

Quantum Mechanics I: The Weird New Theory

MARCELO GLEISER: We have seen that Einstein had proposed a very bold hypothesis that light is both a particle and wave and that its physical properties depend on how we test it-- that is, on the kinds of experiments or natural phenomena that we are studying. So, if light is made to pass through a slit, it will behave like a wave. However, if it is fired on the surface of a metal plate, it will behave like a particle.

In the early 1920s, the French physicist Louis de Broglie proposed something quite amazing. He said that not only light can have this dual particle wave behavior, but also every other particle of matter. For example, an electron can also be a particle or a wave depending how you look at it.

De Broglie used this idea to explain Bohr's model of the atom, where electrons are locked in very specific orbits. He reasoned that if you think of electrons as waves, only a certain number of wavelengths will fit within each orbit, as we can see it in this image.

In the mid 1920s, the French physicist Louis de Broglie came up with this outrageous idea that not just light is wave and particle, but that matter can also be wave and particle. And people got very confused, because they had this notion of the electron going around the nucleus like a planet going around the sun. And they said if the electron is a wave, how can it fit around the nucleus like that?

De Broglie's brilliant insight was to say, well, the electron is like a standing wave, like you can see a standing wave here, where you have a frequency of oscillation and have a fixed point. And standing waves, they create nodes, and those nodes depend on the energy of vibration of the string.

So what de Broglie said is that electrons at higher orbits are corresponding to different standing waves with different frequencies of oscillation and different number of nodes. So, right now, you have a wave with one standing node. We are going to now look for waves with more standing nodes.

So, in order to go from one nodes to these two nodes, all I had to do is increase the frequency of oscillation, which really corresponds to increasing the energy that is being given to this string as the oscillations occur. In terms of the electron, this would mean that a higher orbit of the electron-- having more energy-- would correspond to the electron wave having more nodes.

So as you can see, even an outrageous hypothesis-- the electron being a matter wave-- ends up making sense, once you have the physics right.

In 1925, the Austrian physicist Erwin Schrodinger came up with what became known as the Schrodinger equation, an equation that describes very precisely the behavior of the electron-- not only in its orbit in the hydrogen atom, but under any force that it is subjected to. The equation was a great triumph of applied mathematics to a complex physical problem.

But it created a lot of very serious issues. The problem here was that, contrary to the equations that people were used in classical physics-- where you have a mass moving in space, and the equation describes that mass moving in space--, the Schrodinger equation was an equation for a quantity called the wave function.

Initially, Schrodinger thought that this equation described how the negative electric charge of the electron was distributed in space-- the little waves that de Broglie suggested in the hydrogen atom. However, this early interpretation was wrong.

And it was Max Born that came up with the interpretation that is valid until today, even though it is a very bizarre one. Born proposed that the wave function was describing not the electron itself, but the probability that the electron could be found in a certain point in space.

This is completely different from everything in classical physics-- the physics known until then. In classical physics, equations are deterministic. That is, they will tell you unambiguously where something will be in the future, if you know its position and velocity in the past. Now, that certainty from classical physics is lost.

Instead, what you have is a probabilistic interpretation that tells you that in a given experiment, you may find the electron in this place with this energy with a given probability, but it can also be found in this other place with this other energy with some different probability. The new quantum physics became a probabilistic theory of nature, in sharp contrast with the determinism of classical physics.

And not everybody was very happy with that. In fact, Schrodinger himself had a nervous breakdown, because he believed he had created a monstrous theory that was against his intuition.

Many giants of physics of the time, like Einstein, Max Planck, and even de Broglie himself were also deeply disturbed by the new quantum theory. They all believed that nature should be understandable fully by reason, reflecting a Platonic expectation that the mind can describe the deepest secrets of the world in a deterministic way.

On the other hand, Niels Bohr, and his former student Werner Heisenberg, and the others were perfectly happy with this new probabilistic physics, which they thought described a very different reality than the one we know from classical physics.

In 1927, Heisenberg proposes uncertainty principle to describe precisely the indeterminacy that exists at the very core of nature, whereby you could never know with absolute precision both the position and the velocity of a particle. If you try to make a mental picture of this, Heisenberg is saying that everything in nature is jittery and that this inherent agitation is at the very core of matter and will not go away. The new quantum physics opened the door to a very, very different physical reality.

Mecânica Quântica I: A estranha nova teoria

MARCELO GLEISER: já vimos que Einstein propôs a hipótese ousada de que a luz é simultaneamente partícula e onda e que suas propriedades físicas dependem de como a testamos -- ou seja, do tipo de experimentos ou fenômenos naturais que estamos estudando. Portanto, se fizermos a luz passar através de uma fenda, ela se comportará como onda. Contudo, se a dispararmos contra a superfície de uma chapa metálica, ela se comportará como partícula.

No início dos anos 1920, o físico francês Louis de Broglie propôs algo bem surpreendente. Ele disse que não é só a luz que pode se comportar duplamente como onda mas também qualquer outra partícula de matéria. Por exemplo, um elétron também pode ser uma partícula ou uma onda, dependendo de como olhamos para ele.

De Broglie usou essa ideia para explicar o modelo atômico de Bohr, no qual elétrons estão restritos a órbitas bem específicas. Ele argumentava que, se pensássemos nos elétrons como ondas, apenas um certo número de comprimentos de onda caberia dentro de cada órbita, como podemos ver nesta imagem.

Em meados dos anos 1920, o físico francês Louis de Broglie propôs essa ideia escandalosa de que não só a luz é onda e partícula, mas que a matéria também pode ser onda e partícula. E isso confundiu muito as pessoas, porque elas tinham essa noção de que o elétron orbitava o núcleo como um planeta orbita o sol. E elas disseram: "se o elétron é uma onda, como ele consegue caber ao redor do núcleo desse jeito?"

A ideia brilhante de De Broglie foi dizer: "bem, o elétron é como uma onda estacionária, que como vocês podem ver aqui, é uma onda na qual temos uma frequência de oscilação e temos um ponto fixo. As ondas estacionárias criam nodos, e esses nodos dependem da energia da vibração da corda".

Desse modo, o que de Broglie disse é que os elétrons em órbitas mais externas correspondem às diferentes ondas estacionárias com diferentes frequências de oscilação e quantidade diferente de nodos. Agora, vocês têm uma onda com um nodo estacionário. Agora vamos procurar por ondas com mais nodos estacionários.

Para ir de um nodo para estes dois nodos, tudo o que tive que fazer foi aumentar a frequência de oscilação, que realmente corresponde ao aumento de energia que é dada a esta corda à medida que as oscilações ocorrem. Em termos do elétron, isso significaria que uma órbita mais externa do elétron -- tendo mais energia -- corresponderia à onda do elétron tendo mais nodos.

Portanto, como vocês podem ver, até mesmo uma hipótese escandalosa -- de que os elétrons são uma onda de matéria -- acaba fazendo sentido, quando entendemos a física.

Em 1925, o físico austríaco Erwin Schrödinger criou o que acabou se tornando conhecido como a equação de Schrödinger, uma equação que descreve com precisão o comportamento do elétron -- não apenas na sua órbita no átomo de hidrogênio, mas sob qualquer força à qual esteja sujeito. A equação foi um grande triunfo da matemática aplicada a um problema complexo de física.

Mas ela criou vários problemas muito sérios. O problema aqui era que, ao contrário das equações que as pessoas usavam na física clássica -- onde se tinha uma massa se movendo pelo espaço e a equação descrevia essa massa se movendo pelo espaço --, a equação de Schrödinger era uma equação para uma quantidade chamada de função da onda.

Inicialmente, Schrödinger pensava que essa equação descrevia como a carga elétrica negativa do elétron era distribuída no espaço -- as pequenas ondas que de Broglie sugeriu no átomo de hidrogênio. Contudo, essa interpretação inicial estava errada.

E foi Max Born que propôs a interpretação que ainda é válida até hoje, apesar dela ser muito bizarra. Born propôs que a função da onda estava descrevendo não o elétron em si, mas a probabilidade de que o elétron pudesse ser encontrado em um determinado ponto no espaço.

Isso é completamente diferente de tudo na física clássica -- a física conhecida até então. Na física clássica, as equações são deterministas. Isso é, elas vão nos dizer sem ambiguidade onde algo estará no futuro se conhecermos sua posição e velocidade no passado. Agora, essa certeza da física clássica foi perdida.

Em vez disso, o que temos é uma interpretação probabilística que nos diz que em um determinado experimento, podemos encontrar o elétron neste lugar, com esta energia, com uma determinada probabilidade, mas que ele também pode ser encontrado neste outro lugar, com esta outra energia, com alguma probabilidade diferente. A nova física quântica se tornou uma teoria probabilística da natureza, em um nítido contraste com o determinismo da física clássica.

E nem todo mundo ficou lá muito feliz com isso. Na verdade, o próprio Schrödinger teve um colapso nervoso, por acreditar que havia criado uma teoria monstruosa que ia de encontro à sua intuição.

Muitos gigantes da física da época, como Einstein, Max Planck e até o próprio de Broglie também ficaram profundamente perturbados pela nova teoria quântica. Todos eles acreditavam que a natureza deveria ser completamente compreensível pela razão, refletindo uma expectativa Platônica de que a mente pudesse descrever os segredos mais profundos do mundo de forma determinista.

Por outro lado, Niels Bohr, seu ex aluno Werner Heisenberg e outros estavam perfeitamente contentes com essa nova física probabilística, que eles pensavam que descrevia uma realidade bem diferente daquela que conhecemos pela física clássica.

Em 1927, Heisenberg propôs o princípio da incerteza para descrever precisamente a indeterminação que existe na essência da matéria, e pela qual nunca poderíamos saber simultaneamente com precisão absoluta a posição e a velocidade de uma partícula. Se você tentar criar uma imagem mental disso, Heisenberg está dizendo que tudo na natureza é instável e que essa agitação inerente está na própria essência da matéria e não vai desaparecer. A nova física quântica abriu a porta para uma realidade física muito diferente.