

*Teorias e Interpretações da Mecânica Quântica*

### **Conselho Editorial**

IVAN S. OLIVEIRA — *CBPF/Coordenador da Coleção*

ODILON A. P. TAVARES — *CBPF*

MUCIO A. CONTINENTINO — *CBPF*

GERALDO R. C. CERNICCHIARO — *CBPF*

ROBERTO S. SARTHOUR — *CBPF*

FELIPE A. PINHEIRO — *UFRJ*

NELSON PINTO NETO — *CBPF*

RICARDO M. O. GALVÃO — *CBPF, USP*



**CBPF**  
Centro Brasileiro de  
Pesquisas Físicas

# Teorias e Interpretações da Mecânica Quântica

---

NELSON PINTO NETO<sup>1</sup>

1 Coordenação de Cosmologia, Relatividade e Astrofísica do  
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – ICRA/CBPF

*CBPF*  
*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas*

Editora Livraria da Física  
São Paulo — 2010

Copyright © 2010 Editora Livraria da Física

1a. Edição

Editor: JOSÉ ROBERTO MARINHO  
Assistente editorial: VÍCTOR PEREIRA MARINHO  
Projeto gráfico e diagramação: CASA EDITORIAL MALUHY & CO.  
Ilustrações: IGOR FREITAS GONZAGA  
Capa: TYPODESIGN

*Texto em conformidade com as novas regras ortográficas do Acordo da Língua Portuguesa.*

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

---

Pinto Neto, Nelson

Teorias e interpretações da Mecânica Quântica /  
Nelson Pinto Neto. – São Paulo : Editora Livraria da Física;  
Rio de Janeiro : CBPF - Centro Brasileiro de Pesquisas  
Físicas, 2010. – (Coleção tópicos em física)

Bibliografia.

ISBN 978-85-7861-056-2

1. Mecânica 2. Teoria quântica I. Título. II. Série

10-06993

CDD-530.1207

---

Índices para catálogo sistemático:

1. Mecânica quântica : Física : Estudo e ensino 530.1207

ISBN 978-85-7861-056-2

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta obra poderá ser reproduzida sejam quais forem os meios empregados sem a permissão da Editora. Aos infratores aplicam-se as sanções previstas nos artigos 102, 104, 106 e 107 da Lei n. 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.

Impresso no Brasil

*Printed in Brazil*



Editora Livraria da Física  
Tel./Fax: +55 11 3459-4327 / 3936-3413  
[www.livrariadafisica.com.br](http://www.livrariadafisica.com.br)



CBPF  
Centro Brasileiro de  
Pesquisas Físicas

*À minha mulher Gilda,  
pelo apoio sempre presente e tão fundamental,  
e aos meus filhos Ana e João,  
fontes da minha alegria.*



## **Apresentação**

O Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e a Livraria da Física, com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj), têm o prazer de apresentar a coleção **Tópicos em Física**. São vários volumes cobrindo aspectos de física teórica, física experimental, técnicas de medidas, instrumentação científica, ensino de física, história da física, e divulgação científica. Os autores, pesquisadores de várias instituições do Rio de Janeiro, e alguns de outros estados, brindam a Física brasileira com esta coleção inédita, escrita para estudantes de pós-graduação, de graduação, e professores de física, revelando a diversidade de temas e a pujança da Física no nosso Estado. É o nosso desejo que esta Coleção cresça cada vez mais, incentivando o ensino e a pesquisa em Física no Brasil.

**Os Editores**

Rio de Janeiro, maio de 2010





## Prefácio

*Those who are not shocked when they first come across quantum theory cannot possibly have understood it.*<sup>1</sup> NIELS BOHR

*I do not like [quantum mechanics], and I am sorry I ever had anything to do with it.*<sup>2</sup> ERWIN SCHRÖDINGER

*If [quantum theory] is correct, it signifies the end of physics as a science.*<sup>3</sup> ALBER EINSTEIN

*It is safe to say that nobody understands quantum mechanics.*<sup>4</sup> RICHARD FEYNMAN

*If you are not completely confused by quantum mechanics, you do not understand it.*<sup>5</sup> JOHN WHEELER

*Quantum mechanics makes absolutely no sense.*<sup>6</sup> ROGER PENROSE

Início este prefácio com algumas frases de eminentes físicos sobre a mecânica quântica, para tornar claro de imediato que o assunto a ser tratado neste livro é um tema profundo, controverso e desafiador, onde alguns de nossos conceitos, princípios e intuições mais básicos relacionados à natureza tiveram que ser revistos ou mesmo abandonados.

1. Aqueles que não ficam chocados quando se deparam pela primeira vez com a teoria quântica, provavelmente não a entenderam.
2. Não gosto [de mecânica quântica], e sinto muito por ter tido alguma coisa a ver com isto.
3. Se [a teoria quântica] está correta, isto significa o fim da física como uma ciência.
4. É seguro dizer que ninguém entende a mecânica quântica.
5. Se você não está completamente confuso a respeito da mecânica quântica, você não a compreende.
6. Mecânica quântica não faz absolutamente qualquer sentido.

Se olharmos para a lista acima, veremos que nela estão presentes tanto alguns dos fundadores da teoria quântica (Bohr, Schrödinger, Einstein) quanto autores posteriores, que a generalizaram, desenvolveram e popularizaram (Feynman, Wheeler, Penrose), ou seja, os desafios que a mecânica quântica nos apresenta são básicos e persistentes.

Estas dificuldades ficaram claras desde os primórdios, sem que se chegasse a um consenso sobre a melhor maneira de abordar os fenômenos quânticos [2]. Entretanto, uma postura pragmática foi adotada: uma das escolas de pensamento, a chamada escola de Copenhaguen, liderada por Niels Bohr, tomou as rédeas do processo, por razões que veremos adiante, e passou a ser considerada a interpretação oficial da mecânica quântica. A partir daí, a imensa maioria da comunidade física se preocupou muito mais em aplicar a teoria aos mais variados domínios e testá-la experimentalmente a partir do algoritmo mínimo de produção de resultados com o qual todos concordavam, do que investigar questões fundamentais a respeito deste algoritmo. Este império conceitual e prático, impulsionado pela produção da bomba nuclear e consonante com a visão pragmática do capitalismo do pós-guerra, se tornou tão poderoso que qualquer tentativa de questioná-lo ou entendê-lo com mais profundidade era considerada meta-física ou filosofia absolutamente supérflua. Para uma grande maioria, motivada por um positivismo simplório, este algoritmo era autossuficiente e, se ele gerava números coerentes com a observação, isto era o que importava. Vale salientar que os principais idealizadores da interpretação de Copenhaguen em suas diversas variantes (Bohr, Heisenberg, Dirac, Von Neuman, Pauli, etc) não compartilhavam desta visão simplista. Eles tinham perfeita noção da profundidade das questões que estavam em jogo e que a abordagem de questões filosóficas e de linguagem sobre a física quântica eram essenciais para que a teoria fizesse algum sentido. Não foi à toa que Heisenberg publicou tantos livros envolvendo física e filosofia e que Bohr tenha criado um conceito filosófico particular para entender a mecânica quântica: a complementaridade.

Felizmente, certas ilhas de pensamento não se enquadraram nesta linha dominante. Alguns grandes físicos da época continuaram buscando um entendimento mais profundo dos fenômenos quânticos, produzindo artigos cruciais para o desenvolvimento da teoria quântica. Seguem alguns exemplos, que serão discutidos com mais detalhe neste livro:

- i. Einstein, Podolski e Rosen, questionando a completeza da mecânica quântica em 1935 [3];
- ii. Schrödinger, levantando o seu famoso paradoxo do gato a respeito do problema da interferência quântica em objetos macroscópicos, também em 1935 [4];

- iii. Bohm, propondo uma teoria não local de variáveis escondidas para a mecânica quântica a partir das ideias de de Broglie em 1952 [5];
- iv. Everett, introduzindo a interpretação de vários mundos em 1957 [6];
- v. Bell, apresentando suas famosas desigualdades em 1964 [7].

Estes artigos fundamentais foram discutidos por uma minoria interessada nos fundamentos da mecânica quântica, mas foram amplamente ignorados pela grande massa de físicos, embora a quase totalidade destes lidem nas suas pesquisas, de uma forma ou de outra, com a mecânica quântica. Os livros usados nos cursos, até recentemente, apresentam apenas a interpretação de Copenhague, principalmente na visão de von Neumann, sem jamais abordar a discussão profunda e riquíssima que os autores daqueles artigos e outros da época levantaram. Vários chavões passaram a ser repetidos por quase todos sem nenhuma análise crítica, e continuam sendo reproduzidos até hoje por muitos de nós, certas vezes com arrogância e pretensão. Esta situação mostra perfeitamente bem como a comunidade dos físicos não tem nada de especial em relação a tantas outras, que ela pode ser dominada por dogmas e preconceitos, tal como os cardeais de Galileu que se recusaram a olhar seu telescópio. No meu caso, por exemplo, apesar de ter assistido a ótimos cursos de quântica, só fui perceber a imensa variedade de ideias e possibilidades de abordagens aos fenômenos quânticos quando me interessei pela quantização do Universo, onde vários problemas da interpretação oficial-a de Copenhague-não podem de forma alguma ser ignorados.

Felizmente, esta situação vem mudando pouco a pouco, principalmente após a experiência de Aspect [8], que revelou a violação das desigualdades de Bell pelos fenômenos quânticos. Isto mostrou que as discussões levantadas nos artigos citados acima poderiam sim, se consideradas seriamente, levar a uma compreensão muito mais profunda da teoria quântica, com resultados experimentais concretos. Neste caso, mostrou-se que um certo critério de localidade, bastante amplo e intuitivo, simplesmente não é respeitado pela natureza, como veremos adiante. O desenvolvimento tecnológico, portanto, propiciou a realização de experimentos cruciais até então inimaginados, e isto vem se aprofundando a cada ano (como, por exemplo, a observação do fenômeno da descoerência [9]). O interesse pela quantização do Universo, que discutiremos no capítulo 10, também impôs uma discussão bem mais ampla e profunda sobre conceitos básicos da mecânica quântica (a fronteira entre o clássico e o quântico, a universalidade da teoria quântica, o papel do observador, entre outros). Resultados expressivos nesta área jamais teriam sido alcançados sem a utilização de abordagens alternativas para os fenômenos quânticos [10, 11]. Finalmente, as pesquisas em computação quântica [12] impulsionaram ainda mais as investigações em fundamentos da teoria quântica. Nesta linha de pesquisa, os estados emaranhados,

primeiramente discutidos no artigo EPR e por Schrödinger nos anos 30, têm papel fundamental. Também aqui, diferentes visões da teoria quântica produziram resultados que dificilmente poderiam ter sido obtidos caso os pesquisadores da área estivessem atrelados exclusivamente à interpretação de Copenhague (veja por exemplo [13], onde a interpretação de vários mundos foi crucial para a obtenção de resultados importantes em computação quântica).

Hoje podemos afirmar com certeza que a teoria quântica está ainda em construção. Muitas das suas possibilidades, levantadas no início do século passado, continuam sendo investigadas, juntamente com outras apresentadas posteriormente. Atualmente pode-se dizer com segurança que a chamada interpretação de Copenhague é apenas uma das muitas formas de entender os fenômenos quânticos, sem nenhuma superioridade sobre as demais. Cada uma delas possui seus aspectos positivos particulares, mas nenhuma deixa de ter importantes lacunas e imprecisões. Talvez a complementaridade seja muito mais profunda do que Bohr jamais imaginou. No meu entender, qualquer curso avançado de mecânica quântica, especialmente de pós-graduação, que não fomente uma discussão crítica de todas estas possíveis teorias quânticas, suas questões internas mais profundas (localidade, contextualidade, descoerência, teoria da medida, realismo, etc), os inúmeros avanços experimentais das últimas décadas e suas aplicações em diferentes domínios da investigação científica, será um curso atrasado e defasado. A mecânica quântica é uma matéria básica. Todos os físicos a utilizam, do estado sólido à cosmologia, e creio que todos nós temos a obrigação de estar minimamente a par da riqueza do debate que se trava em torno dela atualmente. Não é mais possível formar doutores em física com conhecimentos da mecânica quântica da metade do século passado e que não conheçam as discussões envolvendo a mecânica quântica do século XXI.

Nos capítulos seguintes, procurarei abordar, informar e discutir muitos dos temas mais críticos sobre as teorias quânticas e suas interpretações. Existem vários outros livros e artigos de alta qualidade abordando estes assuntos [14, 15, 16, 17, 18]. A singularidade da presente obra é ser escrito por um cosmólogo e em português. Espero que ela possa contribuir para destruir dogmas, levantar dúvidas e questões, fomentar o debate, estimular o pensamento criativo a respeito da mecânica quântica, e que possa ser útil em cursos avançados que queiram abordar o tema de forma atual. Evidentemente, sendo este um assunto tão rico, muitas das possibilidades investigadas hoje em dia ou não serão abordadas, ou o serão sem a profundidade que merecem. Que isto sirva de estímulo para que outros investigadores, ainda mais envolvidos do que eu no assunto-afinal, minha formação e pesquisa são em relatividade geral e cosmologia-contribuam com futuras publicações mais abrangentes e detalhadas do que esta e possam, assim, disseminar ainda mais este assunto tão envolvente e apaixonante.

Os conhecimentos básicos de mecânica quântica utilizados neste livro são os seguintes: postulados da teoria quântica, segundo a interpretação de Copenhaguen; notação de Dirac; definição de matriz densidade; spin; e representações de Schrödinger, Heisenberg e de interação. No livro-texto da referência [19] estes assuntos correspondem aos capítulos II, III e IV. Aqueles que não dominam estes conceitos poderão mesmo assim compreender boa parte do texto pois, sempre que possível, procurarei explicar em palavras os passos envolvidos.

As raras citações em inglês têm tradução para o português em notas de rodapé.

Gostaria de agradecer a Santiago Bergliaffa, Sergio Joffily, José Martins Salim e sobretudo Herman Mosquera Cuesta, Felipe Tovar Falciano (este também por revisar partes do texto), Cássio Leite Vieira e Antony Valentini pela indicação de algumas referências bastante úteis e pelas conversas enriquecedoras, e a Valéria Fortaleza, pela ajuda extremamente competente com o LaTeX. Gostaria também de agradecer ao grupo do ICRA-CBPF e aos participantes do “Pequeno Seminário” pelas excelentes discussões a respeito do tema deste livro. Meus agradecimento especial vai para meu amigo e colaborador José Acácio de Barros, não só pela revisão de parte do texto deste livro, como também por me mostrar, lá pelos idos de 1994, por ocasião de uma visita minha à Universidade de Stanford, que as alternativas à interpretação de Copenhaguen não eram, afinal, tão estapafúrdias quanto a maior parte dos meus colegas me fazia crer.

Finalmente, agradeço ao CNPq pela bolsa de pesquisa.

NELSON PINTO NETO



# Sumário

**Capítulo 1 – Uma breve introdução aos fenômenos quânticos, 1**

**Capítulo 2 – A interpretação de Copenhague, 7**

**Capítulo 3 – Teoria da medida e a fronteira clássico-quântico, 15**

3.1 – MEDIDAS DE PRIMEIRA ESPÉCIE, 18

3.2 – DESCOERÊNCIA, 21

**Capítulo 4 – Emaranhamento, não localidade e contextualidade, 33**

4.1 – O ARTIGO DE EINSTEIN-PODOLSKY-ROSEN, 35

4.2 – OS TEOREMAS DE BELL, 40

**Capítulo 5 – A teoria de de Broglie-Bohm, 53**

5.1 – INTRODUÇÃO HISTÓRICA, 53

5.2 – A TEORIA DA ONDA PILOTO, 55

5.3 – OS FENÔMENOS QUÂNTICOS À LUZ DA TEORIA DE DE BROGLIE E BOHM, 58

5.3.1 NÃO LOCALIDADE E EPR, 59

5.3.2 INTERFERÊNCIA QUÂNTICA E TUNELAMENTO, 59

5.4 – O PROBLEMA DA MEDIDA QUÂNTICA, 62

5.5 – SPIN, 64

5.6 – CONTEXTUALIDADE, 66

5.7 – TEORIA RELATIVÍSTICA, 67

5.8 – OBTENÇÃO DA REGRA DE BORN, 69

**Capítulo 6 – A interpretação de vários mundos, 73**

6.1 – INTRODUÇÃO HISTÓRICA, 73

6.2 – A TEORIA DE EVERETT, 75

6.3 – OS VÁRIOS MUNDOS, 79

6.4 – PROBABILIDADE, 84

6.5 – BELL E NÃO LOCALIDADE, 87

6.6 – OBSERVAÇÕES FINAIS, 88

**Capítulo 7 – Colapso espontâneo, 89**

7.1 – O MODELO DINÂMICO DE PEARLE, 90

7.2 – O MODELO DE LOCALIZAÇÃO INSTANTÂNEA DE GRW, 92

7.3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS, 94

**Capítulo 8 – Histórias consistentes e outras abordagens, 97**

8.1 – HISTÓRIAS CONSISTENTES, 97

8.1.1 ASPECTOS PRINCIPAIS, 98

8.1.2 PROBLEMAS E DIFICULDADES, 102

8.2 – A FORMULAÇÃO DE DOIS ESTADOS E MEDIDAS FRACAS, 103

8.3 – INFORMAÇÃO QUÂNTICA E A ABORDAGEM EPISTÊMICA, 109

8.4 – COMENTÁRIOS FINAIS, 110

**Capítulo 9 – Teoria quântica e cosmologia, 113**

9.1 – COSMOLOGIA QUÂNTICA, 116

**Capítulo 10 – Conclusões e perspectivas futuras, 125**

**Referências Bibliográficas, 133**



*To try to stop all attempts to pass beyond the present viewpoint of quantum physics could be very dangerous for the progress of science and would furthermore be contrary to the lessons we may learn from the history of science. This teaches us, in effect, that the actual state of our knowledge is always provisional and that there must be, beyond what is actually known, immense new regions to discover.*<sup>1</sup>

LOUIS DE BROGLIE [1]

1. Tentar impedir todas as tentativas de ir além do ponto de vista presente a respeito da física quântica pode ser muito perigoso para o progresso da ciência e pode ser contrário às lições que aprendemos da história da ciência. Ela nos ensina, de fato, que o estado atual de nosso conhecimento é sempre provisório e que devem existir, além do que conhecemos atualmente, novas e imensas regiões a serem descobertas.



## 1

## Uma breve introdução aos fenômenos quânticos

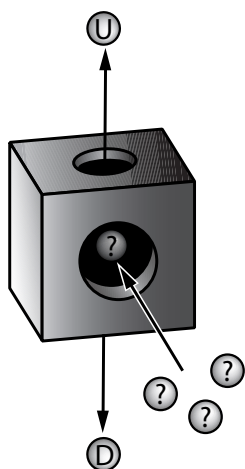
*Can nature possibly be as absurd as it seemed to us in these atomic experiments?*<sup>1</sup>

WERNER HEISENBERG

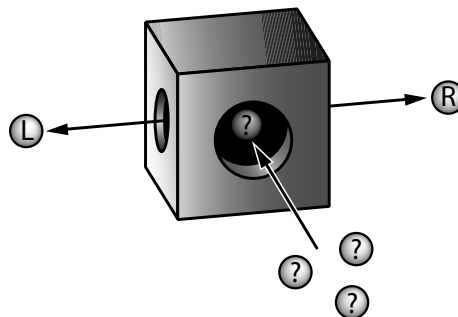
Sejam duas caixas A e B por onde podem passar elétrons. Se fizermos passar muitos elétrons pela caixa A, percebemos que quase metade deles (quanto mais elétrons são enviados mais esse número se aproxima da metade) sai pela parte de cima e a outra metade sai pela parte de baixo da caixa. Se repetirmos o procedimento com a caixa B, verificamos que, neste caso, metade sai pela lateral esquerda e a outra metade pela lateral direita desta<sup>2</sup>. Estas situações estão apresentadas nas figuras 1.1 e 1.2. Se juntarmos os elétrons que passam por cima da caixa A e os enviarmos à caixa A de novo, todos saem por cima mas se os enviarmos à caixa B, metade sai pela direita e a outra metade pela esquerda. Já os elétrons que saem pela parte de baixo da caixa A, saem todos novamente pela parte de baixo se voltarem a ela mas têm o mesmo comportamento que os elétrons que saem por cima da caixa A se os enviarmos para a caixa B. A situação é simétrica em relação aos elétrons que passam pela caixa B: os que saem pela direita sairão sempre pela direita ao retornar à caixa B mas se forem à caixa A, metade sairá por cima e a outra metade por baixo, e analogamente para os que saem pela esquerda da caixa B.

Suponha agora que os elétrons que saem por cima ou por baixo da caixa A passem posteriormente pela caixa B. Neste caso, ao voltarem à caixa A, eles voltam a ter o mesmo comportamento anterior: uma metade sai por cima e a outra metade sai por baixo da caixa A. A situação recíproca a esta está descrita na figura 1.3.

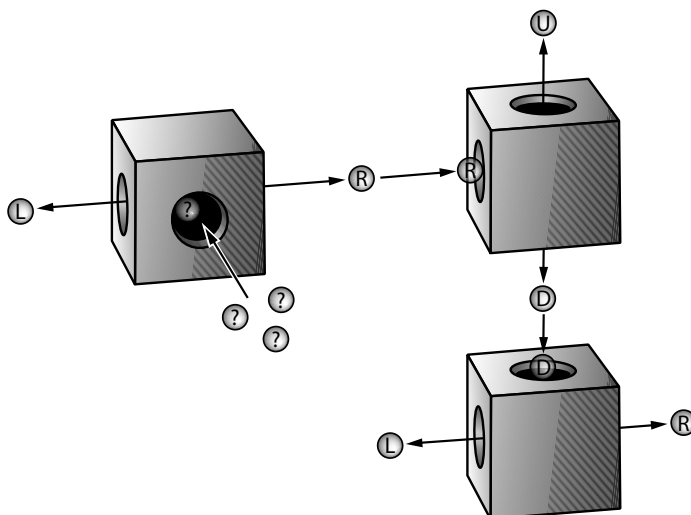
1. Pode a natureza ser tão absurda como estes experimentos atômicos parecem indicar?
2. Estas caixas podem ser artefatos de Stern-Gerlach, sistemas que geram campos magnéticos não homogêneos nas direções escolhidas. Elétrons são desviados por estes campos magnéticos devido ao seu grau de liberdade interno chamado spin



**Fig. 1.1** Figura mostrando elétrons entrando na caixa A e saindo por cima ou por baixo desta (retirada da referência [20]).



**Fig. 1.2** Figura mostrando elétrons entrando na caixa B e saindo pela direita ou pela esquerda desta (retirada da referência [20]).



**Fig. 1.3** Figura mostrando elétrons que saíram pela direita da caixa B e retornam a esta após passarem pela caixa A. Note que ao atravessarem a caixa A, eles perdem a propriedade de sempre saírem pela direita da caixa B (retirada da referência [20]).

Estes primeiros fatos parecem indicar que os elétrons só adquirem as propriedades de saírem por cima ou por baixo da caixa A, ou pela esquerda ou direita da caixa B, a partir do momento em que efetivamente passam por elas. Entretanto, estas propriedades são destruídas quando os elétrons são forçados a passar pela