambas, mecânica quântica e relatividade geral tem sido altamente bem sucedidas. Infelizmente, a energia e as condições na qual a **gravitação quântica** se torna importante são inacessíveis aos experimentos laboratoriais atuais. O resultado disto é que não há dados observacionais que possam prover qualquer auxílio para combinar as duas <sup>[1]</sup>.

A abordagem geral tomada na geração de uma **teoria quântica da gravidade** é assumir que o a teoria em questão será simples e elegante e então procurar nas teorias atuais por simetrias e dicas de como combiná-las em uma teoria mais abrangente. Um problema com esta abordagem é que não sabemos se a resultante será uma teoria simples e elegante. No entanto, tal teoria se faz necessária no sentido de compreender problemas onde estão envolvidas uma combinação de grandes massas e energias com dimensões espaciais muito reduzidas, tais como o comportamento de buracos negros, e a origem do universo.

## Perspectiva histórica

Historicamente, tem havido duas reações à aparente inconsistência da teoria quântica com a necessária independência-básica da teoria da relatividade geral. A primeira é que *a interpretação geométrica da relatividade geral não é fundamental, mas surge qualitativamente de alguma teoria mais primordial*. Isto é explicitado, por exemplo, no livro-texto clássico de Steven Weinberg *Gravitation and Cosmology*. Um ponto de vista oposto é que *a independência-fundo é fundamental*, e que *a mecânica quântica necessita ser generalizada por parâmetros onde não foi especificado, a priori, o tempo*. O ponto de vista geométrico está exposto no texto clássico *Gravitation*, de Misner, Wheeler e Thorne.

Os dois livros, editados por gigantes da física teórica, expressam visões completamente opostas do significado da gravitação. Foram publicados quase simultaneamente no início de 1970. A razão foi que um impasse tinha sido alcançado, uma situação que levou Richard Feynman (que por si mesmo tinha feito importantes tentativas para compreender a gravitação quântica) a escrever, em desespero, "*Lembre-me de não voltar a mais nenhuma conferência de gravitação*" em uma carta para sua esposa no início de 1960.

Progressos foram alcançados nas duas frentes, conduzindo, em 2004, à teoria das cordas por um lado, e por outro lado à gravitação quântica em loop.

## A incompatibilidade entre mecânica quântica e relatividade geral

Harmonizar a teoria da relatividade geral, que descreve a gravitação e suas aplicações em estruturas de larga-escala (estrelas, planetas e galáxias) com a mecânica quântica, que descreve as outras três forças fundamentais atuando em escala microscópica é, atualmente, um dos maiores problemas da física teórica.

Uma lição fundamental da relatividade geral é que não existe um referencial preferencial para o espaço-tempo, como exposto na mecânica Newtoniana e na relatividade restrita, ou seja, *a geometria do espaço-tempo é dinâmica*. Apesar da fácil aceitação em princípio, esta idéia é de difícil compreensão no que tange à relatividade geral, e suas conseqüências são profundas, mas não totalmente exploradas, mesmo ao nível clássico.

Em um certo sentido, a **relatividade geral** pode ser vista como uma **teoria relacional**, na qual a única informação física relevante é a relação entre diferentes eventos no espaço-tempo.

Por outro lado, a mecânica quântica possui uma dependência desde sua concepção de estrutura (não-dinâmica) de fundo. No caso da mecânica quântica, o tempo é dinâmico e não determinado, como na mecânica clássica newtoniana. Na teoria quântica de campo relativística, tal como em uma teoria clássica de campo, o espaço-tempo Minkowski é fixado no arcabouço da teoria.

A teoria das cordas, foi concebida como uma generalização da teoria quântica de campo onde, ao invés de partículas pontuais, objetos parecidos com cordas propagam-se num arcabouço de espaço-tempo fixo. Embora a teoria das cordas tenha origem no estudo do confinamento de quark e não da gravitação quântica, foi logo descoberto que o seu espectro contem o graviton, e que a "condensação" de certos modos vibracionais da corda é equivalente à modificação do arcabouço original.

A **Teoria quântica de campo (não-Minkowskian) curvado**, embora não seja uma **teoria quântica da gravidade**, tem mostrado que algumas hipóteses da teoria quântica não podem ser consideradas sob **espaço-tempo curvo**. Em particular, mesmo a noção quântica de vácuo depende do caminho que o observador segue através do espaço-tempo (veja efeito Unruh). Também, o conceito de **campo** parece ser mais fundamental que o conceito de **partícula** (o qual surge como um meio conveniente para descrever interações localizadas). Este caminho, contudo, não é livre de controvérsia, sendo contrário à forma como a teoria quântica de campo foi desenvolvida por Steven Weinberg no livro *Quantum Field Theory*.

A **gravitação quântica de loop** é fruto de um esforço para formular uma teoria quântica independente do arcabouço. A teoria quântica de campo topológica fornece um exemplo de teoria quântica independente do arcabouço, mas com nenhum **grau de liberdade local**, e somente com finitos **graus de liberdade globais**. Isto é inadequado para descrever a gravidade em 3+1 dimensões, na qual mesmo no vácuo têm-se graus de liberdade locais de acordo com a relatividade geral. Em 2+1 dimensões, contudo, a **gravidade** é uma **teoria de campo topológica** que teve sua quantização bem sucedida de várias maneiras, incluindo redes de spin.

Há três outros **pontos de tensão** entre a mecânica quântica e a relatividade geral.

**Primeiro**, a relatividade geral prediz uma quebra de paradigma nas singularidades, e a mecânica quântica se tornaria inconsistente nas vizinhanças das singularidades.

**Segundo**, não está claro como determinar o campo gravitacional de uma partícula se, em relação ao princípio da incerteza de Heisenberg da mecânica quântica, a localização e velocidade não podem ser conhecidas com precisão absoluta.

**Terceiro**, há uma tensão, mas não uma contradição lógica, entre a violação da desigualdade de Bell na mecânica quântica, a qual indica uma influência **superluminal**, e a velocidade da luz como uma velocidade limite na relatividade. A resolução destes dois primeiros pontos deve vir de uma melhor compreensão da relatividade geral [2].

[1] A ausência de dados observacionais impede que a proposta da gravitação quântica seja dita uma "teoria científica", pelo menos em acepção moderna, ao rigor do termo, portanto. Entretanto a história nos mostra que nem sempre os fatos que levam à proposição ou evolução de uma teoria precedem as idéias que ela encerrara ou encerrará quando corroborada. A saber, os mais importantes fatos que corroboram as propostas

da relatividade de Einstein foram obtidos posteriormente à divulgação de suas ideias, sendo a elaboração destas impelidas em verdade por inconsistências entre duas teorias já consolidadas à época, a mecânica clássica e o eletromagnetismo. Entretanto a ressalva é implacável: sem fatos que corroborem as ideias propostas, a "teoria" não pode ser dita uma teoria científica.

[2] <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0506506>

## Teorias

Há inúmeras propostas de teoria de gravitação quântica:

- Teoria das cordas
- Supergravitação
- AdS/CFT
- Equação Wheeler-deWitt
- Gravitação quântica de Loop de Ashtekar, Smolin e Rovelli
- Gravitação quântica Euclidiana
- Geometria não comutativa de Alain Connes
- Teoria Twistor de Roger Penrose
- Gravitação quântica discreta de Lorentzian
- Gravitação induzida Sakharov
- Calculo Regge
- Métrica acústica e outros modelos análogos de gravitação
- Processos Físicos
- **Teoria do campo unificado**

## Ver também

- Evento Centauro
- Teoria-M
- Gravitação semiclassical
- Teoria de campo quântico no espaço tempo curvo
- Processo Físico
- Uma nova idéia, a gravidade gerada pelos átomos. (<http://rolfguthmann.sites.uol.com.br/>)
- Grávitons

## Na cultura popular

A famosa parodia do pós-modernismo por Alan Sokal (veja Sokal Affair) foi intitulada *Transgressing the Boundaries: Toward a Transformative Hermeneutics of Quantum Gravity*.

## Ligações externas

- The shape of things to come (<http://www.newscientist.com/article.ns?id=mg18725101.800>) New Scientist, 30 de Julho 2005
- Conceito de Massa na Mecânica Relacional e na Relatividade Geral- A. K. T. Assis- Instituto de Física - Unicamp ([http://www.ufrn.br/sites/producao\\_ct/sec7\\_10.html](http://www.ufrn.br/sites/producao_ct/sec7_10.html))

## Histórias consistentes

Na mecânica quântica, a abordagem **histórias consistentes** pretende ser uma moderna interpretação da mecânica quântica, geralmente a interpretação de Copenhague tida como a mais convencional, provendo uma interpretação natural da cosmologia quântica. Alguns acreditam que esta interpretação deriva do trabalho apresentado por Hugh Everett sendo uma versão moderna da interpretação de muitos mundos. Outros discordam profundamente disto. A teoria se baseia no critério de consistência que então permitiria a história de um sistema possa ser descrito pelas probabilidades de cada história, que obedecem as leis da probabilidade clássica, enquanto preserva a consistência com a equação de Schrödinger.

De acordo com esta a interpretação da mecânica quântica, o propósito da teoria da mecânica quântica é prever a probabilidade de várias histórias alternativas. Uma história é definida como uma seqüência (produto) dos operadores de projeção em diferentes instantes no tempo:

$$H_i = T \prod_{j=1}^{n_i} P_{i,j}(t_{i,j})$$

O símbolo  $T$  indica que os fatores no produto são ordenados cronologicamente de acordo como os valores de  $t_{i,j}$ : os operadores "passados" com menores valores de  $t$  aparecem no lado direito, e os do operadores "futuros" com os maiores valores de  $t$  aparecem do lado esquerdo.

Estas projeções de operadores podem corresponder a qual conjunto de problemas que incluam todas que tratem de todas as possibilidades. Exemplificando, este poderiam ser o significado de 3 projeções: "o elétron atravessou a fenda da esquerda", "o elétron atravessou a fenda da direita" e "o elétron não passou por nenhuma das fendas". Um dos objetivos desta teoria é mostrar que questões clássicas tais como "onde está meu carro" são consistentes. Nestes casos deve-se usar um grande número de conjuntos de projeções, cada uma especificando a localização do carro em alguma pequena região do espaço.

Uma história é uma seqüência destas questões, ou matematicamente o produto do correspondente operador de projeção. As leis da mecânica quântica são para prever as probabilidades das histórias individuais, dadas condições iniciais conhecidas.

Finalmente, das histórias são requeridas sua consistência, isto é:

$$\text{Tr}(H_i \rho H_j^\dagger) = 0$$

para  $i, j$  diferentes. Onde  $\rho$  representa a matriz de densidade inicial, e o operador foi expresso na figura Heisenberg. A necessidade de consistência permite postular que a probabilidade da história  $H_i$  é simplesmente

$$\text{Pr}(H_i) = \text{Tr}(H_i \rho H_i^\dagger)$$

a qual garante que a probabilidade do "A ou B" é igual à probabilidade de "A" mais a probabilidade de "B" menos a probabilidade de "A e B", e assim por diante. A interpretação baseada em histórias consistentes é usada em combinação com a visão do entrelaçamento quântico. O entrelaçamento quântico implica que somente determinadas escolhas das histórias são coerentes, e permitem um cálculo quantitativo da fronteira entre o domínio clássico e o quântico.

Em algumas interpretações baseadas em histórias consistentes não muda em nada em relação ao paradigma da interpretação de Copenhague que somente as probabilidades calculadas da mecânica quântica e a função onda têm um significado físico. De forma a obter uma teoria completa, as regras formais acima devem ser suplementadas com um espaço Hilbertiano particular e leis que governem a dinâmica do sistema, pro exemplo um Hamiltoniana.

Na opinião de outros, ainda não foi feita uma teoria completa, portanto nenhuma previsão é possível a respeito de qual conjunto de histórias consistentes irá sempre ocorrer. Estas regras das histórias consistentes, o espaço Hilbertiano e o Hamiltoniano devem ser suplementados por um conjunto selecionado de leis.



Os propositores desta moderna interpretação, tais como Murray Gell-Mann, James Hartle, Roland Omnès, Robert B. Griffiths, e Wojciech Zurek argumentam que esta interpretação esclarece as desvantagens fundamentais da velha interpretação de Copenhague, e pode ser usado como um modelo interpretacional para a mecânica quântica.

### Ver também

- Interpretações da mecânica quântica

### Referência

- R. Omnès, *Understanding Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1999. O capítulo 13 descreve histórias consistentes.

## Integração funcional

---

Em física matemática, **integração funcional** é uma integração de funcionais sobre espaços de funções. Muito importante na análise funcional, a **integral funcional** pode ser representada como:

$$\int \mathcal{D}\phi A[\phi].$$

A integral funcional, contudo, não é rigorosamente bem definida sempre. Na maioria das vezes, apenas há sentido em calcular razões entre as integrais. Outra questão é que apenas se sabe calcular um tipo de integral funcional: a integral gaussiana.

### Ver também

- Análise funcional;
- Derivação funcional;
- Integral gaussiana;
- Teoria estatística de campos;
- Funcional.

# Interpretação de Bohm

David Bohm, aluno de Robert Oppenheimer e contemporâneo de Albert Einstein em Princeton, após publicar seu *Teoria Quântica*, elogiado por Einstein como a mais clara explicação que lera sobre o tema, reinterpretou a física quântica de forma divergente da Interpretação de Copenhagen.

A **interpretação de Bohm** generaliza a teoria da onda piloto de Louis de Broglie de 1927, a qual apresenta que ambos: onda e partícula são reais. A função de onda evolui de acordo com a equação de Schrödinger e de algum modo 'guia' a partícula. Isto assumindo um simples, e não dividido universo (diferente da interpretação de muitos mundos) e é determinística (diferente da interpretação de Copenhagen). Isto quer dizer que o estado do universo evolui suavemente através do tempo, sem o colapso da função de onda quando a medição ocorre, como na interpretação de Copenhagen. Contudo, deve-se assumir a existência de um grande número de variáveis ocultas, as quais nunca podem ser diretamente mensuradas.

## Equação de Schroedinger

Inicialmente, Bohm dividiu a equação de Schroedinger em duas partes. A primeira era uma recapitulação da física newtoniana clássica, e a segunda um campo informativo semelhante a ondas. A **equação de Schroedinger** define o movimento do elétron, e indica respostas para questões sobre o comportamento e a natureza do elétron.

Contrariamente a Niels Bohr (complementaridade onda-partícula) e à escola de Copenhagen, Bohm postulou que o elétron se comporta como uma partícula clássica comum, mas tendo acesso à informação sobre o resto do universo. Bohm denominou o segundo termo de potencial quântico, um campo informativo funcional que fornece ao elétron informações sobre o resto do universo físico. Demonstrou que a influência desse **potencial quântico** dependia apenas da forma, e não da magnitude desse tipo de função de onda, sendo portanto, independente da separação no espaço: todo ponto no espaço contribui com informação para o elétron.

Esta explicação para o comportamento do elétron tem relação com o conceito de holomovimento e com as **ordens implícita e explícita** que o compõem.

## Fundamentação Matemática

Na equação de Schrödinger

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\mathbf{r}, t) + V(\mathbf{r})\psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t},$$

onde a função de onda  $\psi(\mathbf{r}, t)$  é uma função complexa da posição  $\mathbf{r}$  e tempo  $t$ , a densidade probabilidade  $\rho(\mathbf{r}, t)$  é uma função real definida por

$$\rho(\mathbf{r}, t) = R(\mathbf{r}, t)^2 = |\psi(\mathbf{r}, t)|^2 = \psi^*(\mathbf{r}, t)\psi(\mathbf{r}, t).$$

Sem perda de generalidade, nos podemos expressar a função de onda  $\psi$  em termos da densidade de probabilidade real  $\rho = |\psi|^2$  e uma função de fase da variável real  $S$  que são ambas também funções de posição e tempo

$$\psi = \sqrt{\rho} e^{iS/\hbar}.$$

Quando fazemos isto, a equação de Schrödinger separa-se em duas equações,

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \rho \frac{\nabla S}{m} \right) \quad (1)$$

$$-\frac{\partial S}{\partial t} = V + \frac{1}{2m} (\nabla S)^2 + Q \quad (2)$$

com

$$Q = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 \sqrt{\rho}}{\sqrt{\rho}} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\nabla^2 \rho}{2\rho} - \left( \frac{\nabla \rho}{2\rho} \right)^2 \right).$$

Se identificarmos o momento como  $\mathbf{p} = \nabla S$  e a energia como  $E = -\partial S/\partial t$ , então (1) é simplesmente a equação de continuidade tendo a probabilidade de

$$\mathbf{j} = \rho \mathbf{v} = \rho \frac{\mathbf{p}}{m} = \rho \frac{\nabla S}{m},$$

e (2) estabelece que energia total é a soma da energia potencial, energia cinética, e um termo adicional  $Q$ , que pode ser chamado de potencial quântico. Não é por acaso que  $S$  possua a unidade e típico nome *variável de ação*.

A partícula é vista como tendo uma posição definida, com uma distribuição de probabilidade  $\rho$  que pode ser calculada da função de onda  $\psi$ . A função de onda "guia" a partícula por meio do potencial quântico  $Q$ . Muito deste formalismo foi desenvolvido por Louis de Broglie, Bohm estendeu o caso de uma simples partícula para a o de várias partículas e reinterpretou as equações. Elas também foram estendidas para incluir o spin, embora a extensão para condições relativísticas não tenha sido bem sucedida.

## Comentários

A interpretação de Bohm não é muito popular entre os físicos por inúmeras razões científicas e sociológicas que poderiam fazer parte de um fascinante porém longo estudo, mas podemos ao menos dizer onde é considerada menos elegante por alguns (ela foi considerada como "superestrutura desnecessária" mesmo por Einstein que sonhava com um substituto determinístico para a interpretação de Copenhague).

Presumivelmente a Einstein, e outros, não agradavam a não localidade da maioria das interpretações da mecânica quântica, como ele tentou mostrar sua incompletude no Paradoxo EPR. A teoria de Bohm é de forma inevitável não local, o que conta como um golpe contra ela; mas isto é menos importante agora, pois nos últimos tempos a não localidade vem se tornando mais convincente devido a verificação experimental da Desigualdade de Bell. Porém, a teoria vem sendo usado por outros como base de inumeros livros tais como *Dancing Wu-li Masters*, o qual tem por objetivo ligar a física moderna a religiões orientais. Isto, como também os vários amigos filosóficos padrões de Bohm como J. Krishnamurti, devem ter levado alguns mais a desconsiderá-la.

A interpretação de Bohm versus Copenhague (ou quase Copenhague como definida por Von Neumann e Dirac) são diferentes em pontos cruciais: ontologia versus epistemologia; potencial quântico ou informação ativa versus usual partícula-onda e ondas de probabilidades; não localidade vs. localidade (deve-se notar que a mecânica quântica padrão é também não local, veja o paradoxo EPR); completude versus abordagem segmentária normal.

Em seu livro póstumo "*O universo não dividido*", Bohm tinha (com Hiley, e, certamente, em inúmeros outros papers) apresentou um elegante e completa descrição do mundo físico. Esta descrição é em muitos aspectos mais satisfatória antecessora, ao menos para Bohm e Hiley. De acordo com a interpretação de Copenhague, há uma esfera de realidade clássica, para objetos grandes e grandes números quânticos, e uma esfera quântica separada. Não há um único fragmento da teoria quântica na descrição do "mundo clássico" – diferentemente da situação encontrada na versão da mecânica quântica de Bohm. Estas diferenças afetam tão pouco nos resultados dos testes experimentais que não existes consenso se a interpretação de Copenhague, ou outra, poderá ser provada como inadequada; ou os resultados são tão vagos para serem interpretados de forma não ambígua. Os papers em questão são listados no final desta pagina, cujo o principal assunto são os efeitos quânticos, como predito por Bohm, são observados no mundo clássico – algumas vezes de forma impensável na versão dominante da interpretação de Copenhague.

A interpretação Bohmiana da Mecânica Quântica é caracterizada pela seguintes aspectos:

- É baseada nos conceitos da não localidade potencial quântico e informação ativa. Por um lado deve-se mencionar que a abordagem Bohmiana não é nova em relação a seu formalismo matemático, mas uma reinterpretarão da abordagem usual equação de Schrödinger (a qual sob certas aproximações é a mesma clássica equação Hamilton-Jacobi), a qual simplesmente, no processo de cálculo, adicionou-se um termo que foi interpretado por

Bohm como um potencial quântico e desenvolvido como uma nova visão da mecânica quântica. Então, Na interpretação de Bohm não é (como poderia sugerir o livro *The Undivided Universe*) a originalidade do formalismo matemático (que é a função de em uma forma central, e a equação de Schrodinger aplicada a ela) – mas uma interpretação que nega a características centrais da mecânica quântica: não existência do dualismo partícula onda (o elétron é uma partícula real guiada guiada por um campo potencial quântico real); nenhuma abordagem epistemológica (isto é, realidade quântica e ontologia).

- talvez o mais a parte mais interessante a respeito da abordagem de Bohm é o formalismo: ela dá uma nova versão para o micro mundo, não somente uma nova (apesar de radical) interpretação. Esta descreve um mundo onde conceitos como a casualidade, posição e trajetória têm um significado físico concreto. Colocando de lado as possíveis objeções com respeito a não localidade, o possível triunfo da visão de Bohm (por exemplo, não necessitar de nada parecido com Princípio da complementaridade) - deixa-nos com uma impressão de que Bohm talvez ofereça seja um novo paradigma e uma absolutamente arrojada versão reformulada da uma antiga e estabelecida mecânica quântica.
- Bohm enfatizou que experimento e experiência englobam um todo indivisível. Não há separação deste todo indivisível. O potencial quântico  $Q$  não assume o valor zero no infinito.

## Criticas

Os principais pontos de criticas, juntamente com as respostas dos que advogam a interpretação de Bohm, foram sumarizadas nos pontos que se seguem:

- a função de onda deve "desaparecer" depois do processo de medição, e este processo parece profundamente artificial no modelo de Bohm.

Resposta: A teoria de von Neumann da medição quântica combinada com a interpretação de Bohm explica físicos comportam-se como se a função de onda "desaparecesse", a despeito do fato que não há um "desaparecimento" verdadeiro.

- o artificialismo teórico escolhe variáveis privilegiadas: enquanto a mecânica quântica ortodoxa admite todas as variáveis do espaço de Hilbert que são tratados sempre de forma equivalente (muito parecido com as bases compostas de seus eigenvetores), A interpretação de Bohm's requer algumas variáveis tenha um conjunto de "privilégios" que são tratados classicamente – principalmente a posição. Não existe razão experimental para pensar que algumas variáveis são fundamentalmente diferentes de outras.

Resposta: Na física clássica, a posição é mais fundamental que outras variáveis. Portanto, não devia ser estranho que isto pudesse também ser verdadeiro na mecânica quântica também.

- O modelo Bohmiano é verdadeiramente não local: esta não localidade passível de violar a invariância de Lorentz; contradições com relatividade especial já eram esperadas; Estes fatos criam uma tarefa profundamente não trivial: reconciliar os atuais modelos da física de partículas, tais como teoria quântica de campo ou teoria das cordas, com alguns testes experimentais muito acurados da relatividade especial, sem algumas explicações adicionais. Por outro lado, outras interpretações da mecânica quântica – tais como Histórias consistentes ou interpretação de muitos mundos permite-nos explicar o teste experimental do entrelaçamento quântico sem qualquer utilização de não localidade.

Resposta: A teoria das cordas sugere uma teoria de campo quântico não comunicante, a qual também introduz não-localidades e violação da invariância de Lorentz. Portanto, na física moderna, não localidade e violação da invariância de Lorentz não são tratados como patologias, mas, ao invés disto, possibilidades interessantes. Além disto, em algumas versões da interpretação de Bohm, a não-localidade do potencial quântico é relativisticamente invariante na mesma medida que a função de onda é relativisticamente invariante, o que conduz a versões da interpretação de Bohm que respeitem a covariância de Lorentz.

- A interpretação Bohmiana tem problemas sutis para incorporar o spin e outros conceitos da física quântica: os eigenvalores do spin são discretos, e além disto contradiz a invariância rotacional ao menos que uma interpretação probabilística seja aceita

Resposta: Há variantes da interpretação de Bohm na qual este problema não aparece.

- A interpretação Bohmiana também parece incompatível com as modernas visões a respeito entrelaçamento que permite-nos calcular a "barreira" entre o "micro-mundo quântico" e o "macro-mundo clássico"; de acordo com o entrelaçamento, as variáveis que exibem comportamento clássico são determinadas dinamicamente, não por uma suposição.

Resposta: Quando a interpretação de Bohm e tratada juntamente com a teoria de von Neumann da medição quântica, nenhuma incompatibilidade com as visões a respeito do entrelaçamento permanecem. Pelo contrario, a interpretação de Bohm deve ser vista como uma complemento da teoria do entrelaçamento, porque ela prove respostas para questões que o entrelaçamento por si só não pode responder: Qual o motivo que leva o sistema a ser conduzido a um simples e definido valor da variável observada?

- a interpretação de Bohm não leva a novas predições mesuráveis, então isto não e realmente uma teoria científica.

Resposta: No domínio nos quais a interpretação convencional da mecânica quântica não são ambíguos, as predições da interpretação de Bohm são idênticos a aqueles da interpretação convencional. Porem, no domínio no qual a interpretação convencional é ambígua, tais como a questão do tempo observador e posição-observador em mecânica quântica relativística, a interpretação de Bohm conduz a predições mensuráveis novas e não ambíguas.

## Veja também

- David Bohm
- Holomovimento
- Interpretações da mecânica quântica
- Colapso da função de onda

## Ligações externas

- Bohmian Mechanics <sup>[1]</sup> - a persuasive defense of Bohm's interpretation by Sheldon Goldstein, Stanford Encyclopedia of Philosophy
- Bohmian Mechanics at the University of Innsbruck Institute for Theoretical Physics <sup>[2]</sup>
- A new theory of the relationship of mind and matter <sup>[3]</sup> - an article by David Bohm
- A Bohmian view on quantum decoherence <sup>[4]</sup> - quant-ph/0310096
- A Bohmian Interpretation for Noncommutative Scalar Field Theory and Quantum Mechanics <sup>[5]</sup> - hep-th/0304105
- Dynamical Origin of Quantum Probabilities <sup>[6]</sup> - quant-ph/0403034
- Bohmian mechanics is a "lost cause" <sup>[7]</sup> according to R. F. Streater
- Why isn't every physicist a Bohmian? <sup>[8]</sup> - quant-ph/0412119
- Relativistic quantum mechanics and the Bohmian interpretation <sup>[9]</sup> - quant-ph/0406173
- A survey of Bohmian Mechanics <sup>[10]</sup> - quant-ph/9504010

## Referências

- Holland, Peter R. *The Quantum Theory of Motion : An Account of the de Broglie-Bohm Causal Interpretation of Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge U. Press, 1993. ISBN 0521485436 . An Amazon reviewer claims this is clearer than Bohm's own:
- Bohm, David and B.J. Hiley. *The Undivided Universe: An ontological interpretation of quantum theory*. London: Routledge, 1993. ISBN 0-415-12185-X.
- Albert, David Z. "Bohm's Alternative to Quantum Mechanics", *Scientific American*, May, 1994.

For a start on comparing the various interpretations of quantum mechanics see

- Wheeler and Zurek, ed., *Quantum Theory and Measurement*, Princeton: Princeton University Press, 1984 or
- Jammer, Max. *The Philosophy of Quantum Mechanics*.

## Referências

- [1] <http://plato.stanford.edu/entries/qm-bohm/#qr>
- [2] <http://bohm-c705.uibk.ac.at/>
- [3] <http://members.aol.com/Mszlajak/BOHM.html>
- [4] <http://xxx.lanl.gov/abs/quant-ph/0310096>
- [5] <http://xxx.lanl.gov/abs/hep-th/0304105>
- [6] <http://xxx.lanl.gov/abs/quant-ph/0403034>
- [7] <http://www.mth.kcl.ac.uk/~streater/lostcauses.html#XI>
- [8] <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0412119>
- [9] <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0406173>
- [10] [http://arxiv.org/PS\\_cache/quant-ph/pdf/9504/9504010v1.pdf](http://arxiv.org/PS_cache/quant-ph/pdf/9504/9504010v1.pdf)

# Interpretação de Copenhaga

A **Interpretação de Copenhague** <sup>(português brasileiro)</sup> ou **Interpretação de Copenhaga** <sup>(português europeu)</sup> é a interpretação mais comum da Mecânica Quântica e foi desenvolvida por Niels Bohr e Werner Heisenberg que trabalhavam juntos em Copenhague em 1927. Pode ser condensada em três teses:

1. As previsões probabilísticas feitas pela mecânica quântica são irredutíveis no sentido em que não são um mero reflexo da falta de conhecimento de hipotéticas variáveis escondidas. No lançamento de dados, usamos probabilidades para prever o resultado porque não possuímos informação suficiente apesar de acreditarmos que o processo é determinístico. As probabilidades são utilizadas para completar o nosso conhecimento. A interpretação de Copenhague defende que em Mecânica Quântica, os resultados são indeterminísticos.
2. A Física é a ciência dos resultados de processos de medida. Não faz sentido especular para além daquilo que pode ser medido. A interpretação de Copenhague considera sem sentido perguntas como "onde estava a partícula antes de a sua posição ter sido medida?".
3. O ato de observar provoca o "colapso da função de onda", o que significa que, embora antes da medição o estado do sistema permitisse muitas possibilidades, apenas uma delas foi escolhida aleatoriamente pelo processo de medição, e a função de onda modifica-se instantaneamente para refletir essa escolha.

A complexidade da mecânica quântica (tese 1) foi atacada pela experiência (imaginária) de Einstein-Podolsky-Rosen, que pretendia mostrar que têm que existir variáveis escondidas para evitar "efeitos não locais e instantâneos à distância". A desigualdade de Bell sobre os resultados de uma tal experiência foi derivada do pressuposto de que existem variáveis escondidas e não existem "efeitos não-locais". Em 1982, Aspect levou a cabo a experiência e descobriu que a desigualdade de Bell era violada, rejeitando interpretações que postulavam variáveis escondidas e efeitos locais. Esta experiência foi alvo de várias críticas e novas experiências realizadas por Weihs e Rowe confirmaram os resultados de Aspect.

Muitos físicos e filósofos notáveis têm criticado a **Interpretação de Copenhague**, com base quer no fato de não ser determinista quer no fato de propor que a realidade é criada por um processo de observação não físico. As frase de Einstein "Deus não joga aos dados" e "Pensas mesmo que a Lua não está lá quando não estás a olhar para ela?" ilustram a posição dos críticos. A experiência do Gato de Schroedinger foi proposta para mostrar que a Interpretação de Copenhague é absurda. A alternativa principal à Interpretação de Copenhague é a Interpretação de Everett dos mundos paralelos.

- Physics FAQ section about Bell's inequality ([http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Quantum/bells\\_inequality.html](http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Quantum/bells_inequality.html))
- G. Weihs et al., Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 5039
- M. Rowe et al., Nature 409 (2001) 791.

## Ver também

- Interpretações da mecânica quântica

# Interpretação de muitos mundos

A **Interpretação de muitos mundos** (ou **IMM**) é uma interpretação da mecânica quântica que propõe a existência de múltiplos "universos paralelos". A IMM foi formulada inicialmente por Hugh Everett para a explicação de alguns processos não determinísticos (tais como medição) na mecânica quântica.

Embora varias versões de IMM tenham sido propostas desde o trabalho original de Everett, todas compartilham duas idéias chaves. A primeira delas é a existência de uma função estado para todo universo a qual obedece a equação de Schrödinger para todo tempo e para a qual não há processo de colapso da onda. A segunda idéia é que este estado universal é uma sobreposição quântica de vários, possivelmente infinitos, estados de idênticos universos paralelos não comunicantes.

As idéias da IMM originaram-se na tese de Ph. D. de Hugh Everett na Universidade de Princeton, mas a frase "muitos mundos" é devida a Bryce DeWitt, que posteriormente desenvolveu algumas das idéias presentes no trabalho original de Everett. A formulação de DeWitt tornou-se tão popular que muitos confundem-na com o trabalho original de Everett.

IMM é uma das muitas hipóteses multiverso na física e na filosofia.

## Muitos mundos e o problema da interpretação

Como outras interpretações da mecânica quântica, a interpretação de muitos mundos é motivada pelo comportamento que pode ser ilustrado pela experiência da dupla fenda. Quando partículas de luz (ou algo semelhante) são conduzidos através de uma dupla-fenda, uma explicação baseada no comportamento de onda para luz é necessária para identificar onde as partículas deverão ser observadas. Já quando as partículas são observadas, elas se mostram como partículas e não como ondas não localizadas. Pela interpretação de Copenhague da mecânica quântica é proposto um processo de "colapso" do comportamento de onda para o de partícula para explicar o fenômeno observado.

Na época em que John von Neumann escreveu seu famoso tratado *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* em 1932, o fenômeno do "colapso da função de onda" era acomodado em dentro da formulação matemática da mecânica quântica postulando-se que havia dois processos de transformação da função de onda:

1. A mudança descontínua e de natureza aleatória que é ocasionada pelo processo de observação.
2. A evolução no tempo de um sistema isolado que obedece a equação de Schrödinger, que é determinista.

O fenômeno do colapso da função de onda por (1) proposto pela interpretação Copenhague foi amplamente considerada como artificial e ad-hoc, e conseqüentemente uma interpretação alternativa na qual o comportamento da medição pudesse ser entendido a partir de um princípio físico mais fundamental era amplamente desejável.

A tese de doutorado de Everett tinha a intenção de prover uma interpretação alternativa. Everett propôs que para um sistema composto (por exemplo, aquele formado por uma partícula que interage com o aparato de medição), não pode-se associar um estado bem definido a um determinado subsistema. Isto levou a Everett sugerir a noção de *estado relativo* de um subsistema em relação a outro.

O formalismo de Everett para compreender o processo do colapso da função de onda como um resultado da observação é matematicamente equivalente a superposição de funções de onda. Everett deixou a pesquisa física logo após obter seu Ph.D, tendo como resultado que suas idéias foram desenvolvidas por outros pesquisadores.

## Visão Geral

Na formulação de Everett, um aparato de medição **M** e um sistema objeto **S** formam um sistema composto, cada parte do qual antes da medição existem em estados bem definidos (mas tempo-dependentes). A medição é tida como causadora da interação de **M** e **S**. Após **S** interagir com **M**, não é mais possível descrever ambos sistemas como estados independentes. De acordo com Everett, a única descrição possível de cada sistema são estados relativos: por exemplo o estado relativo de **S** dado o estado de **M** ou o estado relativo de **M** dado o estado de **S**. Na formulação de DeWitt, o estado de **S** após a medição é dado pela superposição quântica das histórias alternativas de **S**.

Por exemplo, considere o menor sistema quântico verdadeiro possível **S**, como mostrado na ilustração. Este descreve por exemplo, o estado-spin de um elétron. Considerando um eixo específico (digamos o eixo *z*) o pólo norte representando o spin "para cima" e o pólo sul, spin "para baixo". Os estados de superposição do sistema descrito pela (a superfície da) esfera, chamada de esfera de Bloch. Para se executar uma medição em **S**, deve-se interagi-lo com um outro sistema similar a **M**. Após esta interação, o sistema combinado é descrito por um estado que abrange um espaço de seis dimensões (o motivo para o número 6 é explicado no artigo sobre a esfera de Bloch). Este objeto de 6 dimensões pode também ser concebido a como uma superposição quântica de duas "histórias alternativas" do sistema original **S**, uma das quais "para cima" foi observada e a outra na qual o "para baixo" foi observado. Cada subsequente medição binária (que é uma interação com o sistema **M**) causa uma divisão similar na árvore da história. Portanto após três medições, o sistema pode se apresentar como a superposição quântica, o sistema pode ser representado inicialmente como uma superposição quântica de  $8 = 2 \times 2 \times 2$  cópias do sistema original **S**.

A terminologia aceita é de algum modo enganosa porque é incorreto considerar o universo esteja se dividindo um certo número de vez.

## Estado relativo

O objetivo do formalismo do estado-relativo, como originalmente proposto Everett em 1957 na sua dissertação de doutorado, foi interpretar o efeito da observação externa englobada inteiramente no arcabouço desenvolvido por Dirac, Von Neumann e outros, descartando totalmente o mecanismo ad-hoc de colapso da função de onda. Desde trabalho original de Everett, tem surgido alguns formalismos similares na literatura. Um destes será discutido na próxima seção.

Do formalismo do estado-relativo, nos podemos obter a interpretação do estado-relativo por duas suposições. A primeira é que a função de onda não é só uma simples descrição do estado do objeto, mas que ela é realmente inteiramente equivalente ao objeto, esta exigência foi muito comum em outras interpretações. A segunda e que o observador não possua uma condição especial, ao contrario da interpretação de Copenhague a qual considera o colapso da função de onda como um tipo especial de evento que ocorre como resultado da observação.

A interpretação de muitos mundos é reconstruída por DeWitt a partir de um formalismo de estado (e interpretação). Everett refere-se ao sistema (tal como o observador) como sendo dividido por uma observação, cada divisão



corresponde a um resultado possível de se obter pela observação. Estas divisões geram uma árvore de possibilidade como mostrada no gráfico abaixo. Subseqüentemente DeWitt introduziu o termo "mundo" para descrever uma história completa da medição de um observador, a qual corresponde a um caminho iniciado na raiz daquela árvore. Note que "divisão" neste sentido, é dificilmente novo ou inédito na mecânica quântica. A idéia de um espaço de histórias completamente alternativas já foi usada pela teoria da probabilidade desde meados de 1930, por exemplo, para o modelo do movimento Browniano. A inovação no ponto de vista DeWitt's foi que as várias histórias completamente alternativas podem se sobrepor para formar um novo estado.

No contexto da interpretação de muitos mundos, a equação de Schrödinger influencia todos os instantes e lugares. Uma observação ou medição de um objeto por um observador é modelada pela aplicação da equação de onda de Schrödinger a todo sistema englobando o observador e o objeto. Uma consequência é que cada observação pode ser tida como a causadora de divisão da função universal de onda na superposição quântica de dois ou mais ramos não comunicantes, ou "mundos". Desde muitos eventos semelhantes de observação estão constantemente acontecendo, há um enorme número de simultâneos estados de existência simultâneos.

Se um sistema é composto de dois ou mais subsistemas, o estado do sistema típico será uma superposição dos produtos dos estados dos subsistemas. Uma vez que os subsistemas interajam, seus estados não mais completamente independentes. Cada produto dos estados subsistema irão acabar envolvendo no decorrer do tempo o estado dos outros. Os subsistemas se tornaram entrelaçados e não será possível mais considerá-los como sendo independentes. O termo usado por Everett's para este entrelaçamento de subsistemas foi *estado relativo*, desde que cada subsistema deve ser agora considerado relativamente aos outros subsistemas como o qual ele tenha interagido.

## Propriedades comparativas e suporte experimental

Uma das características a se salientar da interpretação de muitos mundos é que o observador não requer de uma construção especial (tal como o colapso da função de onda) para ser explicada. Muitos físicos, por outro lado, não gostam da implicação de haver infinitos universos alternativos não observáveis.

Como desde 2002, não foram feitos experimentos práticos que para distinguir entre as interpretações de muitos mundos e Copenhague, e na ausência de dados amostrais, a escolha de uma delas é de caráter pessoal. Porém, uma das áreas de pesquisa e planejar experimentos os quais possam distinguir entre as várias interpretações da mecânica quântica, embora exista algum ceticismo se esta é mesmo uma questão importante a ser respondida. Realmente, pode ser argumentado que há uma equivalência matemática entre Copenhague (quando é expressa, por exemplo, como um conjunto de algoritmos para manipulação densidade de estado) e muitos mundos (o qual dá as mesmas respostas das de Copenhague usando uma visão matemática mais elaborada) o que parece mostrar que esta empreitada seja impossível. Porém, esta equivalência algorítmica não deve ser verdadeira em escala cosmológica. Foi proposto que em um mundo com infinitos universos alternativos, os universos que se colapsam existem por um tempo menor que os universos que se expandem, este fenômeno pode causar uma diferença detectável probabilidade entre as interpretações de muitos mundos e Copenhague.

Na interpretação de Copenhague, a matemática da mecânica quântica permite prever as probabilidades para a ocorrência de vários eventos. Na interpretação de muitos mundos, todos estes eventos ocorrem simultaneamente. O que se obtém por estes cálculos de probabilidade? E porque nos devemos observar, em nossa história, que eventos com alta probabilidade parecem ocorrer com mais freqüência? Uma das respostas para esta questão é dizer que há medição probabilidade no espaço de todos universos, onde um possível universo é uma árvore completa do universo de ramificação. Isto é o que realmente este cálculo produz. Então nos deveríamos esperar encontrar-nos mesmo em um universo com alta probabilidade do que em um de relativamente baixa probabilidade: mesmo que todas as saídas em um experimento ocorram, elas não ocorrem de igual maneira.

A interpretação de muitos mundos não deve ser confundida com a interpretação com a *muitas mentes* a qual postula que é somente a mente do observador que se divide ao invés de todo universo.

## Um exemplo simples

Vamos considerar formalmente o exemplo apresentado na introdução. Considere um par de partículas de spin 1/2, A e B, na qual nos unicamente consideraremos o spin observável (em particular sua mudança de posição). Como um sistema isolado, a partícula A é descrita por um Espaço de Hilbert de duas dimensões  $H_A$ ; similarmente a partícula B é descrita por um Espaço de Hilbert  $H_B$ . O sistema composto é descrito pelo produto tensor:

$$H_A \otimes H_B$$

o qual é de dimensão  $2 \times 2$ . Se A e B não estão interagindo, o conjunto de tensores puros

$$|\phi\rangle \otimes |\psi\rangle$$

é invariante no que se refere a evolução temporal; de fato, nos somente consideramos os observáveis do spin para os quais as partículas isoladas são invariantes, o tempo não terá efeito a priori na observação. Porém, após a interação, o estado do sistema composto é um possível estado de entrelaçamento quântico, o qual não é um tensor puro.

O estado de entrelaçamento mais geral é uma soma

$$\Phi = \sum_{\ell} |\phi_{\ell}\rangle \otimes |\psi_{\ell}\rangle$$

Para este estado corresponde um operador linear  $H_B \rightarrow H_A$  o qual aplica estados puros para estados puros.

$$T_{\Phi} = \sum_{\ell} |\phi_{\ell}\rangle \otimes \langle \psi_{\ell}|.$$

Esta aplicação (essencialmente numa normalização modular do estado) é o **aplicação do estado relativo** definido por Everett, como associado a um estado puro de B correspondente a estado relativo(puro) associado de A. Mais precisamente, há uma única decomposição polar de  $T_{\Phi}$  tal que

$$T_{\Phi} = US$$

e U é uma aplicação isométrica definido em algum sub-espço de  $H_B$ . Veja também decomposição de Schmidt.

Note que a matriz de densidade do sistema composto é pura. Porém, é também possível considerar a matriz densidade reduzida descrevendo a partícula A isolada tomando o traço parcial sobre os estados da partícula B. A matriz de densidade reduzida, ao contrario da matriz original descreve um estado misto. Este exemplo em particular é baseado no paradoxo EPR.

O exemplo anterior pode ser generalizado facilmente para sistemas arbitrários A, B sem nenhuma restrição na dimensão de espaço de Hilbert correspondente. Em geral, o estado relativo é uma aplicação linear isométrica definida no subespaço de  $H_B$  para valores em  $H_A$ .

## Traço Parcial e estado relativo

A transformação de um sistema quântico resultante do processo de medição, tal como na experiência de dupla fenda discutida acima, pode ser facilmente descrita matematicamente de uma forma que seja consistente a maioria dos formalismos matemáticos. Nos iremos apresentar uma destas descrições, também chamada de estado reduzido, baseada no conceito traço parcial, o qual pode ser processo pela interação, resume para um tipo de conhecimento *formalismo* muitos mundos. Isto então é um pequeno passo do formalismo de muitos mundos para a *interpretação* de muitos mundos.

Por definição, assumiremos que o sistema sempre é uma partícula tal como o elétron. A discussão do estado reduzido e muitos mundos não é diferente no caso que se nos considerarmos qualquer outro sistema físico, incluindo um "sistema observador". No que se segue, nos deveremos considerar não somente estados puros para o sistema, mas mais genericamente estados mistos; Estes são certamente operadores lineares no espaço Hilbertiano  $H$  descrevendo o sistema quântico. Sem duvida, como vários cenários medição apontados, o conjunto de estados puros não relacionados com a medição. Matematicamente, a matriz de densidade são misturas estatísticas de estados puros. Operacionalmente um estado misto pode ser identificado como a agrupamento estatístico resultante de um específico

procedimento preparação laboratorial.

### Estados Coerentes como estados relativos

Suponha que tenhamos um agrupamento de partículas tal que o estado  $S$  dele é puro. Isto significa que haverá um vetor unitário  $\psi$  em  $H$  tal que  $S$  é o operador dado em notação bra-ket pela fórmula seguinte:

$$S = |\psi\rangle\langle\psi|$$

Agora consideremos um experimento para determinar se a partícula deste agrupamento tem uma propriedade particular: Por exemplo, a propriedade poderia ser a localização da partícula em alguma região  $A$  do espaço. O experimento pode ser preparado para se comportar seja como uma medição de um observador ou seja como um filtro. Como uma medição, determinará que a variável  $\mathbf{Q}$  assume o valor 1 se a partícula se encontra em  $A$  e 0 no caso contrario. Como um filtro, ele deixará passar somente aquelas partículas que se encontram em  $A$  e impedindo a passagem das outras.

Matematicamente, uma propriedade é dada pela sua projeção auto-adjunta  $E$  no espaço de Hilbert  $H$ : Aplicando o filtro para um pacote de partículas, algumas delas serão rejeitadas, e outras passam. Agora será possível mostrar que uma operação de filtro ocasiona o "colapso" do estado puro como no seguinte exemplo: prepara-se um novo estado composto dado pelo operador densidade

$$S_1 = |E\psi\rangle\langle\psi E| + |F\psi\rangle\langle\psi F|$$

onde  $F = 1 - E$ .

Para ver isto, note que como um resultado da medição, o estado das partículas imediatamente apos a medição é um eigevector de  $\mathbf{Q}$ , que é um dos dois estados puros...

$$\frac{1}{\|E\psi\|^2}|E\psi\rangle \quad \text{or} \quad \frac{1}{\|F\psi\|^2}|F\psi\rangle.$$

com as respectivas probabilidades

$$\|E\psi\|^2 \quad \text{or} \quad \|F\psi\|^2.$$

A forma matemática da de apresentação deste estado combinado é pela utilização de combinação convexa de estados puros:

$$\|E\psi\|^2 \times \frac{1}{\|E\psi\|^2}|E\psi\rangle\langle E\psi| + \|F\psi\|^2 \times \frac{1}{\|F\psi\|^2}|F\psi\rangle\langle F\psi|,$$

na qual o operados  $S_1$  acima.

*Comentário.* O uso da palavra *colapso* neste contexto é de alguma maneira diferente daquela usada na explicação da interpretação de Copenhagen. Nesta discussão não nos referimos a colapso ou transformação da onda em nenhuma parte, mas particularmente da transformação de um estado puro em um estado misto.

As considerações precedente são completamente padrões da maioria dos formalismos da mecânica quântica. Agora considere um sistema "ramificado" o qual seguindo espaço de Hilbert é

$$\tilde{H} = H \otimes H_2 \cong H \oplus H$$

onde  $H_2$  é uma espaço de Hilbert bi-dimensional com vetores de base  $|0\rangle$  and  $|1\rangle$ . A ramificação no espaço pode ser entendida como um sistema composto constituído do sistema original (do qual agora é um subsistema) juntamente com um sistema não-interativo subordinado qbit simples. No sistema ramificado, considere o estado entrelaçado

$$\phi = |E\psi\rangle \otimes |0\rangle + |F\psi\rangle \otimes |1\rangle \in \tilde{H}$$

Nos podemos expressar este estado na matriz de densidade formatado como  $|\phi\rangle\langle\phi|$ . Multiplicando resulta em:

O traço parcial do estado misto foi obtido pela somatória dos coeficientes do operador de  $|0\rangle\langle 0|$  and  $|1\rangle\langle 1|$  na expressão acima. Isto resulta em estado misto em  $H$ . De fato, este estado misto é idêntico ao estado composto "pos

filtragem"  $S_1$  acima.

Sumarizando, nos temos descrição matemática do efeito do filtro para a partícula no estado puro  $\psi$  no seguinte caminho:

- O estado original é ampliado com sistema qubit subordinado.
- O estado puro do sistema original é substituído por um estado de entrelaçamento puro de um sistema subordinado e
- O estado pos-filtro do sistema é o traço parcial do estado entrelaçado para o estado subordinado.

### Ramificações múltiplas

No curso do tempo de vida do sistema nos esperaríamos que muitos eventos de filtragem ocorressem. A cada um destes eventos, uma ramificação ocorre. De forma que isto seja consistente com estrutura de ramificação como descrito na ilustração acima, nos deveremos mostrar que se um evento de filtragem ocorre em um dos caminhos do nodo raiz da árvore, então teremos que assumir que ele ocorrera em todas as ramificações. Isto mostra que a árvore é consideravelmente simétrica, que é para cada nodo  $n$  da árvore, a forma da árvore não muda pelo intercâmbio da sub-árvores imediatamente abaixo deste nodo  $n$ .

De forma a mostrar esta propriedade de uniformidade de ramificação, note que alguns cálculos resultam no mesmo se o estado original de  $S$  é composto. De fato, o estado pos-filtragem será o operador de densidade:

$$S_1 = ESE + FSF$$

O estado  $S_1$  é o caminho parcial de

Isto significa que cada medição subsequente (ou ramificação) ao longo de um destes caminhos da raiz da árvore para um nodo folha corresponde a uma ramificação homologa ao longo de cada caminho. Isto garante a simetria da árvore de muitos mundos em relação a rotação os nodos filhos de cada nodo.

### Operadores quânticos gerais

Nas duas seções anteriores, temos representado a operação de medição em sistemas quânticos em termos de estados relativos. De fato existe uma classe mais ampla de operadores que devem ser considerados: estes são conhecidos como operadores quânticos. Considerado as operações com operadores densidade no sistema de espaço Hilbertiano  $H$ , isto se dará da seguinte forma:

$$\gamma(S) = \sum_{i \in I} F_i S F_i^*$$

onde  $I$  é um conjunto finito ou indexado infinitamente comutável. Os operadores  $F_i$  são chamados de **operadores de Kraus**.

*Teorema.* Dado

$$\Phi(S) = \sum_{i,j} F_i S F_j^* \otimes |i\rangle\langle j|$$

Então

$$\gamma(S) = \text{Tr}_H(\Phi(S)).$$

Além disso, o mapeamento  $V$  definido por

$$V|\psi\rangle = \sum_{\ell} |F_{\ell}\psi\rangle \otimes |\ell\rangle$$

é tal como

$$\Phi(S) = V S V^*$$

Se  $\gamma$  é uma operador quântico que preserva o caminho, então  $V$  é um mapa linear isométrico

$$V : H \rightarrow H \otimes \ell^2(I) \cong H \oplus H \oplus \dots \oplus H$$

Onde a soma direta de Hilbert é feita sobre todas as cópias de  $H$  indexadas pelos elementos de  $I$ . Podemos considerar tais mapas  $\Phi$  como embutidos. Em particular:

**Corolário.** Qualquer operador quântico que preserve o caminho é a composição de uma isometria embutida e um caminho parcial.

Isto sugere que o formalismo de muitos mundos pode ser considerado para uma classe mais geral de transformações da mesma forma que foi feita para uma simples medição.

### Ramificação

Em geral, podemos mostrar a propriedade da ramificação uniforme da árvore como se segue: Se

$$\gamma(S) = \text{Tr}_H V S V^*$$

e

$$\delta(S) = \text{Tr}_H W S W^*,$$

onde

$$V|\psi\rangle = \sum_{\ell \in I} |F_\ell \psi\rangle \otimes |\ell\rangle$$

e

$$W|\phi\rangle = \sum_{i \in J} |G_i \phi\rangle \otimes |i\rangle$$

então um cálculo fácil mostra

Isto também demonstra que entre as medições propriamente ditas dos operadores quânticos (isto é, não-unitária), podemos interpolar uma arbitraria evolução unitária.

### Aceitação da interpretação de muitos mundos

Há uma ampla gama de pontos a serem considerados na interpretação de "muitos mundos". É freqüentemente salientado (veja a referência a Barret) que Everett por si mesmo não estava inteiramente consciente do que ela significava. Além disso, popularmente tem-se usado freqüentemente a interpretação de muitos mundos para justificar afirmações a respeito do relacionamento entre a consciência e o mundo material. Fora destas interpretações new-age, interpretações do tipo "muitos mundos" são consideradas suficientemente coerentes.

Por exemplo, um a votação entre 72 físicos de destaque conduzida pelo pesquisador Americano David Raub em 1995 e publicada em um periódico Francês *Sciences et Avenir* em Janeiro de 1998 registrou que aproximadamente 60% acreditam que a interpretação de muitos mundos seja verdadeira. Max Tegmark (veja referência para sua web page abaixo) também relata o resultado de uma pesquisa feita no Seminário de mecânica quântica de 1997. De acordo com Tegmark, "A interpretação de muitos mundo esta cotada em segundo lugar, confortavelmente a frente da histórias consistentes e interpretações de Bohm." Outras votações não científicas tem sido feitas em outros conferencias: veja por exemplo o blog de Michael Nielsen [1] o qual relata algumas destas votações. Porém o valor destas votações e um tanto discutível.

Um dos mais fortes defensores da Interpretação de muitos mundos é David Deutsch . De acordo com Deutsch o padrão de interferência observado com um único no experimento de dupla fenda, pode ser explicado pela interferência dos fotos nos múltiplos universos. Visto desta forma, o experimento de interferência de um único fóton é indistinguível de um experimento de vários fótons. De um ponto de vista mais prático, em um dos seus mais recentes papers de computação quântica (Deutsch 1985), ele sugere que o paralelismo que resulta da validade da IMM poderia conduzir a "*um método pelo qual certas tarefas probabilísticas poderiam ser feitas mais rápidas por um computador quântico universal do que por qualquer um com restrições clássicas*".

Asher Peres foi um crítico aberto a IMM, por exemplo em uma seção em seu livro texto de 1993 com o título *Interpretação de Everett e outras teorias bizarras*. De fato, Peres questiona se MWI é realmente uma "interpretação" ou mesmo se interpretações da mecânica quântica são mesmo necessárias. Além disso, a interpretação de muitos mundos pode ser considerada como meramente uma transformação formal, a qual não adiciona nenhuma regra instrumentalista (i.e. estatístico) à mecânica quântica. Talvez o mais significativo, Peres parece sugerir a crença da existência de um número infinito de universos não-comunicantes somente piora o problema que se supõem tentar resolver.

IMM é considerada por alguns como sendo não testável, porque os múltiplos universos paralelos são não comunicáveis no sentido que informação não pode passar entre eles. Além disso, como também foi salientado (por exemplo, por Peres) que votações de "aprovação" tais como as mencionadas acima não podem ser usadas como evidência da correção ou não de uma teoria em particular.

## Muitos mundos na literatura e ficção científica

A interpretação de muitos mundos (e o conceito relacionado dos mundos possíveis) tem sido associado com diversos temas na literatura, arte e ficção científica.

Ao lado da violação de princípios fundamentais da casualidade e relatividade, estas histórias são extremamente equivocadas desde que estrutura da teoria da informação de caminhos dos múltiplos universos (que é o fluxo de informações entre os diferentes caminhos) é extraordinariamente complexa. Veja também FAQ de Michael Price referenciado na seção de links externos abaixo onde estes temas (e outros similares) são tratados como mais detalhes.

Outro tipo da visão popular da divisão em muitos mundos, a qual não envolve fluxo de informações entre os caminhos ou informação fluindo para traz no tempo considera finais alternativos para eventos históricos. Do ponto de vista da física quântica, estas histórias são incorretas por pelo menos dois motivos:

- Não há nada que relacione a mecânica quântica com a descrição dos desdobramentos de eventos históricos. De fato, este tipo de análise baseada em casos é uma técnica comum no planejamento e pode ser analisada quantitativamente pela probabilidade clássica.
- O uso de eventos históricos é uma forma complicada para introdução a teoria quântica já que se geralmente se considera ser este assunto externo a ela, especialmente a questão da natureza da escolha individual.

## Ver também

- Interpretações da mecânica quântica
- Multiverso
- Entrelaçamento quântico
- Universo paralelo

As opções seguintes promovem outras interpretações especulativas:

- Imortalidade quântica
- Holomovimento

## Ligações externas

- Contra interpretação de muitos-mundos <sup>[2]</sup>
- Formulação da mecânica quântica de estado relativo de Everett <sup>[3]</sup>
- Interpretação de muitos-mundos da Mecânica Quântica <sup>[4]</sup>
- Everett FAQ de Michael Price <sup>[5]</sup>
- Home page de Max Tegmark <sup>[6]</sup>
- Muitos-Mundos é uma causa perdida <sup>[7]</sup> de acordo com R. F. Streater

## Referências

- Jeffrey A. Barrett, *The Quantum Mechanics of Minds and Worlds*, Oxford University Press, 1999.
- Hugh Everett, Relative State Formulation of Quantum Mechanics, *Reviews of Modern Physics* vol 29, (1957) pp 454–462.
- Christopher Fuchs, Quantum Mechanics as Quantum Information (and only a little more), arXiv:quant-ph/0205039 v1, (2002)
- Bryce DeWitt, R. Neill Graham, eds, *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton Series in Physics, Princeton University Press (1973)
- Asher Peres, *Quantum Theory: Concepts and Methods*, Kluwer, Dordrecht, 1993.
- John Archibald Wheeler, Assessment of Everett's "Relative State Formulation of Quantum Theory", *Reviews of Modern Physics*, vol 29, (1957) pp 463–465
- David Deutsch, *The Fabric of Reality: The Science of Parallel Universes And Its Implications*, Penguin Books (August 1, 1998), ISBN 014027541X.
- David Deutsch, Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer, *Proceedings of the Royal Society of London A* 400, (1985) , pp. 97–117

## Referências

- [1] <http://www.qinfo.org/people/nielsen/blog/archive/000060.html>
- [2] <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9703089>
- [3] <http://plato.stanford.edu/entries/qm-everett/>
- [4] <http://plato.stanford.edu/entries/qm-manyworlds/>
- [5] <http://www.hedweb.com/manworld.htm>
- [6] <http://www.hep.upenn.edu/~max/everett.html>
- [7] <http://www.mth.kcl.ac.uk/~streater/lostcauses.html#XII>

---

# Interpretação transacional

---

A **interpretação transacional** da mecânica quântica (**TIQM**) criada por John Cramer e uma interpretação pouco usual da mecânica quântica que descreve as interações quânticas em termos de ondas padrões por ondas retardadas (avançadas no tempo) e avançadas (retrocedendo no tempo). O autor argumenta que isto evitaria os problemas filosóficos que apresentam a Interpretação de Copenhague e leis do observador, e resolve vários paradoxos da mecânica quântica. Notavelmente, ela é apontada como consistente com Experimento de Afshar, apresentado em 2004 pelo físico iraniano Shahriar S. Afshar.

A existência de ondas avançadas e retardadas como soluções válidas das equações de Maxwell foram propostas por R. Feynman e J. Wheeler em 1945 (citado no trabalho original de J. Cramer). Eles se utilizaram desta idéia para resolver o problema infinita auto-energia de um elétron. Mais tarde, eles desistiram da idéia de ondas que voltassem no tempo.

J. Cramer reviveu esta idéia de duas ondas para formular sua interpretação original da teoria quântica. De acordo com a TIQM, qualquer fonte emite comumente uma onda retardada com a metade da amplitude observada, enquanto o detector emite uma onda avançada com a mesma meia amplitude. As fases da onda retardada e avançada são correlacionadas de tal forma que as ondas interfiram positivamente na região do espaço tempo, correspondendo a onda verdadeira (observável), e elas se interferiram negativamente em todas as outras regiões do espaço tempo (isto é, *antes* ponto de emissão e *depois* do ponto de absorção). Para um observador, esta onda padrão no espaço tempo pareceria como se uma partícula viaja-se através do espaço.

Cramer utilizou a TIQM no ensino de mecânica quântica na University of Washington em Seattle.

## Literatura

- Tim Maudlin, *Quantum Non-Locality & Relativity*, Blackwell Publishers 2002, ISBN 0631232206 (discusses a gedanken experiment designed to refute the TI)

## Ver também

- Interpretações da mecânica quântica

## Ligações externas

- The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics <sup>[1]</sup> - John Cramer's original paper
- An Overview of the Transactional Interpretation <sup>[2]</sup>
- Photon Emission <sup>[3]</sup>
- Pavel V. Kurakin, George G. Malinetskii, *How bees can possibly explain quantum paradoxes* <sup>[4]</sup>, Automates Intelligents (February 2 2005). (This paper tells about a work attempting to develop TIQM further)
- quant-ph/0408109 Cramer's Transactional Interpretation and Causal Loop Problems <sup>[5]</sup> an attempt to refute Maudlin's refutation



## Referências

- [1] [http://www.npl.washington.edu/npl/int\\_rep/tiqm/TI\\_toc.html](http://www.npl.washington.edu/npl/int_rep/tiqm/TI_toc.html)
- [2] [http://www.npl.washington.edu/npl/int\\_rep/ti\\_over/ti\\_over.html](http://www.npl.washington.edu/npl/int_rep/ti_over/ti_over.html)
- [3] <http://www.johnkharms.com/photon.htm>
- [4] <http://www.automatesintelligents.com/labo/2005/jan/bees.html>
- [5] <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0408109>

## Interpretações da mecânica quântica

Uma **interpretação da mecânica quântica** é uma tentativa de responder à questão: *Sobre o que trata exatamente a mecânica quântica?* A questão têm as suas raízes históricas na natureza mesma da mecânica quântica, que desde um princípio foi considerada como uma teoria radicalmente diferente das teorias físicas precedentes. Porém, a mecânica quântica têm sido descrita como a teoria "mais comprovada e de maior sucesso na história da ciência" (vide Jackiw and Kleppner, 2000.)

Mecânica quântica, como uma teoria científica, tem sido muito bem sucedida em prever resultados experimentais. Isto significa, primeiro, que há uma correspondência bem definida entre os elementos do formalismo (matemático, abstrato) e os procedimentos experimentais e, em segundo lugar, que os resultados obtidos neste experimentos estão extremamente de acordo com o formalismo. Além disso, que as questões básicas de que o que significa a mecânica quântica são ainda uma proposta em si mesmas e requerem algumas explicações.

O entendimento da estrutura matemática da teoria trilhou vários estágios preliminares de desenvolvimento. Por exemplo, Schrödinger de início não entendeu a natureza probabilística da função de onda associada ao elétron; Foi Max Born que propôs uma interpretação de uma distribuição de probabilidade no espaço para a posição do elétron. Outros cientistas de destaque, tais como Albert Einstein, tiveram grande dificuldade em concordar com a teoria. Mesmo se estes pontos forem tratados como problemas menores, eles têm grande importância para atividades de interpretação.

Disto não se deve, porém, presumir que a maioria dos físicos considere que a mecânica quântica *necessite* de uma interpretação, além das mínimas fornecidas pela *interpretação instrumentalista*, as quais serão discutidas abaixo. A interpretação de Copenhague, no ano de 2005, ainda parecia ser a mais popular entre os cientistas (seguida pelas histórias consistentes e interpretação de muitos mundos). Mas também é verdade que a maioria dos físicos considera que questões não instrumentais (em particular questões ontológicas) sejam irrelevantes para a física. Eles remetem ao ponto de vista de Paul Dirac, depois expresso em um famoso ditado: "Cale-se e calcule" frequentemente (talvez erroneamente) atribuído a Richard Feynman (veja [1]).

### Dificuldades de uma interpretação direta

As dificuldades observadas na interpretação refletem vários pontos a respeito da descrição ortodoxa da mecânica quântica. Neste artigo são destacados 4 destes pontos:

1. Abstrato, a natureza matemática da descrição mecânica quântica.
2. A existência de processos não determinísticos e irreversíveis na mecânica quântica.
3. O fenômeno do entrelaçamento, e particularmente, a alta correlação entre eventos que se esperariam remotos na física clássica.
4. A complementaridade de possíveis descrições da realidade.

Inicialmente, a aceita estrutura matemática da mecânica quântica era baseada profundamente em abstrações matemáticas, tais como espaço de Hilbert e operadores no espaço de Hilbert. Em mecânica clássica e eletromagnetismo, por outro lado, as propriedades de um ponto material ou as de um campo são descritas por números reais ou funções definidas em duas ou três dimensões. Claramente, localmente falando, para estas teorias

parece ser menos necessário prover uma interpretação especial para estes números e funções.

Alem disto, os processos de medição apresentam um papel aparentemente essencial nesta teoria. Eles se relacionam a elementos abstratos da teoria, tais como a função de onda, para valores definidos operacionalmente, tais como probabilidades. Medições interagem com o estado do sistema, de algumas maneiras peculiares, como ilustrado no experimento de dupla fenda.

O formalismo matemático usado para descrever a evolução temporal de um sistema não relativístico propõem de certa forma dois tipos de transformações:

- Transformações reversíveis descritas pelo operador unitário no estado espacial. Estas transformações podem ser determinadas pela solução da equação de Schrödinger.
- Transformações não reversíveis e não determinísticas descritas matematicamente por transformações mais complicadas (*veja operadores quânticos*). Exemplos destas transformações são aquelas experimentadas pelo sistema como resultado da medição.

Uma versão restrita do problema de interpretação da mecânica quântica consiste em prover algum tipo de imagem plausível, justamente para este segundo tipo de transformação. Este problema deve ser dirigido puramente por reduções matemáticas, por exemplo pela interpretação como na de muitos mundos ou histórias consistentes .

Alem das características não determinísticas e irreversíveis do processo de medição, há outros elementos da física quântica que a distinguem profundamente da física clássica e que não podem ser representados por qualquer figura clássica. Um destes é o fenômeno do entrelaçamento, ilustrado pelo paradoxo EPR, o qual parece violar o principio da casualidade local.

Outra obstrução para a interpretação direta é o fenômeno da complementaridade, o qual parece violar os princípios básicos da lógica proposicional. A complementaridade diz não haver nenhuma figura lógica (obedecendo a lógica proposicional clássica) que pode descrever simultaneamente e ser usado para justificar todas as propriedades de um sistema quântico  $S$ . Isto pode ser frequentemente formulado dizendo-se que há um conjunto de proposições "complementares"  $A$  e  $B$  que pode descrever  $S$ , mas não ao mesmo tempo. Exemplos de  $A$  e  $B$  são proposições envolvendo a descrição de  $S$  na forma de onda e corpuscular. O enunciado anterior é uma parte de formulação original de Niels Bohr, a qual é frequentemente equaciona o principio da complementaridade em si.

A complementaridade não é tida usualmente como um prova da falha da lógica clássica, embora Hilary Putnam tenha levantado este ponto de vista em seu trabalho *Is logic empirical?*. Ao contrario disto, a complementaridade significa que a composição de propriedades físicas de  $S$  (tais como posição e momento variando em uma certa faixa) possuem uma conectividade proposicional que não obedecem as leis da lógica proposicional clássica. Como é agora bem demonstrado (Omnès, 1999) "a origem da complementaridade encontra-se na não commutatividade dos operadores descrevendo observáveis na mecânica quântica."

## Estado problemático das visões e interpretações

O preciso estado ontológico, de cada uma das visões interpretativas, permanece um tema da argumentação filosófica.

Em outras palavras, se nos interpretamos uma estrutura formal  $X$  da mecânica quântica por meio da estrutura  $Y$  (via uma equivalência matemática das suas estruturas), qual é o estado de  $Y$ ? Esta é uma velha questão do *formalismo científico*, vista de um novo ângulo.

Alguns físicos, por exemplo Asher Peres e Chris Fuchs, apresentam a argumentação que uma interpretação não é nada mais do que uma equivalência forma entre um conjuntos de leis para operar dados experimentais. Isto deve sugerir que todo exercício de interpretação é desnecessário.

## Interpretação instrumental

Qualquer teoria científica moderna requer pelo menos uma descrição instrumental a qual possa relacionar o formalismo matemático a experimento prático. No caso da mecânica quântica, a descrição instrumental mais comum é uma afirmação da regularidade estatística entre processo preparação e o processo de medição. A esta geralmente é acrescentado a afirmação da regularidade estatística de um processo de medição realizado em um sistema em um dado estado  $\varphi$ .

Considere por exemplo a medição  $\mathbf{M}$  de uma propriedade física observável com duas possíveis saídas "para cima" ou "para baixo" que podem ser realizadas em um sistema  $\mathbf{S}$  com espaço de Hilbert  $H$ . Se a medição é realizada fora de um sistema do qual o estado quântico seja conhecido  $\varphi \in H$ , então, de acordo com as leis da mecânica quântica, a medição irá levar à mudança do estado do sistema da seguinte forma: imediatamente após a medição o sistema se transformará em um dos dois estados  $\varphi_{\text{para baixo}}$  se a saída for "para baixo" ou  $\varphi_{\text{para cima}}$  se a saída for "para cima". A teoria matemática fornece as seguintes expressões para este estado:

$$\varphi_{\text{paracima}} = E_{\text{paracima}}(\varphi).$$

$$\varphi_{\text{parabaixo}} = E_{\text{parabaixo}}(\varphi).$$

onde  $E_{\text{para baixo}}$  and  $E_{\text{para cima}}$  são projeções ortogonais em dentro do espaço dos autovetores do observado. Os números

$$P_{\text{paraacima}} = \langle \varphi_{\text{paraacima}} | \varphi \rangle$$

$$P_{\text{paraabaixo}} = \langle \varphi_{\text{paraabaixo}} | \varphi \rangle$$

têm uma descrição instrumental precisa em termo de frequências relativas. Isto significa que, em um ciclo infinito de experimentos de medições idênticos (no qual todos os sistemas estão preparados no estado  $\varphi$ ), a proporção de valores com saída "para baixo" é  $P_{\text{para baixo}}$  e a proporção de valores com a saída "para cima" é  $P_{\text{para cima}}$ . Note que  $P_{\text{para cima}}$ ,  $P_{\text{para baixo}}$  são ambos números não negativos e: tal que  $P_{\text{para cima}}$ ,  $P_{\text{para baixo}}$  podem ser consideradas realmente como probabilidades.

Por um abuso de linguagem, a simples descrição instrumental pode ser dita como sendo uma interpretação, embora este uso seja de algum modo enganador já que o instrumentalismo explicitamente evita qualquer regra explanatória; isto é, ele não tenta responder à questão a qual mecanismo quântico estamos referindo.

## Propriedades das interpretações

Uma interpretação pode ser caracterizada pelo fato de satisfazer certas propriedades, tais como:

- Realismo
- Completude
- Realidade local
- Determinismo

Para exemplificar estas propriedades, nos devemos ser mais explícitos a cerca do tipo de visão que a interpretação proporciona. Para finalmente considerar uma interpretação como uma correspondência entre elementos do formalismo matemático  $\mathbf{M}$  e os elementos de uma estrutura interpretativa  $\mathbf{I}$ , onde:

- O formalismo matemático consiste do mecanismo do espaço Hilbertiano de vetores-ket, operadores auto-adjunto atuando no espaço de vetores-ket, com dependência temporal unitária dos vetores-ket e operações medição. Neste contexto uma operação de medição pode ser considerada como uma transformação a qual leva um vetor-ket em uma distribuição de probabilidade de vetores-ket. *Veja também operadores quânticos para uma formalização deste conceito.*
- A estrutura de interpretação incluem estados, transições entre estados, operações de medição e possíveis informações a respeito da extensão espacial destes elementos. Como uma operação de medição a qual retorna um valor e resulta em uma possível mudança de estado no sistema. Informações espaciais, por exemplo, podem ser

exibidas por estados representados como funções na configuração espacial. A transição deve ser não-determinística ou probabilística ou ter infinitos estados. De qualquer forma, a concepção crítica de uma interpretação é que os elementos de  $I$  são tratados como realidade física.

Neste sentido, uma interpretação pode ser interpretada como uma semântica para o formalismo matemático.

Particularmente, a limitada visão instrumentalista da mecânica quântica delineada na seção anterior não é uma interpretação completa desde que ela não faz referência a respeito da realidade física.

O uso atual na física de "inteireza" e "realismo" é frequentemente considerado tendo sido usada originalmente no trabalho (Einstein, 1935) que propôs o paradoxo EPR. Neste trabalho os autores propõem o conceito de "*elemento da realidade*" e "inteireza" de uma teoria física. Embora eles não tenham definido "*elemento da realidade*", eles propõem uma boa caracterização para ele, denominado-o como uma quantidade para qual um valor pode ser predito antes que amedida em si a perturbe de alguma forma. O EPR define uma "teoria física completa" como uma na qual cada elemento da realidade física é considerado pela teoria. Do ponto de vista semântico da interpretação, uma teoria da interpretação é completa se cada elemento da estrutura da interpretação é considerado pelo formalismo matemático. Realismo é uma propriedade de cada um dos elementos matemáticos do formalismo; qualquer elemento é real se corresponde a alguma coisa na estrutura de interpretação. Por exemplo, em algumas interpretações da mecânica quântica (tais como a interpretação de muitos mundos) o vetor ket associado ao sistema é tido como correspondendo a um elemento da realidade física, enquanto em outras isto não acontece.

Determinismo é uma propriedade caracterizada pela mudança de estado devido a passagem do tempo, em outras palavras é que o estado a um dado instante do tempo no futuro e uma função do estado presente (*veja evolução*). Isto deve nos permitir esclarecer se uma estrutura interpretativa particular é ou não determinística, precisamente porque ela ter ou não uma clara escolha por um parâmetro de tempo. Além disto, uma dada teoria poderia ter duas interpretações, uma das quais é determinística, e outra não.

A realidade local tem duas partes:

- O valor retornado pela medição corresponde ao valor de alguma função no espaço de estado. Dizendo de uma outra forma, este valor é um elemento da realidade;
- Os efeitos da medição devem ter uma velocidade de propagação que não excede alguma barreira universal (isto é, a velocidade da luz). De forma a fazer sentido, operações de medição devem ser espacialmente localizada numa estrutura de interpretação.

Uma formulação precisa do realismo local em termos de uma teoria de variáveis locais ocultas foi proposta por John Bell.

O Teorema de Bell e sua verificação experimental que restringe os tipos de propriedade da que uma teoria quântica pode ter. Por exemplo, o teorema de Bell implica que mecânica quântica não pode satisfazer o realismo local.

## Comparação

Até este momento, não há evidência experimental que nos permita distinguir entre as várias interpretações listadas abaixo. Para que possa evoluir, a teoria física deve ser sustentável e consistente com ela mesmo e com a realidade; problemas surgem somente quando tentamos "interpretá-la". Entretanto, existem atividades de pesquisa sendo feita no sentido de realizar testes experimentais que poderiam diferenciar entre as várias interpretações.

Algumas das interpretações mais importantes foram sumarizadas aqui:

Interpretação	Determinística?	Função de onda real?	Um universo?	evita variáveis ocultas?	evita colapso da função de onda?
Histórias consistentes (Copenhague "corrigida")	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Interpretação copenhague (Forma da Onda não é real)	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Interpretação copenhague (Forma da Onda é real)	Não	Sim	Sim	Sim	Não
Interpretação Transacional	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Consciência causa colapso	Não	Sim	Sim	Sim	Não
Interpretação de muitos mundos	Sim	Sim	Não	Sim <sup>1</sup>	Sim
Interpretação de Bohm	Sim	Sim <sup>2</sup>	Sim	Não	Sim

<sup>1</sup>A interpretação de muitos mundos não tem variáveis ocultas, exceto se consideramos entre os mundos em si.

<sup>2</sup>Bohm/de Broglie consideram que ambos partícula e função de onda ("onda guia ") são reais.

Cada interpretação tem muitas variações. É difícil obter uma definição precisa da Interpretação de Copenhague; na tabela acima, duas variantes clássicas e uma nova versão da interpretação de Copenhague são mostradas; uma que utiliza a função de onda unicamente como uma ferramenta para cálculo, e outra que utiliza a função de onda como um "elemento da realidade".

## Ver também

Lista de tópicos da física

- Histórias consistentes
- Mecânica Quântica
- Indeterminancia Quântica
- Teorema de Bell
- Interpretação de Bohm
- Interpretação de Copenhague da mecânica quântica
- Interpretação de muitos mundos
- Interpretação transacional
- Colapso da função de onda
- Problema da medição
- Computador quântico
- Problemas insolúveis da Física
- Filosofia da física

## Referências

- R. Carnap, *The interpretation of physics, Foundations of Logic and Mathematics of the International Encyclopedia of Unified Science*, Univesity of Chicago Press, 1939.
- D. Deutsch, *The Fabric of Reality*, Allen Lane, 1997. Though written for general audiences, in this book Deutsch argues forcefully *against* instrumentalism.
- A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* Phys. Rev. 47 777, 1935.
- C. Fuchs and A. Peres, *Quantum theory needs no 'interpretation'*, Physics Today, March 2000.
- N. Herbert. *Quantum Reality: Beyond the New Physics*, New York: Doubleday, ISBN 0-385-23569-0, LoC QC174.12.H47 1985.
- R. Jackiw and D. Kleppner, *One Hundred Years of Quantum Physics*, Science, Vol. 289 Issue 5481, p893, August 2000.
- M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York: McGraw-Hill, 1966.
- M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics*. New York: Wiley, 1974.
- W. M. de Muynck, *Foundations of quantum mechanics, an empiricist approach*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002, ISBN 1-4020-0932-1
- R. Omnès, *Understanding Quantum Mechanics*, Princeton, 1999.
- H. Reichenbach, *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics*, Berkeley: University of California Press, 1944.
- J. A. Wheeler and H. Z. Wojciech (eds), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton: Princeton University Press, ISBN 0-691-08316-9, LoC QC174.125.Q38 1983

## Ligações externas

- Interpretações comparativas <sup>[2]</sup>
- Visão pessimistas das interpretações "New Age" da mecânica quântica <sup>[3]</sup>

## Referências

[1] <http://www.physicstoday.org/vol-57/iss-5/p10.html>

[2] <http://members.aol.com/jmtsgibbs/Interpretation.htm>

[3] <http://www.csicop.org/si/9701/quantum-quackery.html>

---

## Lógica quântica

---

Em Física Matemática é mecânica quântica, **lógica quântica** é um conjunto de regras para o raciocínio relativo a uma classe proposições para as quais os princípios da teoria quântica são considerados. Esta área de pesquisa e este nome originaram-se em uma publicação de 1936 de Garrett Birkhoff e John von Neumann, que tentaram reconciliar a aparente inconsistência da lógica booleana clássica com os fatos relacionados as medições de variáveis complementares na mecânica quântica, tais como a posição e o momento.

A lógica quântica pode ser formulada como uma versão modificada da lógica proposicional ou como uma lógica de muitos valores não comutativa. Dentro das propriedades que claramente a distinguem da lógica clássica, encontra-se a falha da lei distributiva da lógica proposicional.

$$p \text{ e } (q \text{ ou } r) = (p \text{ e } q) \text{ ou } (p \text{ e } r),$$

Onde os símbolos  $p$ ,  $q$  e  $r$  são variáveis proposicionais. Para ilustrar como a lei distributiva falha, considere-se uma partícula movendo em uma reta e tendo:

$$p = \text{"a partícula está se movendo para a direita"}$$

$$q = \text{"a partícula está no intervalo } [-1,1]\text{"}$$

$$r = \text{"a partícula não está no intervalo } [-1,1]\text{"}$$

Se a proposição " $q$  ou  $r$ " é verdadeira, então

$$p \text{ and } (q \text{ or } r) = p$$

Por outro lado, as proposições " $p$  e  $q$ " e " $p$  e  $r$ " são ambas falsas, desde que elas se referem simultaneamente a valores de posição e momento, o que não é permitido pelo princípio da incerteza. Então,

$$(p \text{ e } q) \text{ ou } (p \text{ e } r) = \text{falso}$$

Portanto a lei distributiva falha.

## Mecânica matricial

A **mecânica matricial** é uma formulação da mecânica quântica criada por Werner Heisenberg, Max Born, e Pascual Jordan em 1925.

A mecânica matricial foi a primeira definição completa e correta da mecânica quântica. Ela estendeu o modelo de Bohr pela descrição de como os saltos quânticos ocorrem.

## Princípio da incerteza de Heisenberg

O **princípio da incerteza de Heisenberg** consiste num enunciado da mecânica quântica, formulado inicialmente em 1927 por Werner Heisenberg, impondo restrições à precisão com que se podem efetuar medidas *simultâneas* de uma classe de pares de observáveis.

Pode-se exprimir o princípio da incerteza nos seguintes termos:

O produto da incerteza associada ao valor de uma coordenada  $x_1$  e a incerteza associada ao seu correspondente momento linear  $p_1$  *não pode* ser inferior, em grandeza, à constante de Planck normalizada.

Em termos matemáticos, exprime-se assim:

$$\Delta x_i \Delta p_i \geq \frac{\hbar}{2}$$

onde  $\hbar$  é a Constante de Planck ( $h$ ) dividida por  $2\pi$ .

A explicação disso é fácil de se entender, e fala mesmo em favor da intuição, embora o raciocínio clássico e os aspectos formais da análise matemática tenham levado os cientistas a pensarem diferentemente por muito tempo

Quando se quer encontrar a posição de um elétron, por exemplo, é necessário fazê-lo interagir com algum instrumento de medida, direta ou indiretamente. Por exemplo, faz-se incidir sobre ele algum tipo de radiação. Tanto faz aqui que se considere a radiação do modo clássico - constituída por ondas eletromagnéticas - ou do modo quântico - constituída por fótons. Se se quer determinar a posição do elétron, é necessário que a radiação tenha comprimento de onda da ordem da incerteza com que se quer determinar a posição.

Neste caso, quanto *menor* for o comprimento de onda (*maior* frequência) maior é a precisão. Contudo, maior será a energia cedida pela radiação (onda ou fóton) em virtude da relação de Planck entre energia e frequência da radiação

$$E = h \cdot \nu$$

e o elétron sofrerá um *recuo* tanto maior quanto maior for essa energia, em virtude do efeito Compton. Como consequência, a velocidade sofrerá uma alteração não de todo previsível, ao contrário do que afirmaria a mecânica clássica.

Argumentos análogos poderiam ser usados para se demonstrar que ao se medir a velocidade com precisão,



Werner Heisenberg



Resumidamente, 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**

Algumas pessoas consideram mais fácil o entendimento através da analogia. Para se descobrir a posição de uma bola de plástico dentro de um quarto escuro, podemos emitir algum tipo de radiação e deduzir a posição da bola através das ondas que "batem" na bola e voltam. Se quisermos calcular a velocidade de um automóvel, podemos fazer com que ele atravesse dois feixes de luz, e calcular o tempo que ele levou entre um feixe e outro. Nem radiação nem a luz conseguem interferir *de modo significativo* na posição da bola, nem alterar a velocidade do automóvel. Mas podem interferir muito tanto na posição quanto na velocidade de um elétron, pois aí a diferença de tamanho entre o fóton de luz e o elétron é pequena. Seria, mais ou menos, como fazer o automóvel ter de atravessar dois troncos de árvores (o que certamente alteraria sua velocidade), ou jogar água dentro do quarto escuro, para deduzir a localização da bola através das pequenas ondas que baterão no objeto e voltarão; mas a água pode empurrar a bola mais para a frente, alterando sua posição. Desta forma torna-se impossível determinar a localização real desta bola pois a própria determinação mudará a sua posição. Apesar disto, a sua nova posição pode ser ainda deduzida, calculando o quanto a bola seria empurrada sabendo a força das ondas obtendo-se uma posição provável da bola e sendo provável que a bola esteja localizada dentro daquela área.

## Natureza da medida em mecânica quântica

Como se pode depreender da argumentação acima exposta, a natureza de uma medida sofre sérias reformulações no contexto da mecânica quântica. De fato, na mecânica quântica uma propriedade leva o nome de *observável*, pois não existem propriedades inobserváveis nesse contexto. Para a determinação de um observável, é necessário que se tenha uma preparação conveniente do aparato de medida, a fim de que se possa obter uma coleção de valores do ensemble de entes do sistema. Se não puder montar, ao menos teoricamente (em um *Gedankenexperiment*) uma preparação que possa medir tal grandeza (*observável*), então é impossível determiná-la naquelas condições do experimento.

Uma comparação tornará mais clara essa noção. No experimento de difração da dupla fenda, um feixe de elétrons atravessando uma fenda colimadora atinge mais adiante duas outras fendas paralelas traçadas numa parede opaca.

Do lado oposto da parede opaca, a luz, atravessando as fendas simultaneamente, atinge um anteparo. Se se puser sobre este um filme fotográfico, obtém-se pela revelação do filme um padrão de interferência de zonas claras e escuras. Esse resultado *indica* uma natureza ondulatória dos elétrons, resultado esse que motivou o desenvolvimento da mecânica quântica.

Entretanto, pode-se objetar e afirmar-se que a natureza dos elétrons seja corpuscular, ou seja, composta de fótons. Pode-se então perguntar por qual fenda o elétron atravessou para alcançar o anteparo. Para determinar isso, pode-se pôr, junto de cada fenda, uma pequena fonte luminosa que, ao menos em princípio, pode indicar a passagem dos elétrons por tal ou qual fenda. Entretanto, ao fazê-lo, o resultado do experimento é **radicalmente mudado**. A figura de interferência, antes presente, agora dá lugar a uma distribuição gaussiana bimodal de somente *duas* zonas claras em meio a uma zona escura, e cujos máximos se situam em frente às fendas.

Isso acontece porque as naturezas ondulatória e corpuscular do elétron não podem ser *simultaneamente* determinadas. A tentativa de determinar uma inviabiliza a determinação da outra. Essa constatação da dupla natureza da matéria (e da luz) leva o nome de *princípio da complementaridade*.

Essa *analogia* serve para mostrar como o mundo microfísico tem aspectos que diferem significativamente do que indica o senso comum.

Para se entender perfeitamente o alcance e o real significado do princípio da incerteza, é necessário que se distingam três tipos reconhecidos de propriedades dinâmicas em mecânica quântica:

1. *Propriedades compatíveis*: são aquelas para as quais a medida *simultânea* e *arbitrariamente precisa* de seus valores não sofre nenhum tipo de restrição básica. Exemplo: a medição simultânea das coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  de uma partícula. A medição simultânea dos momentos  $p_x$ ,  $p_y$  e  $p_z$  de uma partícula

2. *Propriedades mutuamente excludentes*: são aquelas para as quais a medida simultânea é simplesmente impossível. Exemplo: se um elétron está numa posição  $x_i$ , não pode estar simultaneamente na posição diferente  $x_j$ .
3. *Propriedades incompatíveis*: são aquelas correspondentes a grandezas canonicamente conjugadas, ou seja, aquelas cujas medidas não podem ser *simultaneamente* medidas com *precisão arbitrária*. Em outras palavras, são grandezas cujas medidas simultâneas não podem ser levadas a cabo em um conjunto de subsistemas identicamente preparados (*ensemble*) para este fim, porque tal preparo não pode ser realizado. Exemplos: as coordenadas  $x, y$  e  $z$  e seus correspondentes momentos  $p_x, p_y$  e  $p_z$ , respectivamente. As coordenadas angulares  $\theta_i$  e os correspondentes momentos angulares  $J_i$ .

## Observáveis e operadores

No formalismo matemático da mecânica quântica, os observáveis são representados por operadores matemáticos sobre um espaço de Hilbert.

Esses operadores podem ser construídos a partir de seus equivalentes clássicos.

Na formulação de Heisenberg, as relações da incerteza podem ser dados na forma de um operador comutador, que opera sobre dois outros operadores quaisquer:

$$[A, B] \equiv AB - BA$$

onde A e B são operadores quaisquer.

No caso das relações de incerteza:

$$[X_k, B_l] = i\hbar\delta_{kl}\mathbb{I}$$

Dirac notou a semelhança formal entre o comutador e os parênteses de Poisson. Sabedor da equivalência usada por Schrödinger quando este postulou a forma da equação de onda, Dirac postulou as seguintes equivalências, que valem como receita para se acharem os operadores quânticos correspondentes a grandezas clássicas:

$$\begin{aligned} \text{coordenada } x_k &\rightarrow \text{operador } X_k \\ \text{momento } p_l &\rightarrow \text{operador } \frac{i}{\hbar} \frac{\partial}{\partial x_k} \\ \{x_k, p_l\} &\rightarrow \frac{1}{i\hbar} \cdot [X_k, P_l] \end{aligned}$$

A descrição ondulatória dos objetos microscópicos tem consequências teóricas importantes, como o princípio da incerteza de Heisenberg. O fato de os objetos microscópicos, em muitas situações, terem uma localização no espaço mesmo que aproximada, implica que não podem ser descritos por uma onda com um só comprimento de onda (onda plana), pois esta ocuparia todo o espaço. É necessária uma superposição de comprimentos de ondas diferentes para se obter um "pacote" de ondas mais bem localizado e que represente o objeto microscópico.

## O papel do princípio da incerteza nas formulações modernas da mecânica quântica

Hoje em dia, o princípio da incerteza é importante principalmente por dois motivos: um histórico e outro didático. Ambos são análogos: o princípio da incerteza mostra de maneira clara que concepções clássicas a respeito da medida devem ser abandonadas.

No entanto, o princípio da incerteza \*não\* é um bom princípio (ou postulado) da mecânica quântica, já que é inexacto e pouco geral. A mecânica quântica não-relativística é totalmente descrita com alguns postulados, dos quais as relações de incerteza de Heisenberg surgem de forma pouco natural. Mas o espírito do princípio da incerteza é mantido: não se pode ter um sistema que, ao ser medido, tenha a probabilidade 1 de se encontrar tanto uma ou outra grandeza, se essas grandezas corresponderem a operadores que não comutam. Iremos explicar isto melhor adiante:

Todas as grandezas que podem ser medidas correspondem aos chamados "autovalores" de certos objetos matemáticos chamados de operadores (na verdade, a natureza requer que esses operadores sejam de uma classe especial, a dos "observáveis"). Chamemos um operador qualquer de  $A$ , e chamemos seus autovalores de  $a_n$  ( $a_1$  é um autovalor,  $a_2$  é outro e assim por diante). Existem estados quânticos, chamados "autoestados" (que representaremos por  $|\phi_n\rangle$ ) do operador  $A$ , nos quais uma medida tem 100% de chance de encontrar o valor  $a_n$ . Esses autoestados e esses autovalores são definidos pela seguinte equação:

$$A|\phi_n\rangle = a_n|\phi_n\rangle$$

Um operador é dito um observável se esses autoestados  $|\phi_n\rangle$  formarem uma "base". Diz-se que um grupo qualquer de estados quânticos formam uma base se qualquer outro estado quântico puder ser escrito como uma superposição deles. Ou seja, para qualquer estado quântico  $|\Psi\rangle$ ,

$$|\Psi\rangle = \sum c_n |\phi_n\rangle$$

Onde os coeficientes  $c_n$ , em geral complexos, indicam o quanto os autoestados correspondentes  $|\phi_n\rangle$  influenciam no estado resultante,  $|\Psi\rangle$ . Um dos postulados da mecânica quântica diz que a probabilidade de uma medida da grandeza  $A$  revelar o valor  $a_n$  é:

$$P(a_n) = |c_n|^2$$

Quando o sistema está no autoestado  $|\phi_n\rangle$ , o postulado acima mostra que a probabilidade de se encontrar o valor  $a_n$  correspondente é 100%. Assim, pode-se dizer que o sistema \*possui a grandeza  $A$  bem definida\*.

Agora consideremos dois operadores  $A$  e  $B$ , como o operador da posição e o operador do momento. Em geral, os autoestados de um operador não são os mesmos autoestados do outro operador. Consequentemente, se o sistema está em um estado quântico onde a grandeza  $A$  é bem definida, a grandeza  $B$  não será bem definida. Ou seja, haverá uma "incerteza" na grandeza  $B$ .

Mas, e se o sistema estiver num estado onde a grandeza  $A$  é bem definida, e efetuarmos uma medida na grandeza  $B$ ? Pode-se pensar que, então, saberemos exatamente o valor de ambas as grandezas. Mas isso está errado, devido a outro dos postulados da mecânica quântica: se uma medida de uma grandeza qualquer  $B$  revela o valor  $b_n$ , então o sistema \*é perturbado pela medida\*, e passa para o autoestado  $|\phi_n\rangle$  correspondente à grandeza  $B_n$ .

Então, suponha que dois operadores  $A$  e  $B$  não possuem os mesmos autoestados. Se efetuarmos em um sistema qualquer a medida da grandeza  $A$ , e encontrarmos um certo valor, o sistema se torna um autoestado de  $A$ , com um valor bem definido de  $A$  e uma incerteza no valor de  $B$ . Se, após isso, efetuarmos uma medida no valor de  $B$ , então lançamos o sistema num autoestado de  $B$ , com um valor bem definido de  $B$  e uma incerteza no valor de  $A$ . Com isso, dizemos que é impossível saber simultaneamente o valor da grandeza  $A$  e da grandeza  $B$ .

A incerteza entre a posição e o momento proposta por Heisenberg é, então, uma consequência dos postulados da mecânica quântica, e não um postulado por si só.

## Bibliografia

- *A estrutura quântica da matéria - do átomo pré-socrático às partículas elementares*. José Leite Lopes - UFRJ Editora/Academia Brasileira de Ciências/ERCA-Editora e Gráfica limitada - Rio de Janeiro
- *Química Quântica - Fundamentos e Métodos*. José J.C.Teixeira Dias- Fundação Calouste Gulbenkian - Lisboa

### Vídeo - Tudo Sobre Incerteza - Mecânica Quântica

- Primeira Parte no Google <sup>[1]</sup>
- Segunda Parte no Google <sup>[2]</sup>
- Terceira Parte no Google <sup>[3]</sup>
- Quarta Parte no Google <sup>[4]</sup>
- Quinta Parte no Google <sup>[5]</sup>
- Sexta Parte no Google <sup>[6]</sup>

## Ligações externas

- The certainty principle <sup>[7]</sup>

## Referências

- [1] <http://video.google.com/videoplay?docid=-5282605523367356760>
- [2] <http://video.google.com/videoplay?docid=-7180902681748103402>
- [3] <http://video.google.com/videoplay?docid=-5128082095464869520>
- [4] <http://video.google.com/videoplay?docid=3237982797701884678>
- [5] <http://video.google.com/videoplay?docid=-4853271687297380878>
- [6] <http://video.google.com/videoplay?docid=-9059388017574247564>
- [7] <http://daarb.narod.ru/tcpr-eng.html>

# Princípio de exclusão de Pauli

O **princípio de exclusão de Pauli** é um princípio da mecânica quântica formulado por Wolfgang Pauli em 1925. Ele afirma que dois férmions idênticos não podem ocupar o mesmo estado quântico *simultaneamente*. Uma forma mais rigorosa de enunciar este princípio é dizer que a função de onda total de um sistema composto por dois fermions idênticos deve ser anti-simétrica. Para elétrons de um mesmo átomo, ele implica que dois elétrons não podem ter os mesmos quatro números quânticos. Por exemplo, se os números quânticos  $n$ ,  $l$ , e  $m_l$  são iguais nos dois elétrons, estes deverão necessariamente ter os números  $m_s$  diferentes, e portanto os dois elétrons têm spins opostos.

O princípio de exclusão de Pauli é uma consequência matemática das restrições impostas por razões de simetria ao resultado da aplicação do operador de rotação a duas partículas idênticas de spin semi-inteiro.

## Sumário

O princípio de exclusão de Pauli é um dos mais importantes princípios da física, basicamente porque os tres tipos de partículas que formam a matéria ordinária - elétrons, prótons e nêutrons - têm que satisfazê-lo. O princípio de exclusão de Pauli é a razão fundamental para muitas das propriedades características da matéria, desde sua estabilidade até a existência das regularidades expressas pela tabela periódica dos elementos.

O princípio de exclusão de Pauli é uma consequência matemática das propriedades do operador momento angular, que é o gerador das operações de rotação, em mecânica quântica. A permutação de partículas num sistema de duas partículas idênticas (que é matematicamente equivalente à rotação de cada partícula de um ângulo de 180 graus) deve resultar em uma configuração descrita pela mesma função de onda da configuração original (quando as partículas têm spin inteiro) ou numa mudança de sinal desta função de onda (para partículas de spin semi-inteiro). Por isso, duas partículas de spin semi-inteiro não podem estar em um mesmo estado quântico, já que a função de onda do sistema composto pelas duas teria que ser igual a sua simétrica, e a única função que atende a esta condição é a função identicamente nula.

Partículas com função de onda anti-simétrica são chamadas férmions, e obedecem ao princípio de exclusão de Pauli. Além das mais familiares já citadas - elétron, próton e nêutron - são também fermions o neutrino e o quark (que são os constituintes elementares dos prótons e nêutrons), além de alguns átomos, como o hélio-3. Todos os férmions possuem spin "semi-inteiro", o que quer dizer que seu momento angular intrínseco tem valor  $\hbar = h/2\pi$  (a constante de Planck dividida por  $2\pi$ ) multiplicada por um semi-inteiro ( $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$ , etc.). Na teoria da mecânica quântica, fermions são descritos por "estados anti-simétricos", que são explicados em mais detalhes no artigo sobre partículas idênticas.

Um sistema formado por partículas idênticas com spin inteiro é descrito por uma função de onda simétrica; estas partículas são chamadas bósons. Ao contrário dos fermions, elas podem partilhar um mesmo estado quântico. São

exemplos de bósons o fóton e os bósons W e Z.

## História

No início do século XX tornou-se evidente que átomos e moléculas com elétrons emparelhados ou um número par de elétrons são mais estáveis que aqueles com um número ímpar de elétrons. Num artigo famoso *The Atom and the Molecule* <sup>[1]</sup> publicado em 1916 por Gilbert N. Lewis, por exemplo, a regra três dos seis postulados propostos pelo autor para explicar o comportamento químico das substâncias estabelece que um átomo tende a ter um número par de elétrons em sua camada de valência, sendo esse número, de preferência oito, que estão normalmente dispostos simetricamente nos oito vértices de um cubo (ver: átomo cúbico). Em 1922 Niels Bohr mostrou que a tabela periódica pode ser explicada pela hipótese de que certos números de elétrons (por exemplo, 2, 8 e 18) correspondem a "camadas fechadas" estáveis.

Pauli procurou uma explicação para estes números, que eram a esta altura apenas empíricos. Ao mesmo tempo, ele estava tentando explicar certos resultados experimentais envolvendo o Efeito Zeeman em espectroscopia atômica e no ferromagnetismo. Ele encontrou uma pista essencial em um artigo de 1924 escrito por E.C.Stoner, que estabelecia que, para um dado valor do número quântico principal (n), o número de níveis de energia de um elétron no espectro de um átomo de metal alcalino posto sob a ação de um campo magnético externo, situação na qual todos os níveis de energia degenerados são separados, é igual ao número de elétrons na camada fechada de um gás nobre correspondente ao mesmo valor de n. Este fato levou Pauli a perceber que os números aparentemente complicados de elétrons em camadas fechadas podem ser reduzidos a uma regra muito simples, a de que só pode haver um elétron em cada estado atômico, definido por um conjunto de quatro números quânticos. Para esta finalidade ele introduziu um novo número quântico com apenas dois valores possíveis, identificado por Samuel Goudsmit e George Uhlenbeck como o spin do elétron.

## Conexão com a simetria do estado quântico

O princípio de exclusão de Pauli pode ser deduzido a partir da hipótese de que um sistema de partículas só pode ocupar estados quânticos anti-simétricos. De acordo com o teorema spin-estatística, sistemas de partículas idênticas de spin inteiro ocupam estados simétricos, enquanto sistemas de partículas de spin semi-inteiro ocupam estados anti-simétricos; além disso, apenas valores de spin inteiros ou semi-inteiros são permitidos pelo princípio da mecânica quântica.

Como discutido no artigo sobre partículas idênticas, um estado anti-simétrico no qual uma das partículas está no estado  $|\psi_1\rangle$  (nota) enquanto a outra está no estado  $|\psi_2\rangle$  é

$$|\psi_1, \psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle|\psi_2\rangle - |\psi_2\rangle|\psi_1\rangle).$$

No entanto, se  $|\psi_1\rangle$  e  $|\psi_2\rangle$  são exatamente o mesmo estado, a expressão acima é idênticamente nula:

$$|\psi_1, \psi_2\rangle = 0.$$

Isto não representa um estado quântico válido, porque vetores de estado que representem estados quânticos têm obrigatoriamente que ser normalizáveis, isto é devem ter norma finita. Em outras palavras, nunca poderemos encontrar as partículas que formam o sistema ocupando um mesmo estado quântico.

## Consequências

O princípio de exclusão de Pauli ajuda a explicar uma grande variedade de fenômenos físicos. Um destes fenômenos é a "rigidez" ou "resiliência" da matéria ordinária (fermions): o princípio proíbe que fermions idênticos sejam *espremidos* uns contra os outros (cf. módulo de Young e módulo de rigidez de sólidos), e por isso nossas observações quotidianas do mundo macroscópico mostram que objetos materiais colidem, ao invés de atravessar uns aos outros, e de que somos capazes de nos apoiar de pé sobre o solo sem nele afundar. Outra consequência deste princípio é a elaborada estrutura das camadas eletrônicas dos átomos e a maneira como átomos partilham eletrons na formação da variedade de moléculas ou substância químicas e a gama de suas combinações (química). Um átomo eletricamente neutro contém eletrons ligados em número igual ao de protons de seu núcleo. Como os eletrons são fermions, o princípio de exclusão de Pauli os proíbe de ocupar o mesmo estado quântico, e por isso os eletrons tem que se "empilhar" em estados quânticos diversos no interior de um átomo.

Considere, por exemplo, um átomo de hélio neutro, que tem dois eletrons ligados. Ambos podem ocupar o estado de mais baixa energia ( $1s$ ) mas para isso têm que ter spins opostos. Isto não viola o princípio de Pauli porque o spin é parte da caracterização do estado quântico do eletron, e por isso os dois eletrons ocupam estados quânticos diferentes. No entanto, o spin só pode ter dois valores diferentes (ou autovalores). Num átomo de lítio, que contém tres eletrons ligados, o terceiro eletron não pode ocupar um estado  $1s$ , já que resultaria com o spin, e portanto o estado quântico, igual a algum dos dois primeiros, e tem que ocupar um dos estados  $2s$  de energia mais alta. De forma análoga, os elementos sucessivos vão requerer que os eletrons adicionais vão ocupando estados de energia cada vez mais alta, a cada vez que um número par de eletrons esgota os estados disponíveis no estado anterior. As propriedades químicas de uma substância depende fortemente do número de eletrons em sua camada mais externa, o que dá origem à tabela periódica dos elementos.

Em condutores e semi-condutores, elétrons livres têm que partilhar o espaço total disponível no interior do material - e por isso seus níveis de energia se empilham criando uma estrutura de bandas a partir de cada nível de energia atômico. Em bons condutores (metais) os eletrons estão tão fortemente degenerados que eles acabam por não contribuir de forma significativa para a capacidade térmica do metal. Muitas propriedades mecânicas, elétricas, magnéticas, ópticas e químicas dos sólidos são consequências diretas da repulsão de Pauli entre eletrons livres ou semi-livres.

A Astronomia mostra outra demonstração espetacular deste efeito, na forma de estrelas anãs brancas e estrelas de nêutron. Em ambos os tipos de objetos, a estrutura atômica usual da matéria ordinária é quebrada por forças gravitacionais enormes, fazendo com que a estabilidade seja suportada apenas pela "pressão de degenerescência". Esta forma exótica de matéria é chamada de matéria degenerada. Nas anãs brancas, os átomos são impedidos de colapsar uns sobre os outros pela pressão de degenerescência de seus eletrons. Nas estrelas de neutrons, que exibem forças gravitacionais ainda mais intensas, os eletrons e os protons colapsam formando neutrons, que são capazes de produzir pressões de degenerescência maiores. Os neutrons são os objetos mais "rígidos" conhecidos - seu módulo de Young, ou mais apropriadamente módulo de rigidez é 20 ordens de grandeza maior que o do diamante.

De acordo com a relatividade geral, as forças gravitacionais no centro de um buraco negro se tornam tão intensas que toda a matéria se quebra em seus constituintes fundamentais, que são supostamente puntiformes e sem estrutura interna. Todas estas partículas poderiam se empilhar em um ponto zero dimensional porque as forças gravitacionais seriam maiores que a pressão de degenerescência. Isto parece violar o princípio de exclusão de Pauli, mas já que o interior de um buraco negro está além do horizonte de eventos, ele é inacessível a verificação experimental e esta hipótese permanece sem comprovação possível.

## Ver também

- Forças de troca
- Interação de troca
- Simetria de troca
- Regra de Hund

[1] <http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Lewis-1916/Lewis-1916.html>

- Dill, Dan. *Notes on General Chemistry (2nd ed.)*. [S.l.]: W. H. Freeman, 2006. ISBN 1-4292-0068-5
- Griffiths, David J.. *Introduction to Quantum Mechanics (2nd ed.)*. [S.l.]: Prentice Hall, 2004. ISBN 0-13-805326-X
- Liboff, Richard L.. *Introductory Quantum Mechanics*. [S.l.]: Addison-Wesley, 2002. ISBN 0-8053-8714-5
- Massimi, Michela. *Pauli's Exclusion Principle*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005. ISBN 0-521-83911-4
- Tipler, Paul; Llewellyn, Ralph. *Modern Physics (4th ed.)*. [S.l.]: W. H. Freeman, 2002. ISBN 0-7167-4345-0

## Ligações externas

- Nobel Lecture: Exclusion Principle and Quantum Mechanics ([http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1945/pauli-lecture.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1945/pauli-lecture.html)) Testemunho de Pauli sobre o desenvolvimento do princípio de exclusão.

# Representação de Dirac

Na mecânica quântica, a **Representação de Dirac** ou **Representação de Interação** é uma intermediação entre a Representação de Schrödinger e a Representação de Heisenberg. Considerando que nas outras duas representações ou o vetor do estado quântico ou o operador possuem dependência com o tempo, na Representação de Dirac ambas possuem parte da dependência do tempo dos observáveis.

Equações que incluem operadores agindo em tempos distintos, que são comportadas na Representação de Dirac, não necessariamente serão comportadas nas representações de Schrödinger e Heisenberg. Isto é porque transformações unitárias do tempo se relaciona com operadores de uma representação com o operador análogo da outra representação.

## Definição

Operadores e vetores dos estados quânticos na Representação de Dirac são relacionados pela mudança de base para aqueles operadores e vetores na Representação de Schrödinger.<sup>[1]</sup>

Para alternar na Representação de Dirac, nós dividimos o hamiltoniano da Representação de Schrödinger em duas partes,  $H_S = H_{0,S} + H_{1,S}$ . Qualquer escolha das partes nos dará uma Representação de Dirac válida, mas para nos ser útil na simplificação do problema, as partes serão escolhidas de forma que  $H_{0,S}$  será facilmente resolvido e  $H_{1,S}$  conterá as partes mais difíceis de analisar deste sistema.

Se o hamiltoniano for dependente do tempo (por exemplo, se o sistema quântico interagir com um campo elétrico aplicado externo que varia com o tempo), normalmente nos será vantajoso incluir explicitamente os termos dependentes do tempo com  $H_{1,S}$ , deixando o  $H_{0,S}$  independente do tempo. Nós iremos assumir que este será o caso. (se existir um contexto em que isto faça sentido ter um  $H_{0,S}$  dependente do tempo, então deve-se trocar  $e^{\pm iH_{0,S}t/\hbar}$  pelo operador de evolução).

## Vetor do estado quântico

O vetor do estado quântico na Representação de Dirac é definido como <sup>[2]</sup>

$$|\psi_I(t)\rangle = e^{iH_0, st/\hbar} |\psi_S(t)\rangle$$

Onde  $|\psi_S(t)\rangle$  é o mesmo vetor da Representação de Schrödinger.

## Operadores

Um operador na Representação de Dirac é definido como

$$A_I(t) = e^{iH_0, st/\hbar} A_S(t) e^{-iH_0, st/\hbar}.$$

Perceba que  $A_S(t)$  não será dependente de  $t$  e pode ser reescrito como  $A_S$ .

## Operador hamiltoniano

Para o operador  $H_0$  a Representação de Dirac e Schrödinger são idênticas

$$H_{0,I}(t) = e^{iH_0, st/\hbar} H_{0,S} e^{-iH_0, st/\hbar} = H_{0,S}$$

Isto pode ser comprovado usando o facto que os operadores comutáveis com funções diferenciáveis. Este operador em particular também pode ser escrito da forma  $H_0$  sem ambiguidade.

Para a perturbação hamiltoniana  $H_{1,I}$ , teremos

$$H_{1,I}(t) = e^{iH_0, st/\hbar} H_{1,S} e^{-iH_0, st/\hbar}$$

onde a perturbação hamiltoniana da Representação de Dirac se torna um hamiltoniano dependente do tempo (a não ser que  $[H_{1,S}, H_{0,S}] = 0$ ).

É possível de se obter a Representação de Dirac para um hamiltoniano dependente do tempo  $H_{0,S}(t)$ , mas as exponencias precisam ser substituídos pelo propagador unitário devido para  $H_{0,S}(t)$  ou mais explícito com uma integral exponencial ordenada pelo tempo.

## Matriz densidade

A matriz densidade pode se demonstrada transformando a Representação de Dirac da mesma forma como qualquer outro operador. Em particular, deixe  $\rho_I$  e  $\rho_S$  ser a matriz de densidade na Representação de Dirac e na Representação de Schrödinger, respectivamente. Se existe possibilidade de  $p_n$  ser no estado físico  $|\psi_n\rangle$ , então

## Equações da evolução temporal

### Estados da evolução temporal

Transformando a Equação de Schrödinger numa Representação de Dirac teremos:

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi_I(t)\rangle = H_{1,I}(t) |\psi_I(t)\rangle.$$

Esta equação se refere à equação Schwinger-Tomonaga.



## Operadores da evolução temporal

Se o operador  $A_S$  é independente do tempo então a evolução temporal correspondente para  $A_I(t)$  é dada por

$$i\hbar \frac{d}{dt} A_I(t) = [A_I(t), H_0].$$

Na Representação de Dirac os operadores evoluem no tempo como os operadores da Representação de Heisenberg com o hamiltoniano  $H' = H_0$ .

## Evolução temporal da matriz densidade

Transformando a equação de Schwinger-Tomonaga na linguagem da matriz densidade teremos

$$i\hbar \frac{d}{dt} \rho_I(t) = [H_{1,I}(t), \rho_I(t)].$$

## Usos da Representação de Dirac

O propósito da Representação de Dirac é nos desviar de toda dependência do tempo devido o  $H_0$  dos operadores, deixando apenas  $H_{1,I}$  afetando a dependência do tempo dos vetores do estado quântico.

A Representação de Dirac é conveniente quando considerado o efeito de uma pequena interação,  $H_{1,S}$ , sendo somado ao hamiltoniano de um sistema solucionado,  $H_{0,S}$ . Pela troca na Representação de Dirac, nós podemos usar a teoria perturbacional dependente do tempo para encontrar o efeito de  $H_{1,I}$ .

## Ver também

- Representação de Schrödinger
- Representação de Heisenberg
- Equação de Schrödinger
- Notação Bra-ket
- Teorema de Haag

[1] TOWNSEND, John S.. *A Modern Approach to Quantum Mechanics, 2nd ed.*. Sausalito, CA: University Science Books, 2000.

[2] The Interaction Picture ([http://www.nyu.edu/classes/tuckerman/stat.mechII/lectures/lecture\\_21/node2.html](http://www.nyu.edu/classes/tuckerman/stat.mechII/lectures/lecture_21/node2.html)), lecture notes from New York University

## Representação de Heisenberg

Na física a **Representação de Heisenberg**, descoberta pelo físico Werner Heisenberg, é a formulação da mecânica quântica onde os operadores (observáveis) são dependentes do tempo e o estado quântico são independentes do tempo. Isto demonstra o contraste com a Representação de Schrödinger na qual os operadores são constantes e o estado quântico se desenvolve no tempo. Estas duas representações apenas se diferem pela mudança na dependência do tempo. Formalmente falando a **Representação de Heisenberg** é a formulação da mecânica matricial numa base arbitrária, onde o *Hamiltoniano* não é necessariamente diagonal.

### Detalhes matemáticos

Na Representação de Heisenberg da mecânica quântica o estado quântico,  $|\psi\rangle$ , não se modifica com o tempo, e um observador  $A$  satisfaz a equação

$$\frac{d}{dt}A(t) = \frac{i}{\hbar}[H, A(t)] + \left(\frac{\partial A}{\partial t}\right),$$

onde  $H$  é o hamiltoniano e  $[.,.]$  é o comutador de  $A$  e  $H$ . Em certo sentido, a Representação de Heisenberg é mais natural e fundamental que a Representação de Schrödinger, especialmente para a teoria da relatividade geral e restrita.

A similaridade da Representação de Heisenberg com a física clássica é facilmente identificada ao trocar o comutador da equação acima pelos Parênteses de Poisson, então a equação de Heisenberg se tornará uma equação da mecânica hamiltoniana.

### Derivando a equação de Heisenberg

Suponha que nós tenhamos um observador  $A$  (que é um operador autoadjunto. O valor esperado de  $A$  para um dado estado  $|\psi(t)\rangle$  é dado por:

$$\langle A \rangle_t = \langle \psi(t) | A | \psi(t) \rangle$$

ou se nós escrevermos a seguinte Equação de Schrödinger

$$|\psi(t)\rangle = e^{-iHt/\hbar} |\psi(0)\rangle$$

(onde  $H$  é o hamiltoniano independente do tempo e  $\hbar$  é a Constante de Planck dividida por  $2\pi$ ) nós teremos

$$\langle A \rangle_t = \langle \psi(0) | e^{iHt/\hbar} A e^{-iHt/\hbar} | \psi(0) \rangle,$$

e então nós definiremos

$$A(t) := e^{iHt/\hbar} A e^{-iHt/\hbar}.$$

Agora obteremos

(diferenciando de acordo com a regra do produto)

(a última passagem é válida já que:  $e^{-iHt/\hbar}$  comuta com  $H$ .) Nós agora estamos à esquerda da Equação de Heisenberg do movimento

$$\frac{d}{dt}A(t) = \frac{i}{\hbar}[H, A(t)] + \left(\frac{\partial A}{\partial t}\right)$$

(onde  $[X, Y]$  é o comutador dos dois operadores e definidos como  $[X, Y] := XY - YX$ ).

Agora, se nós fizermos uso do operador de igualdade

Nós veremos que para um observador independente do tempo  $A$ , nós obteremos:

Desde as relações entre os Parênteses de Poisson e os comutadores esta relação também se aplica a mecânica

## Relacionamento do comutador

O relacionamento do comutador é bastante diferente à Representação de Schrödinger por causa da dependência do tempo dos operadores. Por exemplo, considere os operadores  $x(t_1)$ ,  $x(t_2)$ ,  $p(t_1)$  e  $p(t_2)$ . A evolução no tempo destes operadores dependem do hamiltoniano deste sistema. Para um oscilador harmônico de uma dimensão

$$H = \frac{p^2}{2m} + \frac{m\omega^2 x^2}{2}$$

A evolução da posição e do operador do momento é dada por:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}x(t) &= \frac{i}{\hbar}[H, x(t)] = \frac{p}{m} \\ \frac{d}{dt}p(t) &= \frac{i}{\hbar}[H, p(t)] = -m\omega^2 x\end{aligned}$$

Pela diferenciação de ambas equações e solucionando com as devidas condições iniciais

$$\begin{aligned}\dot{p}(0) &= -m\omega^2 x_0 \\ \dot{x}(0) &= \frac{p_0}{m}\end{aligned}$$

nos leva a:

$$\begin{aligned}x(t) &= x_0 \cos(\omega t) + \frac{p_0}{\omega m} \sin(\omega t) \\ p(t) &= p_0 \cos(\omega t) - m\omega x_0 \sin(\omega t)\end{aligned}$$

Agora, nós estamos prontos para diretamente comutar a relação do comutador:

$$\begin{aligned}[x(t_1), x(t_2)] &= \frac{i\hbar}{m\omega} \sin(\omega t_2 - \omega t_1) \\ [p(t_1), p(t_2)] &= i\hbar m\omega \sin(\omega t_2 - \omega t_1) \\ [x(t_1), p(t_2)] &= i\hbar \cos(\omega t_2 - \omega t_1)\end{aligned}$$

Perceba que para  $t_1 = t_2$ , simplesmente obteremos a já conhecida relação de comutação canônica.

## Ver também

- Teorema de Ehrenfest
- Covariância de Lorentz
- Representação de Schrödinger
- Representação de Dirac
- Equação de Schrödinger
- Notação Bra-ket

## Ligações externas

- No capítulo 2 há uma introdução para a Representação de Heisenberg <sup>[1]</sup> (em inglês)

## Referências

[1] <http://www.quantumfieldtheory.info>

# Representação de Schrödinger

Na mecânica quântica, uma função de estado é uma combinação linear (uma superposição) de valor próprio. Numa **Representação de Schrödinger**, o estado de um sistema evolui com o tempo, onde a evolução para um sistema quântico fechado é provocada por operador unitário chamado de operador da evolução temporal. Isto difere de uma Representação de Heisenberg onde os estados são constantes enquanto os observáveis evoluem com o tempo. As estatísticas de medição são as mesmas em ambas as representações.

## O operador de evolução temporal

### Definição

O operador de evolução temporal  $U(t, t_0)$  é definido como:

$$|\psi(t)\rangle = U(t, t_0)|\psi(t_0)\rangle$$

Isto é, quando este operador está agindo no estado "ket" em  $t_0$  no dá o estado "ket" em um tempo  $t$ . Para "bras", nós temos:

$$\langle\psi(t)| = \langle\psi(t_0)|U^\dagger(t, t_0)$$

### Propriedades

#### Primeira propriedade

A operador da evolução temporal deve ser unitário. Isto é necessário porque nós precisamos que a norma do estado "ket" não mude com o tempo. Isto é,

Em consequência disto,

$$U^\dagger(t, t_0)U(t, t_0) = I(U(t, t_0)).$$

#### Segunda propriedade

Distintamente  $U(t_0, t_0) = I$ , a função identidade. Como:

$$|\psi(t_0)\rangle = U(t_0, t_0)|\psi(t_0)\rangle$$

#### Terceira propriedade

A evolução temporal de  $t_0$  para  $t$  pode ser vista como a evolução temporal de  $t_0$  para um tempo  $t_1$  indeterminado e de  $t_1$  para o tempo final  $t$ . Então conclui-se:

$$U(t, t_0) = U(t, t_1)U(t_1, t_0)$$

## Equação diferencial para o operador da evolução temporal

Se dermos, por convenção, o índice  $t_0$  no operador da evolução temporal de forma que  $t_0 = 0$  e escrevermos isto com  $U(t)$ . A Equação de Schrödinger pode ser re-escrita da seguinte forma:

$$i\hbar \frac{d}{dt}U(t)|\psi_e(0)\rangle = HU(t)|\psi_e(0)\rangle$$

Onde  $H$  é o Hamiltoniano para o sistema. Como  $|\psi(0)\rangle$  é uma constante de ket (o estado ket é da forma  $t = 0$ ), nós vemos que o operador da evolução temporal obedece a Equação de Schrödinger:

$$i\hbar \frac{d}{dt}U(t) = HU(t)$$

$$U(t) = e^{-iHt/\hbar}.$$

Onde nós também usamos o facto que  $t = 0$ ,  $U(t)$  precisa reduzir para a função identidade. Assim obteremos:

$$|\psi(t)\rangle = e^{-iHt/\hbar} |\psi(0)\rangle.$$

Perceba que  $|\psi(0)\rangle$  é um ket arbitrário. Apesar de que, se o ket inicial é um valor próprio do hamiltoniano, com o valor próprio  $E$ , nós temos:

$$|\psi(t)\rangle = e^{-iEt/\hbar} |\psi(0)\rangle.$$

Assim, vemos que os valores próprios do hamiltoniano são estados estacionários, eles apenas escolhem um fator de fase global já que eles evoluem com o tempo. Se o hamiltoniano é dependente do tempo, mas os hamiltonianos de diferentes tempo comutam, então o operador da evolução temporal pode ser escrito da forma:

$$U(t) = \exp\left(-\frac{i}{\hbar} \int_0^t H(t') dt'\right).$$

Uma alternativa para a Representação de Schrödinger é trocar para uma rotação de referências de quadros, que seja rotacionada pelo propagador do movimento. Desde que a rotação ondulatória seja agora assumida pelo próprio referencial, uma função de estados não perturbados surge para ser verdadeiramente estáticos.

## Ver também

- Representação de Heisenberg
- Equação de Hamilton–Jacobi
- Representação de Dirac

## Leitura recomendada

- *Principles of Quantum Mechanics* by R. Shankar, Plenum Press. (em inglês)

---

## Sobreposição quântica

---

**Superposição Quântica** é a aplicação do princípio da superposição da Mecânica Quântica. O princípio da superposição é a adição de amplitudes de ondas por interferência. Na mecânica quântica é a amplitude de funções de ondas, ou vetores de estado que são somados. Isso ocorre quando um objeto simultaneamente "possui" dois ou mais valores para uma quantidade observável (e.g. a posição ou energia de uma partícula).

Mais especificamente, na mecânica quântica, qualquer quantidade observável corresponde a um autovetor (auto estado) de um operador linear Hermitiano. A combinação linear de dois ou mais autovetores resulta em uma sobreposição de dois ou mais valores de uma quantidade observável. Se a "quantidade" é medida, o postulado (da mecânica quântica) que fala a respeito de projeção afirma que o estado será aleatoriamente colapsado em um dos valores da superposição (com probabilidade proporcional a amplitude do autovetor na combinação linear).

Um questão que naturalmente aparece é: Por que objetos e eventos macroscópicos (que obedecem as leis newtonianas) não parecem mostrar propriedades da mecânica quântica (como a superposição). Em 1935, Schrödinger descreveu um experimento já bem conhecido hoje como o gato de Schrödinger, que mostra as dissonâncias entre a mecânica quântica e a física newtoniana.

De fato, a sobreposição quântica resulta em vários efeitos diretamente observáveis, como os padrões de interferências das ondas em experimentos com luz.

### Veja mais

- Livro Wiki sobre Computação Quântica - Avançado <sup>[1]</sup>
- Computador quântico
- Gato de Schrödinger

### Referências

[1] [http://pt.wikibooks.org/wiki/Computa%C3%A7%C3%A3o\\_Qu%C3%A2ntica](http://pt.wikibooks.org/wiki/Computa%C3%A7%C3%A3o_Qu%C3%A2ntica)

## Teorema de Ehrenfest

O **Teorema de Ehrenfest**, nomeado a partir de Paul Ehrenfest, físico e matemático austríaco, relaciona a derivada do tempo do valor esperado para um operador na mecânica quântica para o comutador deste operador com o Hamiltoniano do sistema. Isto é:

$$\frac{d}{dt}\langle A \rangle = \frac{1}{i\hbar}\langle [A, H] \rangle + \left\langle \frac{\partial A}{\partial t} \right\rangle$$

onde  $A$  é algum operador da mecânica quântica e  $\langle A \rangle$  é seu valor esperado.

O Teorema de Ehrenfest é obviamente a Representação de Heisenberg da mecânica quântica, onde isto é apenas o valor esperado do momento da Equação de Heisenberg.

O teorema também é altamente relacionado com o Teorema de Liouville da mecânica hamiltoniana, que envolve os Parênteses de Poisson ao invés do comutador.

### Derivação

Suponha que o sistema seja apresentado em um estado quântico  $\Phi$ . Se nós quisermos saber a derivada do tempo instantânea do valor esperado de  $A$ , que é, por definição:

$$= \int \left( \frac{\partial \Phi^*}{\partial t} \right) A \Phi \, dx^3 + \left\langle \frac{\partial A}{\partial t} \right\rangle + \int \Phi^* A \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) \, dx^3,$$

onde nós temos integrando por todo espaço. Se nós aplicarmos a Equação de Schrödinger, encontraremos isto:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{1}{i\hbar} H \Phi$$

e isto:

$$\frac{\partial \Phi^*}{\partial t} = \frac{-1}{i\hbar} \Phi^* H^* = \frac{-1}{i\hbar} \Phi^* H.$$

Perceba que  $H = H^*$  porque o Hamiltoniano é um operador autoadjunto. Colocando isto na equação acima nós obteremos:

Diversas vezes (mas não sempre) o operador  $A$  é independente do tempo, então sua derivada será zero e nós poderemos ignorar o último termo da equação.

### Exemplo geral

Pelo exemplo mais geral possível de uma partícula de grande massa se movendo em um vetor potencial, o Hamiltoniano é simplesmente:

$$H(x, p, t) = \frac{p^2}{2m} + V(x, t)$$

onde  $x$  é simplesmente a localização da partícula. Suponha que nós quiséssemos saber a mudança instantânea do momento  $p$ . Utilizando o teorema de Ehrenfest, teremos:

$$\frac{d}{dt}\langle p \rangle = \frac{1}{i\hbar}\langle [p, H] \rangle + \left\langle \frac{\partial p}{\partial t} \right\rangle = \frac{1}{i\hbar}\langle [p, V(x, t)] \rangle$$

já que o operador  $p$  comuta com ele mesmo e não obtém dependência com o tempo. Expandindo o lado direito da equação, substituindo  $p$  por  $-i\hbar\nabla$ , nós obteremos:

$$\frac{d}{dt}\langle p \rangle = \int \Phi^* V(x, t) \nabla \Phi \, dx^3 - \int \Phi^* \nabla (V(x, t) \Phi) \, dx^3$$

$\frac{d\langle p \rangle}{dt} = - \int \Psi^* \nabla V(x, t) \Psi dx = - \int \Psi^* V'(x, t) \Psi dx$ .  
Após adicionar a regra do produto ao segundo termo, teremos:

$$\begin{aligned} &= - \int \Psi^* (\nabla V(x, t)) \Psi dx \\ &= \langle -\nabla V(x, t) \rangle = \langle F \rangle, \end{aligned}$$

mas nós reconheceremos isto como a segunda lei de Newton.

Similarmente nós poderemos obter a mudança de posição instantânea do valor esperado.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \langle x \rangle &= \frac{1}{i\hbar} \langle [x, H] \rangle + \left\langle \frac{\partial x}{\partial t} \right\rangle = \\ &= \frac{1}{i\hbar} \langle [x, \frac{p^2}{2m} + V(x, t)] \rangle + 0 = \frac{1}{i\hbar} \langle [x, \frac{p^2}{2m}] \rangle = \\ &= \frac{1}{i\hbar} \langle [x, \frac{p^2}{2m} + V(x, t)] \rangle = \frac{1}{i\hbar 2m} \langle [x, p] \frac{d}{dp} p^2 \rangle = \\ &= \frac{1}{i\hbar 2m} \langle i\hbar 2p \rangle = \frac{1}{m} \langle p \rangle \end{aligned}$$

Este resultado é novamente em acordo com a equação clássica.

## Teoria das variáveis ocultas

Na física, uma **teoria das variáveis ocultas** é defendida por uma minoria de físicos que argumentam que a natureza estatística da mecânica quântica implica que ela é incompleta; ela é realmente aplicável somente aos conjuntos de partículas; novos fenômenos físicos além da mecânica quântica são necessários para explicar um evento individual.

A mecânica quântica é não determinística, o que significa que ela geralmente não prediz a obtenção de qualquer medição com certeza. Ao invés disto, ela simplesmente nos informa a probabilidade de obter determinadas saídas. Isto nos leva para uma estranha situação onde as medições de uma certa propriedade em dois sistemas *idênticos* podem fornecer diferentes respostas. A questão que naturalmente surge é se haveria uma realidade mais profunda escondida por debaixo da mecânica quântica, para ser descrita por uma teoria mais fundamental que possa sempre prever as saídas de cada medição com certeza. Existe uma analogia com a pesquisa de intenção de voto: Não é que a intenção seja indefinida, mas somente se um amostra razoável da população foi consultada ela estará de acordo com a opinião geral.

Em outras palavras, a mecânica quântica por definição *deve ser* uma descrição incompleta da realidade. Para alguns físicos este grau de indeterminação é um fato objetivo. Uma teoria assim é conhecida como teoria das variáveis ocultas. A maioria acredita, porém, que não há uma realidade mais profunda na mecânica quântica — e, de fato, os experimentos tem mostrado que variáveis ocultas são incompatíveis com observações.

Em 1935, Einstein, Podolsky e Rosen escreveram um trabalho de quatro páginas chamados "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?" [1], que argumenta que tal teoria é não somente possível, mas de fato necessária, propondo o paradoxo EPR como prova. Em 1964, John Bell mostrou, através do seu famoso teorema com suas *desigualdades de Bell*, que o tipo de teoria proposta por Einstein, Podolsky e Rosen produzem previsões experimentais diferentes das fornecidas pela mecânica quântica ortodoxa. Outro obstáculo significativo para a teoria de variáveis ocultas é o teorema de Kochen-Specker.

Físicos como Alain Aspect têm realizado experimentos que podem ser interpretados como uma demonstração que estas considerações são corretas, mas as esperanças por uma teoria de variáveis local ocultas ainda estão muito vivas.

Uma teoria das variáveis ocultas, com seu dito determinismo, que é consistente com mecânica quântica devem ser não-locais, mantendo a existência de relações causais instantâneas entre entidades físicas separadas. *Teorias não locais*, isto é, teorias que permite aos sistemas interagirem a distância com velocidades maiores do que a velocidade



por Louis de Broglie no final de 1920. A teoria atualmente mais bem conhecida de variáveis ocultas, a mecânica Bohmian, do físico e filósofo David Bohm, criada em 1952, é uma teoria de variáveis ocultas não-local.

A interpretação de Bohm ainda goza de uma popularidade modesta entre os físicos, embora a maioria ache que ela seja teoricamente deselegante. Porém, não há consenso. O que Bohm fez, baseado na idéia original de de Broglie, foi posicionar a partícula quântica, por exemplo, um elétron, e um 'onda guia' oculta que governa seu movimento. Portanto, nesta teoria os elétrons são claramente definidos como partículas. Quando se realiza um experimento de dupla fenda (ver dualidade partícula-onda), ele irá passar através de uma fenda ou da outra. Contudo, sua escolha de fenda não é aleatória, mas governada pela onda guia, resultando no padrão de onda observável.

Esta visão contradiz a idéia simples de eventos locais que é usada no atomismo clássico e na teoria da relatividade. Isto aponta para uma visão mais holística, a de que o mundo é interdependente e está interagindo. De fato, o próprio Bohm se irritou com o aspecto holístico da teoria quântica em anos posteriores, quando ele começou a interessar pelas idéias de J. Krishnamurti. A interpretação de Bohm (como também de outros) foi tida como base de alguns livros que tentavam conectar a física como misticismo oriental e a "consciência".

A principal franqueza da teoria de Bohm é que ela parece ser tramada — o que ela realmente é. Ela foi deliberadamente criada para fornecer predições as quais são em todos detalhes idênticos a mecânica quântica. Sua intenção não era fazer uma contra-posposta séria, mas demonstrar que uma teoria de variáveis ocultas também era possível. Isto era realmente um atalho importante. Sua esperança era a de que isto poderia levar a novos *insights* e experimentos que poderiam levar a física além da teoria quântica atual.

Outro tipo de teoria determinística<sup>[2]</sup> foi recentemente introduzida por Gerard 't Hooft. Esta teoria foi motivada pelos problemas que foram encontrados quando se tentou formular uma teoria unificada da gravitação quântica.

A maioria dos físicos, contudo, tem a convicção que a verdadeira teoria do universo não é uma teoria de variáveis ocultas e que as partículas não têm qualquer informação extra que não esteja presente na sua descrição feita pela mecânica quântica. Estas outras interpretações da mecânica quântica tem seus próprios propósitos filosóficos. Um número muito pequeno de físicos acreditam que o realismo local é correto e que a mecânica quântica esteja em última instância incorreta.

## Referências

[1] [http://prola.aps.org/pdf/PR/v47/i10/p777\\_1](http://prola.aps.org/pdf/PR/v47/i10/p777_1)

[2] Gerard 't Hooft, *Quantum Gravity as a Dissipative Deterministic System*, Class. Quant. Grav. **16**, 3263-3279 (1999) preprint (<http://xxx.lanl.gov/abs/gr-qc/9903084>).

## Ver também

- Teoria local variáveis ocultas
- Teorema de Bell
- Experimentos teste de Bell
- Mecânica Quântica
- Interpretação de Bohm

# Teoria de tudo

Uma **Teoria de Tudo**, ou **teoria do todo**, ou ainda **teoria unificada** ou **unificadora**, expressão mais simples para **Teoria da Grande Unificação**, ou **TGU** (ou **ToE** por suas iniciais em inglês), é uma teoria científica hipotética que unificaria, procuraria explicar e conectar em uma só estrutura teórica, todos os fenômenos físicos (juntando a mecânica quântica e a relatividade geral) num único tratamento teórico e matemático.

Inicialmente, o termo foi usado com uma conotação irônica para referir-se a várias teorias sobregeneralizadas. Depois o termo se popularizou na Física quântica ao descrever uma teoria que poderia unificar ou explicar através de um modelo simples de teorias de todas as interações fundamentais da natureza.

Outros termos, não inteiramente sinônimos, empregados para referir-se ao mesmo conceito são **grande teoria unificada**, **teoria de campos unificada** e **teoria do campo unificado**.

## Noções básicas

Houve numerosas teorias de tudo propostas por físicos teóricos no século passado, mas até agora nenhuma tem sido capaz de apresentar uma prova experimental, têm havido tremendas dificuldades para que suas teorias tenham resultados experimentais estáveis. Albert Einstein tentou desenvolver uma teoria de tudo. No seu tempo se acreditava que a única tarefa seria unificar a relatividade geral e o eletromagnetismo. O primeiro problema em produzir uma teoria de tudo é que as teorias aceitas, como a mecânica quântica e a relatividade geral, são radicalmente diferentes nas descrições do universo: as formas possíveis de combiná-las conduzem rapidamente à "renormalização" do problema, onde a teoria não nos dá resultados finitos para dados quantitativos experimentais. Finalmente, um número de físicos não espera que a teoria de tudo seja descoberta.

As teorias pretendentes a serem teorias de unificação têm grande importância em cosmologia, especialmente na descrição dos fenômenos mais primordiais da evolução do universo, em especial nos primeiros instantes posteriores ao Big Bang, como os que determinam o decaimento dos prótons.<sup>[1]</sup> Atualmente um dos obstáculos existente é o gráviton, que embora tenha a sua existência sido prevista teoricamente ainda não foi confirmado experimentalmente.

A Teoria das Cordas assume-se como a maior candidata a uma Teoria de Tudo. Igualmente, assumem os seus pesquisadores e defensores que a Teoria M seria a teoria da grande unificação, ou ainda a Gravitação Quântica em Loop. Podemos também atribuir à Teoria do Tudo as teorias do "Mundo em 10 dimensões" de Michael Green e John Schwartz (1989) e dos "Universos múltiplos em 11 dimensões" de Edward Witten (1995).

Afirmam alguns pesquisadores de uma Teoria de Grande Unificação que existem na natureza os chamados "campos de Higgs", relacionados com o bóson de Higgs, os quais determinariam a massa das partículas.<sup>[2]</sup>

## Antecedentes históricos

O conceito de uma "teoria de tudo" é arraigada em uma velha idéia de causalidade, famosa expressão de Laplace:

Um intelecto que em um certo momento pudesse conhecer todas as forças que estabelecem a natureza em movimento, e todas as posições de todos os temas que essa natureza compõe, se esse intelecto fosse também tão suficiente para apresentar esses dados em uma análise, que pudesse unir em uma simples fórmula os movimentos dos grandes corpos do universo e o muito pequeno do átomo; para esse tipo de intelecto nada será incerto e o futuro como o passado seria o presente para esses olhos

— *Essai philosophique sur les probabilités*, introdução. 1814

Ainda que isto possa ser citado como determinista, em uma "simples fórmula" pode todavia existir se a física é fundamentalmente probabilística, como diz a moderna mecânica quântica.

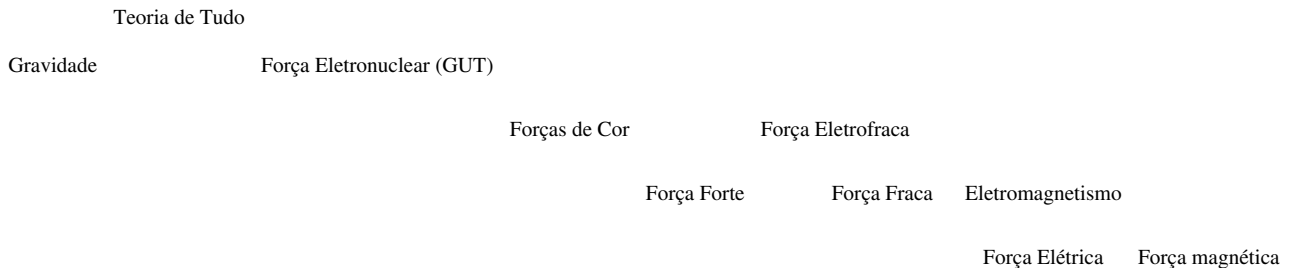
Desde os tempos dos antigos gregos, os filósofos pré-socráticos e seus posteriores têm especulado que a aparente

forças poderiam por último reduzir-se a uma força de contato entre pequenas partículas sólidas.<sup>[3]</sup> Isto foi abandonado depois da aceitação das forças gravitacionais a grande distância propostas por Isaac Newton; mas ao mesmo tempo o trabalho de Newton em seu *Principia* proveu a primeira dramática evidência empírica da unificação de forças que nesse momento pareciam diferentes: o trabalho de Galileo na gravitação terrestre, as leis de Kepler do movimento planetário e os fenômenos de marés foram todas quantitativamente explicadas por uma simples lei, chamada de a gravitação universal. Em 1820, Hans Christian Oersted descobriu uma conexão entre a eletricidade e o magnetismo, muitas décadas de trabalho culminaram na teoria do electromagnetismo de James Clerk Maxwell. Também durante os séculos XIX e XX, gradualmente apareceram muitos exemplos de forças de contato, elasticidade, viscosidade, fricção, pressão- resultados das interações elétricas entre pequeníssimas partículas da matéria. Ao final de 1920, a nova mecânica quântica mostrou que as interações químicas se tratavam de forças elétricas (quânticas), justificando o que Dirac havia dito sobre que as leis físicas necessárias para a teoria matemática de uma grande parte dos físicos e químicos eram então completamente conhecidos.<sup>[4]</sup>

As tentativas de unificar a gravidade com o magnetismo se remontam aos experimentos de 1849-50 de Michael Faraday<sup>[5]</sup> Depois da teoria gravitacional (relatividade geral) de Einstein publicada em 1915, a busca de uma teoria do campo unificado que combine gravidade com eletromagnetismo se tornou mais séria. Ao mesmo tempo, se tornou plausível se dizer que não existiam mais forças fundamentais. Proeminentes contribuições foram as outorgadas por Gunnar Nordstrom, Hermann Weyl, Arthur Eddington, Theodor Kaluza, Oskar Klein, e a mais notável dada por Einstein e seus colaboradores. Nenhuma destas propostas tiveram êxito.<sup>[6]</sup> A busca foi interrompida pelo descobrimento das forças fraca e forte, que não podiam ser agregadas dentro da gravidade ou do eletromagnetismo. Outro obstáculo foi a aceitação de que a mecânica quântica teria de ser incorporada desde o início, não emergiu como uma consequência da determinística teoria unificada, como Einstein esperava. Gravidade e Eletromagnetismo podem sempre coexistir pacificamente como tipos de forças de Newton, mas por muitos anos se tem observado que a gravidade não pode ser incorporada no panorama quântico, deixando-a só ao unificar-se com outras forças fundamentais. Por esta razão este trabalho de unificação no século XX se focalizou em entender as três forças "quânticas": eletromagnetismo e as forças nucleares fraca e forte. As duas primeiras foram unificadas em 1967-8 por Sheldon Glashow, Steven Weinberg, e Abdus Salam.<sup>[7]</sup> As forças forte e a eletrofraca coexistem no modelo padrão de partículas, mas se mantém distintas. Muitas teorias unificadas (o GUT por suas siglas em inglês) têm sido propostas para unificá-las. Ainda que a simplicidade das GUTs tem sido descartadas pela experiência, a idéia geral, especialmente quando se vincula com as supersimetrias, continua firmemente a favor da comunidade teórica de física.

## A Física moderna

Na corrente principal da física atual, a Teoria de Tudo poderia unificar todas as interações fundamentais da natureza, que são consideradas como quatro: gravitação, a força nuclear forte, a força nuclear fraca e a eletromagnética. Porque a força forte pode transformar partículas elementares de uma classe a outra, a teoria de tudo deveria produzir uma profunda compreensão de vários diferentes tipos de partículas como de diferentes forças. O padrão previsível das teorias é o seguinte:



Adicionalmente às forças listadas aqui, a moderna cosmologia requer uma força inflacionária, energia escura, e também matéria escura composta de partículas fundamentais fora da cena do modelo padrão.

A unificação eletrofraca é uma "simetria quebrada": o eletromagnetismo e a força fraca parecem distinguir-se a baixas energias porque as partículas portam forças fracas, os bósons W e Z têm a massa de aproximadamente de  $100 \text{ GeV}/c^2$ , enquanto que o fóton, que portam a força eletromagnética, não têm massa. A altas energias os bósons W e Z podem criar massa facilmente e a natureza unificada das forças aparece. A grande unificação se espera que trabalhe em um caminho similar, mas as energias na ordem de  $10^{16} \text{ GeV}$  ou muito maiores não podem ser obtidas por nenhum acelerador de partículas na terra. Por analogia, a unificação das forças GUT com a gravidade se espera que seja a uma energia de Planck, em torno de  $10^{19} \text{ GeV}$ .

Poderia ser prematuro a busca por uma teoria de tudo quando não existe evidência direta de uma força eletronuclear e ainda em qualquer caso existem muitas diferentes propostas de GUTs. De fato o nome deliberado está envolto no Híbris. Entretanto muitos físicos crêem que a unificação é possível, devido em parte à história de convergência até uma mesma teoria. A supersimetria se vê plausível não só por sua "beleza" teórica, senão por sua naturalidade ao produzir grandes quantidades de matéria escura, e a força inflacionária pode ser relacionada a GUT físicas (ainda que não parece formar parte inevitável da teoria). E agora as GUTs não são claramente a resposta final. Tanto o modelo padrão atual como a proposta GUT são teorias quânticas de campos que requerem a problemática técnica da renormalização de respostas a campos sensíveis. É usual considerar-se como um sinal de que há uma só teoria de campos efetiva omitindo fenômenos cruciais só a muito altas energias. Além disso a inconsistência entre a mecânica quântica e a relatividade geral implica que uma das duas deve ser substituída por uma teoria que incorpore a gravidade quântica.

A única candidata principal a uma teoria de tudo no momento é a teoria das supercordas. Investigações em curso sobre a Gravidade quântica em loop pode eventualmente lançar um passo fundamental na teoria de tudo, mas este não é o principal objetivo. Estas teorias pretendem tratar com a renormalização do problema mediante o estabelecimento de algumas no limite inferior de escalas de comprimento possível. A teoria de supercordas e a supergravidade (se crê que ambas são casos especiais de uma teoria M por definir-se) supõe que o universo atualmente tem mais dimensões que o que pode-se ver-se a primeira vista, três espaciais e uma temporal. A motivação por trás desta abordagem começa com a teoria Kaluza-Klein onde se notou que ao aplicar a relatividade geral em um universo de 5 dimensões (uma dimensão mais uma pequena dimensão compactada) a manteria equivalente à relatividade geral, de 4 dimensões, com las leis de Maxwell do eletromagnetismo (também em 4 dimensões). Isto tem dado lugar a esforços para trabalhar-se com teorias de muitas dimensões nas que se espera que se possam produzir equações que sejam similares às conhecidas em física. A noção de extradimensões também ajuda a resolver o problema da hierarquia, onde a pergunta de porque a gravidade é mais fraca que qualquer outra força. A resposta comum diz que a gravidade estaria em uma dimensão extra às outras forças.

Ao final de 1990 se notou que um dos problemas com muitas candidatas a teorias de tudo (mas particularmente com a teoria de cordas) era que estas não continham as características de predizer o universo. Por exemplo, muitas teorias da gravidade quântica podem criar universos com arbitrário número de dimensões ou com arbitrárias constantes físicas. Isto é um problema porque se o universo tem 10 dimensões, a gravidade se diluiria em 10 direções e a força gravitacional seria muito mais fraca que a que observamos.

diferentes de partículas fundamentais e forças de baixa energia.

Uma solução especulativa é que muitas dessas possibilidades são realizáveis em um ou outro dos universos possíveis, mas só um número pequeno deles são habitáveis, e portanto as constantes universais fundamentais são por último o resultado de um principio antrópico como consequência de uma teoria de tudo. Esta aproximação antrópica é claramente criticada no que tange a que a teoria é suficientemente flexível para abarcar quase qualquer observação, não poderia fazer predições úteis (como originais, falseáveis ou verificáveis). Deste ponto de vista, a teoria de cordas poderia ser considerada como pseudociência, onde uma teoria infalseável é constantemente adaptada para que os resultados experimentais se ajustem a ela.

## Relações com o teorema da incompletude de Gödel

Um pequeno número de cientistas afirma que o Teorema da incompletude de Gödel prova que qualquer tentativa de construir uma teoria de tudo está destinada ao fracasso. O teorema de Gödel diz que qualquer teoria matemática não trivial é inconsistente ou incompleta. Stanley Jaki assinalou em seu livro de 1966 "A Relevância da Física" que qualquer teoria de tudo deverá ser uma teoria matemática consistentemente não trivial, com o que deve ser incompleta. Ele afirma que condena a uma teoria determinista do tudo.<sup>[8]</sup> Freeman Dyson tinha estabelecido que:

O teorema de Gödel implica que a matemática pura é inexaurível. Não importa quantos problemas possa-se resolver, sempre haverá outros problemas que não podem ser resolvidos com as regras existentes. Porque pelo teorema de Gödel, a física é inexaurível também. As leis da física são configurações finitas de regras e incluem regras para fazer matemáticas, a fim que o teorema de Gödel se aplique a elas.

NYRB,  
Mayo 13,  
2004

—Freeman Dyson

Muitos têm interpretado esta citação para apoiar a posição de Jaki.

Stephen Hawking foi originariamente crente em uma teoria de tudo mas depois de considerar o teorema de Gödel, concluiu que esta não poderia ser obtida.

Muitas pessoas ficarão muitos desgostosas se não há uma teoria final, que possa formular um finito número de princípios. Eu pertenceria a este grupo, mas tenho mudado meu pensamento.

Gödel and the end of  
physics, Julio 20, 2002

—Stephen Hawking

Esta visão tem sido contra-argumentada por Solomon Feferman<sup>[9]</sup>, assim como por outros.

Muitos cientistas e matemáticos crêem que o teorema de Gödel é completamente irrelevante quando se discute uma teoria de tudo. O teorema de Gödel é uma declaração sobre que teoremas *eventualmente* resultariam sistemas matemáticos, onde "eventualmente" significa depois de um tempo arbitrário. O teorema de Gödel não impede que um matemático compute o que ocorre depois de qualquer quantidade de tempo, ou não previne a uma pessoa que conheça as regras para fazer os cálculos. Tudo o que o teorema de Gödel diz é que, inclusive conhecendo todas as regras, seria impossível prever que novos padrões produzirão eventualmente as regras.

## Potencial status da Teoria de Tudo

Nenhuma teoria física no momento se acredita como sendo precisamente exata. Em lugar disto, a física tem procedido por séries de "aproximações sucessivas" permitindo mais e mais precisas previsões sobre uma ampla gama de fenômenos. Muitos físicos crêem que existam muitos erros nos confusos modelos teóricos com a natureza mais íntima da realidade e sustentam que a série de aproximações nunca terminará na "verdade". Mesmo Einstein expressou sua visão em ocasiões.<sup>[10]</sup> Em seu ponto de vista podemos razoavelmente esperar por "uma" teoria de tudo onde consistente - em si mesma- incorpore todas as forças conhecidas atualmente, mas não devemos esperar ter a resposta final. Por outro lado estava aberto a opinar que apesar da aparente complexidade matemática em cada teoria,

indefinidamente.

## Referências

- [1] Universo Inflacionário - **www.astro.ufrgs.br** (<http://www.astro.ufrgs.br/univ/>)
- [2] Era Inflacionária - **www.on.br** ([http://www.on.br/site\\_edu\\_dist\\_2006/pdf/modulo5/era\\_inflacionaria.pdf](http://www.on.br/site_edu_dist_2006/pdf/modulo5/era_inflacionaria.pdf))
- [3] e.g. Shapin, Steven. *The Scientific Revolution*. [S.l.]: University of Chicago Press, 1996.
- [4] Dirac, P.A.M.. *Quantum mechanics of many-electron systems*. [S.l.: s.n.], 1929. vol. 123.
- [5] Faraday, M.. *Experimental Researches in Electricity. Twenty-Fourth Series. On the Possible Relation of Gravity to Electricity*. [S.l.: s.n.], 1850. pp. 994-995. vol. 5.
- [6] Pais (1982), Ch. 17.
- [7] e.g. Weinberg (1993), Ch. 5
- [8] Jaki, S.L.: "The Relevance of Physics", *Chicago Press*, 1966
- [9] Feferman, S. The nature and significance of Gödel's incompleteness theorems, Institute for Advanced Study, Princeton, November 17, 2006
- [10] Einstein, carta a Felix Klein, 1917. Apresentada em Pais (1982), Ch. 17.

## Teoria do campo unificado

---

Em física, uma "teoria do campo unificado" é um tipo de teoria de campo que permite que todas as forças fundamentais entre partículas elementares sejam descritas em termos de um único campo. Não há ainda nenhuma **teoria do campo unificado** aceita, e este assunto permanece como um campo aberto para pesquisa. O termo foi cunhado por Albert Einstein que tentou unificar a Teoria da Relatividade Geral com o Eletromagnetismo. Uma Teoria de tudo é muito próxima da teoria do campo unificado, mas difere por não exigir que sejam campos a base da natureza, e também por tentar explicar todas as constantes físicas da natureza.

### Campos e partículas

**Todas** as quatro forças fundamentais são mediadas por campos, que no modelo padrão de partículas, são resultado da troca de bósons. As quatro forças a serem unificadas são (em ordem decrescente de força):

- Força nuclear forte: a força responsável por manter os quarks juntos para formar os neutrons e prótons, e manter os neutros e prótons juntos para formar o núcleo. A partícula de troca que intermedia esta força é o glúon.
- Força eletromagnética: a conhecida força que age sobre partículas carregadas. O fóton é a partícula de troca desta força.
- Força nuclear fraca: uma força de repulsão e de curto alcance responsável pela radioatividade, que age sobre elétrons, neutrinos e quarks. É governada pelo bóson W.
- Força gravitacional: uma força de longo alcance que age sobre todas as partículas com massa. A suposta partícula de troca foi denominada graviton.

As teorias modernas do campo unificado tentam colocar estes quatro campos de força juntos em um único referencial. A teoria quântica entretanto, parece limitar o poder descritivo de qualquer teoria determinística.

### História

Em 1821 Hans Christian Oersted descobriu que correntes elétricas exerciam força sobre ímãs, e em 1831, Michael Faraday descobriu que campos magnéticos variáveis no tempo podiam induzir correntes elétricas. Até então, eletricidade e magnetismo eram entendidos como fenômenos não relacionados. Em 1864, James Clerk Maxwell publicou seu famoso texto sobre uma teoria dinâmica do campo eletromagnético. Este foi o primeiro exemplo de uma teoria que foi capaz de unir duas teorias de campo anteriormente separadas (eletricidade e magnetismo) e criar

## Progressos modernos

Em 1963, o físico estadunidense Sheldon Glashow propôs que a Força nuclear fraca e a eletricidade e o magnetismo poderiam ser descritas em uma teoria parcial do campo unificado, uma teoria eletrofraca. Em 1967, o físico paquistanês Abdus Salam e o estadunidense Steven Weinberg independentemente revisaram a teoria de Glashow colocando as massas das partículas W e Z a partir de quebra simétrica espontânea através do mecanismo de Higgs. Esta teoria unificada é governada pela troca de quatro partículas: o fóton, para interações eletromagnéticas, e uma partícula Z neutra e duas partículas W carregadas para a interação fraca. Como resultado da quebra por simetria espontânea, a força fraca se torna de curto alcance e os bósons Z e W adquirem massas de  $80.4$  e  $91.2 \text{ GeV}/c^2$ , respectivamente. Esta teoria obteve apoio experimental quando da descoberta das correntes neutras fracas em 1973. Em 1983, os bósons Z e W foram produzidos pela primeira vez no CERN pela equipe de Carlo Rubbia. Pela sua contribuição, Salam, Glashow e Weinberg foram agraciados com o Prêmio Nobel de Física de 1979. Carlo Rubbia e Simon van der Meer receberam o de 1984.

Depois que Gerardus 't Hooft mostrou que as interações eletrofracas de Glashow-Salam-Weinberg eram matematicamente consistentes, a teoria eletrofraca tornou-se um modelo para as futuras tentativas de unificar forças. Em 1974, Sheldon Glashow e Howard Georgi propuseram unificar as interações forte e eletrofraca em uma Grande Teoria Unificada, que teria efeitos observáveis, mas apenas para energias muito maiores do que  $100 \text{ GeV}$ . Desde então tem havido diversas propostas de Grandes Teorias Unificadas, mas nenhuma é atualmente universalmente aceita. Um dos maiores obstáculos para testes experimentais de tais teorias é a escala de energia envolvida, que é muito acima dos atuais aceleradores de partículas. Grandes Teorias Unificadas fazem previsões para a força relativa das forças forte, fraca e eletromagnética, e em 1991 o LEP determinou que teorias supersimétricas tem a relação correta de pares para uma Grande Teoria Unificada como proposta por Georgi-Glashow. Muitas Grandes Teorias Unificadas predizem que o próton pode decair, e se isto puder ser visto, detalhes do produto do decaimento poderiam fornecer dicas sobre outros aspectos da Grande Teoria Unificada. Até o presente não se sabe se o próton pode decair mas já foi determinado experimentalmente um limite inferior de  $10^{35}$  anos para a sua existência.

## O estado atual das teorias do campo unificado

A Gravidade ainda não foi incluída com sucesso em uma teoria de tudo. Tentativas de combinar o graviton com as interações forte e eletrofraca levam a dificuldades fundamentais (a teoria resultante não é renormalizável). Os físicos teóricos ainda não formularam uma teoria consistente que combine a relatividade geral com a mecânica quântica. A incompatibilidade entre as duas teorias permanece um problema de primeira ordem no campo da física. Alguns físicos teóricos atualmente acreditam que uma teoria quântica da relatividade geral talvez necessite de outros referenciais teóricos além da teoria de campos, tais como Teoria das cordas ou Geometria quântica. Uma promissora teoria de cordas é a da corda heterótica, que consegue ligar a gravidade e as outras três forças de forma aparentemente firme. Outras teorias de cordas não unificam as três forças com a gravidade de forma tão apropriada. A geometria quântica, aparentemente, não liga as forças eletrofraca e forte à gravitacional, e se assim for, falhará como uma teoria do campo unificado.

### **Ver também**

- Campo Eléctrico
- Campo Magnético
- Campo Gravitacional
- Mecânica quântica
- Teoria da relatividade geral
- Gravitação quântica
- Teoria das cordas
- Problemas em aberto da Física

### **Referências externas**

- Teoria Quântica de Campos em Espaço-tempo Curvos- Pesquisa Fapesp online  
<http://www.revistapesquisa.fapesp.br/?art=3095&bd=1&pg=1&lg=>



# Fontes e Editores da Página

**Introdução à mecânica quântica** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=19753702> *Contribuidores:* AndreHahn, Bruno Roso, Helder.wiki, Mschllindwein, Rjclaudio, 2 edições anónimas

**Antiga teoria quântica** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=21221548> *Contribuidores:* AndreHahn, Danilo.mac, Fabiano Tatsch, Mschllindwein

**Mecânica quântica** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22767811> *Contribuidores:* Acto, Adailton, Alberto Fabiano, Alessandro70, Andre01e2, Andrelz, Angeloleithold, Arthemius x, Avancoraafael, Beca, Bisbis, Blacks, Bonás, Braswiki, CSTAR, C dang, Ciro, Cursocf, Davialexsandro, Dbolgheroni, E2m, EDULAU, EuTuga, Fabiolucas, Faustino.F, Fernando S. Aldado, Freedom, Gabriel4e, Gandhiano, Gean, Helder.wiki, Jc mo, JoaoMiranda, Jorge, Kaktus Kid, Kleiner, LeonardoRob0t, Leonardomio, Leslie, Lusitana, Luís Felipe Braga, Marcelo Reis, Marcos Elias de Oliveira Júnior, MetalFenix, Mschllindwein, Munashii, Nomad, OS2Warp, Paraoale, Paulolima2711, Pietro Roveri, Reynaldo, Ribeiro Alvo, Rjclaudio, Scott MacLean, Stegop, Teles, Tiogalinha, Usien, Vanthorn, Wikihelper, X360xSilent LightStep, Xzcaoxx, Život, 128 edições anónimas

**Efeito fotoelétrico** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22772637> *Contribuidores:* 200.230.62.xxx, Aaasaf09, Bonás, Camponez, Clara C., Daimore, E2m, E2mb0t, Espardo, Evandrocunha, Fabiano Tatsch, GOE2, Giro720, JP Watrin, Jic, Jorge, Kaktus Kid, Lauro Chieza de Carvalho, Lijealso, Lorius, Manuel Anastácio, Mengue, MetalFenix, Mschllindwein, OS2Warp, Peperan, Pietro Roveri, Rar, Rodrigoedp, Rui09, Sou lá do Acre, Tomasnog, V. D. Bessa, XNoRiO, Yanguas, 50 edições anónimas

**Postulados da mecânica quântica** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=19950119> *Contribuidores:* Burmeister, Danilo.mac, Jaciara Santos, Jack Bauer00, Natashas, Rjclaudio, Stegop, Yanguas, 4 edições anónimas

**Albert Einstein** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22612108> *Contribuidores:* 200-180-185-219.paemt7003.dsl.brasiltelecom.net.br, 333, 555, ABergmann, Adailton, Aderbal Neto, Adriel, Agil, Alchimista, Alessa77, Alexanderps, Alexandrolima, AltCtrlDel, Anarchos, Anderdavid, Andreas Herzog, Andreia9 3, Andrelz, Andrew McCarthy, Antonioroberto25, Aojodragon, Arges, Arley, Augusto Reynaldo Caetano Shereiber, Auréola, Australopithecus, Badger M., Benio13, Beria, Bisbis, Blacks, Blamed, Bonás, Braswiki, Brunosl, Burmeister, CPMcayo, Campani, Carla Cristiana Carvalho, Carlos28, Chico, Choeng, ChristianH, Cinefago, Clara C., CommonsDelinker, Conhecer, Contraponto, Crazy Louco, Daimore, Danilo.mac, Danilodn, Dantadd, Danymiudo, Darwinius, Dcolli, Delemon, Der kennner, Diegomasutti, Disney, Dpc01, Dédi's, E2m, Eamaral, Eduardoferreira, Elvis ricardo de souza, Epineheiro, Eric Duff, Espardo, EuTuga, Eugénioxx7, FML, Fabsouza1, Fbat, Felipe Menegaz, Felipe P, Fernando S. Aldado, Francisco Leandro, GOE, GRS73, Gabbhh, Gaf.arq, Gaius, Gbten, Gerbilo, Get It, Gil mnogueira, Giltoncesarsilveira, Giro720, Gonçalo Veiga, Guinho br, Gunnex, Gustavob, Hashar, Heitor C. Jorge, Hounim, Icarodl, Ikescs, Immanis, Indech, Inflamavel, JBMaximillian, JCMP, Jack Bauer00, Jaques O. Carvalho, Jcrasecster, JdH, Jeferson, Joao, JoaoMiranda, Joacarlosgomesdealmeida, Joaopinho, Joatog, Jocélia Souza, Jonathan Groß, Jorge, JorgeGG, Joseolgon, João Carvalho, Jpsousadias, Juntas, Kaktus Kid, Karkov, Kleiner, Kolovata, Kpeta, Laobc, Larissandrioli, Laukinha, Leandro Drudo, Leandro Mercês Xavier, Lechatjaune, Lener23, Leonardo.stabile, LeonardoRob0t, Leonardorodrigues, Ligia, Lijealso, Linuxsbrs, Lippee, Llicastro, Lorena.ana, Lucas martinelli, Luckas Blade, Luiz Netto, Luiza Teles, Lukasdoído, Luís Felipe Braga, Mandiate, Manuel Anastácio, Manumcosta, MarceloB, MarceloEyer, Marcos Fritas seca, Marlon.tiedt, Marthavi, Martiniano Hilário, Miguel Couto, Missionary, Mobyduck, Mrcl, Mschllindwein, Muriel Gottrop, Mwaldeck, Móra, NH, Nice poa, Nickus, Novycentuz, Nrafael, Nuno Tavares, OS2Warp, Omegro, Oolong, Opraco, Orlleite, Ozymandias, PBJP, PatríciaR, Pauloddb, Pedropaulovc, Pietro Roveri, Pikolas, RSan, RafaAzevedo, Rafael.afonso, Rei-artur, Retormaire, Reynaldo, Rjclaudio, Robertogilnei, Rodolfo SN, Rodrigoedp, Rodrigogomesonetwo, Ruy Pugliesi, Rômulo Penido, Santana-freitas, Santista1982, Spoladore, T2000, Teles, Teo 027, Theus PR, ThiagoRuiz, Tiago Vasconcelos, Tidehunter2009, Treisjijs, Ts42, Tschulz, Tumnus, Ugur Basak, Um IP, Usnofa, Vanthorn, Vigia, Vsombra, Whooligan, Wikibrazilian, Willgo, Wilson simão, Ygor Nachornik, Zector, p169-92.netc.pt, 619 edições anónimas

**Constante de Planck** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22680243> *Contribuidores:* Adalberto José dos Santos, Camponez, Dalkiri, Darwinius, E2m, Edudobay, Fabiano Tatsch, Jmmbatista, Lenildo7, Mschllindwein, Nuno Tavares, PequijanFAP, Quiumen, Rafael.afonso, Scott MacLean, Wanc, Yanguas, 13 edições anónimas

**Dualidade onda-córcpúsculo** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=21927977> *Contribuidores:* Darwinius, Gabriel4e, Jic, Jo Lorib, Jorge.roberto, Leonardomio, Mschllindwein, NH, Prof.Maque, SiriusB, 10 edições anónimas

**Efeito túnel** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=21293498> *Contribuidores:* Albmont, Bigs, Darwinius, Hyju, Johnmartins, José Pedro Araújo, João Sousa, Juntas, Leonardomio, Rodrigoedp, Sombrancelha, 11 edições anónimas

**Entrelaçamento quântico** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22267855> *Contribuidores:* Anaue.costa, Bonás, Leonardomio, Lijealso, Luís Felipe Braga, Tó campos, U.m, 8 edições anónimas

**Equação de Dirac** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=20967362> *Contribuidores:* E2m, Leonardomio

**Equação de Klein–Gordon** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=21157784> *Contribuidores:* Esrbwiki, Fredxavier, Wulong

**Equação de Pauli** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=20619470> *Contribuidores:* Gean, Jonas AGX

**Equação de Schrödinger** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=21993303> *Contribuidores:* 333, Acscosta, E2mb0t, Everton137, GOE, Hdante, Lechatjaune, LeonardoRob0t, Leonardomio, Mschllindwein, Nuno Tavares, Rafael.afonso, Thom, 11 edições anónimas

**Estado quântico** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22472994> *Contribuidores:* Jatta234, Leonardomio, Lijealso, Mschllindwein, PatríciaR, Retormaire, 1 edições anónimas

**Experimento de Davisson–Germer** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22079755> *Contribuidores:* Giro720

**Experimento de Stern–Gerlach** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22058833> *Contribuidores:* Acassis, Alchimista, Charles Dias Müller, CostaJES, Jovem Werther, Lechatjaune, Leonardomio, Lijealso, Luís Felipe Braga, Mcbaras, Mengue, Rei-artur, 6 edições anónimas

**Experiência da dupla fenda** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22135558> *Contribuidores:* OnUr8, Angeloleithold, Anne Valladares, Danilo.mac, Darwinius, E2m, Fredxavier, GOE, Get It, Gustavotcabral, Hyju, Jorge, Mengue, OS2Warp, Py4nf, SnowRaptor, StormDaebak, 12 edições anónimas

**Função de onda** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=21992273> *Contribuidores:* Adailton, Danilo.mac, Jack Bauer00, Leonardomio, Luís Felipe Braga, Prss, U.m, 28 edições anónimas

**Gato de Schrödinger** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=20166698> *Contribuidores:* Bonaovox, Bozomal, Cabaesso, Cesariospin, Cyberpunk, C°Learning, Dantadd, Davemustaine, Dácio Jaegger, E2mb0t, Hybrid-2k, Hyju, JoaoMiranda, Joaoclaudio82, Kennedy da Silva Soares, LeonardoRob0t, Leonardomio, Luís Felipe Braga, Manuel Anastácio, Mariana Q. Medeiros, Mschllindwein, OS2Warp, Renan de Souza, 32 edições anónimas

**Gravitação quântica** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22577809> *Contribuidores:* Alessandro70, Cesariospin, Danprata, Fotoni, Leonardo.stabile, Luiza Teles, Quiumen, Rafael.afonso, Rolfguthmann, 22 edições anónimas

**Histórias consistentes** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=12639324> *Contribuidores:* Alessandro70, Leonardomio, Spriling

**Integração funcional** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22708125> *Contribuidores:* Clara C., E2m, Stuckkey, 3 edições anónimas

**Interpretação de Bohm** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=21247836> *Contribuidores:* Alessandro70, Cesariospin, Leonardomio, Tiago Santos, 9 edições anónimas

**Interpretação de Copenhaga** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=21273222> *Contribuidores:* Alessandro70, Alexandre Pedrassoli, C dang, Dácio Jaegger, E2m, Eduardo P, Jic, JoaoMiranda, Jorge, LeonardoRob0t, Leonardomio, Mschllindwein, PauloColacino, Tanuki Z, Thom, 1 edições anónimas

**Interpretação de muitos mundos** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22519826> *Contribuidores:* Al Lemos, Alessandro70, CSTAR, E2m, Extremophile, Fvmp, Hyju, Leonardomio, Lijealso, Llicastro, Mschllindwein, Porantim, Rei-artur, Reynaldo, Vanthorn, 8 edições anónimas

**Interpretação transacional** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=12639320> *Contribuidores:* Alessandro70, João Carvalho, Leonardomio, Nuno Tavares, Yone Fernandes

**Interpretações da mecânica quântica** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22408001> *Contribuidores:* Alessandro70, CSTAR, Cesariuspin, Denis Moura de Lima, Gfc, Leonardomio, PatríciaR, Rafael.afonso, Renatops, Spriling, Villarinho, 10 edições anónimas

---

**Lógica quântica** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=14376591> *Contribuidores:* Alessandro70, CSTAR

**Mecânica matricial** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=21458405> *Contribuidores:* Gean, Ricardo Zenn, 1 edições anónimas

**Princípio da incerteza de Heisenberg** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22689027> *Contribuidores:* Albmont, Anderson Andrade, Andrelz, BirdEgo, César Brandão, David Moseler, E2mb0t, EDULAU, Eric Duff, EuTuga, Juntas, Leonardomio, Lijealso, Ludwiglessa, MetalFenix, Mrcl, Mschlindwein, OS2Warp, Pietro Roveri, Pilha, Uderz, 35 edições anónimas

**Princípio de exclusão de Pauli** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22272186> *Contribuidores:* Alchimista, CostaJES, Danilo.mac, E2m, EDULAU, Jorge Sá Martins, João Dias UltraJohnny, Lemarlou, Leonardomio, Marcos Elias de Oliveira Júnior, Mdob, Mschlindwein, OS2Warp, Quiumen, Villarinho, 13 edições anónimas

**Representação de Dirac** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=21482590> *Contribuidores:* Ricardo Ferreira de Oliveira, Thom

**Representação de Heisenberg** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=21763438> *Contribuidores:* Thom, 1 edições anónimas

**Representação de Schrödinger** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=21273085> *Contribuidores:* Thom

**Sobreposição quântica** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22131607> *Contribuidores:* Burmeister, E=mc², Incnis Mrsi, Lijealso, NiginiOliveira, OS2Warp, 3 edições anónimas

**Teorema de Ehrenfest** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22461926> *Contribuidores:* Fabiano Tatsch, Thom

**Teoria das variáveis ocultas** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22637777> *Contribuidores:* Alessandro70, Cesariuspin, Leonardomio, Reynaldo, Santana-freitas, 7 edições anónimas

**Teoria de tudo** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=22280358> *Contribuidores:* ChristianH, Danilo.mac, E2m, Gaf.arq, Gandalf b, Hyju, Less, Odon, Quiumen, Rafael.afonso, Rei-artur, Reynaldo, Rodrigo72lopes, Villarinho, Vmadeira, 19 edições anónimas

**Teoria do campo unificado** *Fonte:* <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?oldid=21439100> *Contribuidores:* 999, Alchimista, Angeloleithold, Cesariuspin, Danilo.mac, E2m, Giro720, Mschlindwein, Prof.Maque, 5 edições anónimas

# Fontes, Licenças e Editores da Imagem

**Imagem:Quantum intro pic-smaller.png** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Quantum\\_intro\\_pic-smaller.png](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Quantum_intro_pic-smaller.png) Licença: desconhecido Contribuidores: Original uploader was Voyager at en.wikipedia

**Imagem:Young+Fringes.gif** Fonte: <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Young+Fringes.gif> Licença: GNU Free Documentation License Contribuidores: User:Mpfiz, User:Patrick Edwin Moran

**arquivo:10 Quantum Mechanics Masters.jpg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:10\\_Quantum\\_Mechanics\\_Masters.jpg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:10_Quantum_Mechanics_Masters.jpg) Licença: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Contribuidores: User:Patrick Edwin Moran

**Imagem:NASA Hydrogen spectrum.jpg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:NASA\\_Hydrogen\\_spectrum.jpg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:NASA_Hydrogen_spectrum.jpg) Licença: Public Domain Contribuidores: NASA

**Imagem:Nitrogen.Spectrum.Vis.jpg** Fonte: <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Nitrogen.Spectrum.Vis.jpg> Licença: Public Domain Contribuidores: Kurgus, Saperaud, 1 edições anónimas

**Ficheiro:Photoelectric effect.png** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Photoelectric\\_effect.png](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Photoelectric_effect.png) Licença: GNU Free Documentation License Contribuidores: User:Feitscherg

**Ficheiro:Nobel prize medal.svg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Nobel\\_prize\\_medal.svg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Nobel_prize_medal.svg) Licença: GNU Free Documentation License Contribuidores: User:Gusme

**Imagem:Einstein1921 by F Schmutzer 4.jpg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Einstein1921\\_by\\_F\\_Schmutzer\\_4.jpg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Einstein1921_by_F_Schmutzer_4.jpg) Licença: Public Domain Contribuidores: Ferdinand Schmutzer (1870-1928)

**Ficheiro:Flag of Germany.svg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Flag\\_of\\_Germany.svg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Flag_of_Germany.svg) Licença: Public Domain Contribuidores: User:Madden, User:Pumbaa80, User:SKopp

**Ficheiro:Flag of None.svg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Flag\\_of\\_None.svg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Flag_of_None.svg) Licença: Public Domain Contribuidores: User:Huhunqu, User:Rainer Zenz, User:Zscout370

**Ficheiro:Flag of Switzerland.svg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Flag\\_of\\_Switzerland.svg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Flag_of_Switzerland.svg) Licença: Public Domain Contribuidores: User:-xfi-, User:Marc Mongenet, User:Zscout370

**Ficheiro:Flag of Austria.svg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Flag\\_of\\_Austria.svg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Flag_of_Austria.svg) Licença: Public Domain Contribuidores: User:SKopp

**Ficheiro:Flag of the United States.svg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Flag\\_of\\_the\\_United\\_States.svg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Flag_of_the_United_States.svg) Licença: Public Domain Contribuidores: User:Dbenbenn, User:Indolences, User:Jacobulus, User:Technion, User:Zscout370

**Imagem:Albert Einstein signature.svg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Albert\\_Einstein\\_signature.svg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Albert_Einstein_signature.svg) Licença: Public Domain Contribuidores: User:Epson291, User:Pbroks13

**Ficheiro:Albert Einstein and his wife Mileva Maric.jpg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Albert\\_Einstein\\_and\\_his\\_wife\\_Mileva\\_Maric.jpg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Albert_Einstein_and_his_wife_Mileva_Maric.jpg) Licença: Public Domain Contribuidores: Unknown

**Ficheiro:Albert Einstein (Nobel).png** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Albert\\_Einstein\\_\(Nobel\).png](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Albert_Einstein_(Nobel).png) Licença: Public Domain Contribuidores: Dirk Hünninger, Divna Jaksic, Eusebius, Fadookie, Fastfission, Infrogmation, Juiced lemon, Lobo, Louperivois, Romary

**Ficheiro:E equals m plus c square at Taipei101.jpg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:E\\_equals\\_m\\_plus\\_c\\_square\\_at\\_Taipei101.jpg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:E_equals_m_plus_c_square_at_Taipei101.jpg) Licença: GNU Free Documentation License Contribuidores: Crazy Ivan, Harp, Rocket000, Shizhao, Sl, 2 edições anónimas

**Ficheiro:Albert Einstein photo 1921.jpg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Albert\\_Einstein\\_photo\\_1921.jpg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Albert_Einstein_photo_1921.jpg) Licença: Public Domain Contribuidores: Abu badali, Adnghiem501, Fadookie, Fastfission, Frank C. Müller, Juiced lemon, Lobo, Quibik, Romary

**Ficheiro:Einstein Albert Elsa LOC 32096u.jpg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Einstein\\_Albert\\_Elsa\\_LOC\\_32096u.jpg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Einstein_Albert_Elsa_LOC_32096u.jpg) Licença: Public Domain Contribuidores: Balcer, Kürschner, Rimshot

**Ficheiro:Einstein1921 by F Schmutzer 2.jpg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Einstein1921\\_by\\_F\\_Schmutzer\\_2.jpg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Einstein1921_by_F_Schmutzer_2.jpg) Licença: Public Domain Contribuidores: Diego pnc, Emijrp, Frank C. Müller, Hemulen, Lobo, Vonvon, Андрей Романенко, 6 edições anónimas

**Ficheiro:Carlos chagas e albert einstein.jpg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Carlos\\_chagas\\_e\\_albert\\_einstein.jpg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Carlos_chagas_e_albert_einstein.jpg) Licença: Public Domain Contribuidores: Felipe1219859, Pimentinha

**Ficheiro:Albert Einstein in later years.jpg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Albert\\_Einstein\\_in\\_later\\_years.jpg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Albert_Einstein_in_later_years.jpg) Licença: desconhecido Contribuidores: Fastfission, Frank C. Müller, Lobo

**Imagem:cquote1.svg** Fonte: <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Cquote1.svg> Licença: Public Domain Contribuidores: Adambro, Editor at Large, Infrogmation, P 96glin, 1 edições anónimas

**Imagem:cquote2.svg** Fonte: <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Cquote2.svg> Licença: Public Domain Contribuidores: Editor at Large, Infrogmation

**Ficheiro:Einstein oppenheimer.jpg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Einstein\\_oppenheimer.jpg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Einstein_oppenheimer.jpg) Licença: Public Domain Contribuidores: BenTels, Eusebius, Fadookie, Fastfission, G.dallorto, JdH, LX, 2 edições anónimas

**Ficheiro:Stamp Albert Einstein 2005.jpg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Stamp\\_Albert\\_Einstein\\_2005.jpg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Stamp_Albert_Einstein_2005.jpg) Licença: desconhecido Contribuidores: User:Prolineserver

**Imagem:cquote1.png** Fonte: <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Cquote1.png> Licença: desconhecido Contribuidores: Editor at Large, Infrogmation, Itsmine, Michie11972, Shyam, Wst

**Imagem:cquote2.png** Fonte: <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Cquote2.png> Licença: desconhecido Contribuidores: Editor at Large, Infrogmation, Itsmine, Jóna Þórunn, Siebrand, Yuval Y, 1 edições anónimas

**Ficheiro:Stern-Gerlach experiment.PNG** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Stern-Gerlach\\_experiment.PNG](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Stern-Gerlach_experiment.PNG) Licença: GNU Free Documentation License Contribuidores: User:Theresa knott

**Ficheiro:SternGerlach2.jpg** Fonte: <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:SternGerlach2.jpg> Licença: GNU Free Documentation License Contribuidores: User:Peng

**Ficheiro:youngsDoubleSlit.png** Fonte: <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:YoungsDoubleSlit.png> Licença: GNU Free Documentation License Contribuidores: Admrboltz, Cdang, Glenn, Joonasl

**Ficheiro:Schrodingers cat.svg** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Schrodingers\\_cat.svg](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Schrodingers_cat.svg) Licença: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Contribuidores: User:Dhatfield

**Ficheiro:Werner Heisenberg at 1927 Solvay Conference.JPG** Fonte: [http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Werner\\_Heisenberg\\_at\\_1927\\_Solvay\\_Conference.JPG](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Ficheiro:Werner_Heisenberg_at_1927_Solvay_Conference.JPG) Licença: Public Domain Contribuidores: Photograph Institut International de Physique Solvay, Brussels, Belgium

---

# Licença

---

Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported  
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>