

John Polkinghorne

# Teoria quântica

*Tradução de IURI ABREU*

[www.lpm.com.br](http://www.lpm.com.br)

**L&PM** POCKET

À memória de Paul Adrien Maurice Dirac

1902-1984

Acho que posso dizer com segurança que  
ninguém entende mecânica quântica

RICHARD FEYNMAN

## AGRADECIMENTOS

Aos funcionários da Oxford University Press, por sua ajuda na preparação dos manuscritos para impressão, e principalmente à Shelley Cox, por uma série de comentários úteis sobre a primeira versão.

JOHN POLKINGHORNE  
Queens' College  
Cambridge

## PREFÁCIO

A descoberta da teoria quântica moderna em meados da década de 1920 trouxe à tona a maior revisão da forma de pensar a natureza do mundo físico desde a época de Isaac Newton. O que fora considerado a arena de processos claros e determinados mostrou-se, em suas raízes subatômicas, nebuloso e intermitente em seu comportamento. Comparadas a essa mudança revolucionária, as maiores descobertas da relatividade geral e especial parecem não ser mais interessantes do que variações sobre temas clássicos. De fato, Albert Einstein, que fora o progenitor da teoria da relatividade, considerou a mecânica quântica moderna tão em desacordo com seu gosto metafísico que permaneceu implacavelmente contrário a ela até o fim da vida. Não é exagero algum pensar na teoria quântica como uma das realizações intelectuais mais incríveis do século XX e em sua descoberta como a representação de uma verdadeira revolução em nossa compreensão do processo físico.

Sendo assim, a apreciação de ideias quânticas não deve ser uma particularidade dos físicos teóricos. Embora a articulação completa da teoria exija o uso de sua linguagem natural, a matemática, muitos de seus conceitos básicos podem ser acessíveis ao leitor comum que está preparado para se dar ao trabalho de acompanhar a história de uma descoberta notável. Este pequeno livro foi escrito tendo esse leitor em mente. Seu texto principal não contém nenhuma equação matemática. Um breve apêndice destaca algumas ideias matemáticas simples que trarão um maior esclarecimento àqueles capazes de digerir uma carne um pouco mais dura. (Seções relevantes desse apêndice aparecem com referência cruzada em **negrito** no texto principal.)

A teoria quântica mostrou ser imensamente fértil durante os mais de 75 anos de sua investigação desde as descobertas iniciais. Ela é atualmente aplicada com confiança e

êxito na discussão de quarks e glúons (os candidatos contemporâneos para os constituintes básicos da matéria nuclear), embora essas entidades sejam, no mínimo, 100 milhões de vezes menores do que os átomos, cujo comportamento foi motivo de interesse dos primeiros quânticos. Ainda assim, permanece um profundo paradoxo. A epígrafe deste livro contém algo do exagero da expressão que caracterizou o discurso do grande físico quântico de segunda geração, Richard Feynman, mas é certamente verídico que, embora saibamos realizar os cálculos, não *entendemos* a teoria de modo tão completo como deveríamos. Veremos, a seguir, que importantes questões interpretativas permanecem sem solução. Elas exigirão, para eventual resolução, não só observação física, como também decisão metafísica.

Quando jovem, tive o privilégio de aprender teoria quântica sendo aluno de Paul Dirac, enquanto ele ministrou seu famoso curso em Cambridge. O material das suas aulas correspondia de perto ao tratamento dado em seu livro seminal, *Os princípios de mecânica quântica*, um dos verdadeiros clássicos da publicação científica do século XX. Além de ser o maior físico teórico que já conheci pessoalmente, Dirac tinha pureza de espírito e comportamento modesto (ele nunca enfatizava, nem minimamente, as próprias imensas contribuições aos princípios básicos desse tema), o que o tornou uma figura inspiradora e um tipo de santo-cientista. Humildemente dedico este livro à sua memória.

## CAPÍTULO 1

### RACHADURAS CLÁSSICAS

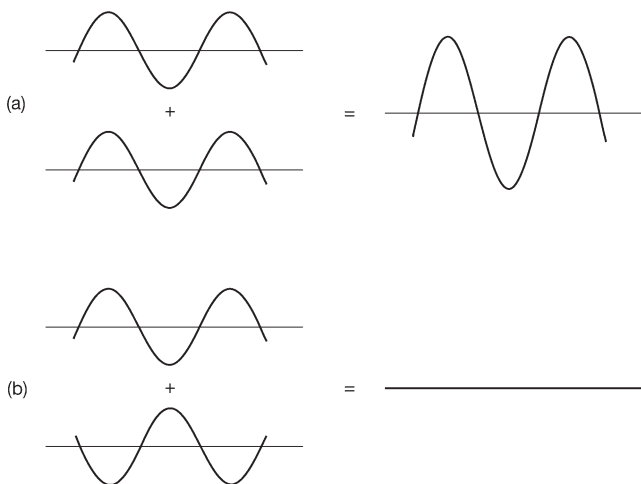
O primeiro florescer da ciência física moderna atingiu seu auge em 1687, com a publicação da obra *Principia*, de Isaac Newton. Desde então, a mecânica estabeleceu-se como uma disciplina madura, capaz de descrever os movimentos das partículas de uma maneira clara e determinista. Essa nova ciência parecia ser tão completa que, por volta do fim do século XVIII, o maior dos sucessores de Newton, Pierre Simon Laplace, pôde fazer sua célebre declaração de que um ser, equipado com poderes ilimitados de cálculo e suprido de conhecimento completo das disposições de todas as partículas em algum instante do tempo, poderia usar as equações de Newton para prever o futuro e retrodizer com igual certeza o passado do universo inteiro. De fato, essa alegação mecanicista um tanto assustadora trazia consigo uma grande suspeita de orgulho arrogante. Em primeiro lugar, os seres humanos não se veem como máquinas autômatas. Além disso, por mais imponentes que fossem, sem sombra de dúvida, as realizações de Newton, elas não abarcavam todos os aspectos do mundo físico que eram conhecidos na época. Restavam questões não resolvidas que ameaçavam a crença na autossuficiência total da síntese newtoniana. Por exemplo, havia a questão da verdadeira natureza e origem da lei da gravitação universal do inverso do quadrado que Sir Isaac descobrira. Tratava-se de um assunto sobre o qual o próprio Newton declinara formular uma hipótese. Havia, ainda, a questão não solucionada da natureza da luz. Nesse caso, Newton permitiu-se um grau de latitude especulativa. Em *Opticks*, ele se inclinou à visão de que um feixe de luz era composto de uma corrente de partículas minúsculas. Esse tipo de teoria corpuscular estava em harmonia com a tendência de Newton de ver o mundo físico em termos atomísticos.

## A natureza da luz

Foi somente no século XIX que houve um progresso real no entendimento da natureza da luz. Bem no começo do século, em 1801, Thomas Young apresentou evidências bastante convincentes para o fato de que a luz tinha a característica de um movimento de onda, uma especulação que fora feita mais de um século antes por Christiaan Huygens, contemporâneo holandês de Newton. As principais observações feitas por Young concentraram-se nos efeitos do que hoje chamamos de fenômenos de interferência. Um exemplo básico é a existência de bandas alternadas de luz e escuridão, o que, por mais irônico que seja, foram exibidas pelo próprio Sir Isaac em um fenômeno chamado de anéis de Newton. Efeitos desse tipo são característicos de ondas e surgem da seguinte forma: o modo como dois trens de ondas se combinam depende de como suas oscilações se inter-relacionam. Se estão no mesmo ritmo (em fase, como dizem os físicos), então a crista coincide de maneira construtiva com a crista, resultando em reforço mútuo máximo. Quando isso acontece no caso da luz, obtêm-se bandas de brilho. Se, no entanto, os dois conjuntos de ondas estão exatamente fora de ritmo (fora de fase), a crista coincide com o vale em uma anulação mutuamente destrutiva, e o resultado é uma banda de escuridão. Assim, a aparência de padrões de interferência de luz e escuridão alternadas é uma assinatura inequívoca da presença de ondas. As observações de Young pareciam ter resolvido o problema. A luz é ondulatória.

No decorrer do século XIX, a natureza do movimento ondulatório associado à luz parecia tornar-se clara. Descobertas importantes feitas por Hans Christian Oersted e Michael Faraday mostraram que eletricidade e magnetismo – fenômenos que, à primeira vista, pareciam muito distintos em sua natureza – estavam, na verdade, intimamente ligados entre si.

O modo como podiam ser combinadas para dar uma teoria consistente de eletromagnetismo veio a ser determinado



**1. Sobreposição de ondas: (a) em fase; (b) fora de fase.**

por James Clerk Maxwell – um homem de tamanha genialidade que pode ser incluído, com justiça, no mesmo patamar de Isaac Newton. As célebres equações de Maxwell, ainda a base fundamental da teoria eletromagnética, foram estabelecidas em 1873 em seu *Tratado sobre eletricidade e magnetismo*, um dos maiores clássicos da literatura científica. Maxwell percebeu que essas equações possuíam soluções ondulatórias e que a velocidade dessas ondas era determinada em termos de constantes físicas conhecidas. Esta revelou ser a familiar velocidade da luz!

Essa descoberta foi considerada o maior triunfo da física do século XIX. O fato de que a luz era composta de ondas eletromagnéticas parecia ter sido estabelecido da maneira mais sólida possível. Maxwell e seus contemporâneos viam essas ondas como oscilações em um meio elástico difuso, que veio a ser chamado de éter. Em um artigo de enciclopédia, ele diria que o éter era a entidade mais confirmada de toda a teoria física.