

## 17 - Perfis Epistemológicos da Teoria Quântica

### Mecânica Quântica

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

1/45

## Interpretações

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

2/45

## Sucesso

- a Mecânica Quântica tem sido descrita como a teoria "*mais comprovada e de maior sucesso na história da ciência*" (Jackiw and Kleppner, 2000.)
- bons resultados experimentais:
  - ⇒ formalismo ↔ dados experimentais
  - ⇒ valor previsto ↔ valor medido

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

3/45

## Interpretações

- no entanto, ainda não há acordo sobre
  - o que significa a Mecânica Quântica,
  - o que trata exatamente a Mecânica Quântica

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

4/45

## Interpretações

- origem histórica

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

5/45

## Dificuldades

- é não-intuitiva!
- descrição matemática abstrata
- medições interferem no estado do sistema
- processos não determinísticos e irreversíveis
- entrelaçamento e alta correlação entre eventos não locais
- complementaridade de descrições alternativas da realidade

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

6/45

## Descrição matemática abstrata

- Física Clássica: funções reais em no máximo 3 dimensões
- Mecânica Quântica: espaço abstrato de Hilbert (com número arbitrário de dimensões) e seus operadores não-comutativos sobre o conjunto dos complexos

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

7/45

## Medições

- interferem no estado do sistema
- Ex.: experimento de dupla fenda
- se se observa o fóton, não há interferência! (**como é que ele 'sabe'?**)

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

8/45

## Transformações

- reversíveis:  
resultado da Equação de Schrödinger
- irreversíveis e não determinísticos:  
ex.: colapso da função de onda

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

9/45

## Não-localidade

- Ex.: Paradoxo de Einstein-Podolsky-Rosen:
  1. singleto de spins ( $\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow$ ) (superposição)
  2. mede-se um spin (colapsa a superposição) para um estado qualquer
  3. o outro spin fica instantaneamente determinado (mesmo que muito longe)  
⇒ viola localidade

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

10/45

## Complementaridade

- viola a lógica proposicional do *tertium non datur* (ou é uma coisa ou outra):
  - as descrições de partícula e de onda do objeto quântico são **complementares!**
- Física clássica: ou é partícula ou é onda

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

11/45

## Complementaridade

- No meu jardim, há uma rosa vermelha.
- No meu jardim, há uma rosa branca.
- No meu jardim, há só uma rosa.

(JUNG)

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

12/45

## Visão instrumentalista

- se os vetores-ket  $|\uparrow\rangle$  e  $|\downarrow\rangle$  são projeções do estado do observável  $O$  numa certa direção no espaço de Hilbert,
- $P_{\uparrow} = \langle \uparrow | O \rangle$  e  $P_{\downarrow} = \langle \downarrow | O \rangle$  são números tais que
- numa série infinita de experimentos, a proporção de medições do observável  $O$  com valor  $\uparrow$  e medições com valor  $\downarrow$  é  $P_{\uparrow} / P_{\downarrow}$

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

13/45

## Elementos do Formalismo

- espaço de
  - vetores-ket unitários, dependentes do tempo
  - operadores auto-adjuntos sobre o espaço
  - operações de medida: transformação de um vetor-ket em uma distribuição de probabilidades de vetores-ket

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

14/45

## Elementos de uma interpretação

- estados,
- transições entre estados,
- operações de medição,
- possíveis informações a respeito da extensão espacial destes elementos,
- etc.
- esses elementos são tratados como **realidade física**

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

15/45

## Elementos da Realidade

- quantidades para as quais valores podem ser preditos com certeza, antes de serem medidos ou perturbados de alguma forma

(EINSTEIN)

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

16/45

## Teoria Física Completa

- uma Teoria, na qual cada elemento da Realidade física é considerado pela Teoria

$$\forall r, t; r \in R, t \in T; r \leftrightarrow t$$

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

17/45

## Interpretação completa

- uma Interpretação, na qual cada elemento da estrutura da interpretação é considerado pelo Formalismo matemático

$$\forall i, f; i \in I, f \in F; i \leftrightarrow f$$

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

18/45

## Determinismo

- se o estado num instante de tempo no futuro é uma função do estado no presente:

$$\varphi(t)=f(\varphi(0))$$

- Ex.:  $S(t)=S(0)+v(0)t$

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

19/45

## Determinismo

- propriedade das mudanças de estado com a passagem do tempo
- pode não ser claro se uma interpretação é determinista ou não

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

20/45

## Realismo

- propriedade dos elementos do formalismo
- um elemento matemático do formalismo é real se corresponde a um elemento na estrutura da interpretação
- Ex.: em algumas interpretações, o vetor-ket é tido como correspondendo a um elemento da realidade física, enquanto em outras, não

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

21/45

## Realismo local

- o valor da medição deve corresponder ao valor de alguma função no espaço de estado (é um elemento da realidade)
- os efeitos da medição não se devem propagar mais rápido do que alguma barreira universal (a velocidade da luz)
- as operações de medição devem ser espacialmente localizadas

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

22/45

## Não intuitiva

- Mecânica Quântica: OK
- se se exigir localidade, realismo, etc. (razoável)  
⇒ **contradições**

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

23/45

## Principais Interpretações

- Ondulatória Realista (Schrödinger)
- Corpuscular Realista (Landé)
- Dualista Realista (de Broglie, Bohm)
- Dualista Positivista (Bohr)
- 'Espiritual' (Wigner, Goswami)

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

24/45

## Ondulatória Realista

- 'onda' de 'função de onda' é real
- mas a 'onda' colapsa à medida que evolui!
- pior: colapsos são não-locais!

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

25/45

## Corpuscular Realista

- objeto é, na verdade, partícula (real)
- probabilidade vem dos 'enxames' de partículas (questão Estatística)
- mas, e os padrões de interferência?
- comum nos livros e nos alunos

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

26/45

## Dualista Realista

- objeto quântico=partícula+onda piloto (ambos reais)
- onde as ondas se cancelam, a partícula não pode ir
- mas, e a não-localidade?
- Bohm incluiu o aparelho de medição

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

27/45

## Dualista Positivista

- somos incapazes de representar a realidade ao nível quântico
- não se pode falar sobre a 'verdadeira natureza' (ontologia) do objeto, só sobre os resultados das medidas (positivista)
- conforme o experimento, pode ser descrito como onda ou como partícula

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

28/45

## 'Espiritual'

- é a consciência e não a medição que causa o colapso
- consciência e objeto são entrelaçados
- base para misticismo oriental da 'unicidade'

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

29/45

## Várias interpretações

Interpretação	Determinística?	Função de onda real?	História única?	Variáveis ocultas?	Funções de onda colapsantes?	Observador tem papel?
Interpretação de Copenhague	Sim	Não	Sim	Sim	N/A	N/A
Interpretação estatística	Sim	Não	Sim	Agnóstica	Não	Não
Teoria dos colapsos objetivos	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Histórias consistentes	Agnóstica	Agnóstica	Não	Não	Sim	Interpretacional
Lógica quântica	Agnóstica	Agnóstica	Sim	Sim	Não	Interpretacional
Interpretação de muitos mundos	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
Interpretação de muitos medidores	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Interpretacional
Interpretação de Bohm-deBroglie	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Interpretação Transacional	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Não
Consciência causa colapso	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Técnicas Quântica Relacional	Sim	Sim	Agnóstica	Sim	Sim	Sim
Medições inconclusivas	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Interpretacional

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

30/45

## Interpretações

- posição da maioria dos físicos: "**Cale-se e calcule**", (atribuído a Feynman)
- i.e.: questões não instrumentais (ontológicas) são **irrelevantes** para a Física (é coisa de filósofo)
- ou seja, o que interessa é que dê **bons resultados experimentais** (positivista? utilitarista?)

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

31/45

## Importância para o Ensino

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

32/45

## Importância para o Ensino

- cursos excessivamente matemáticos e não-conceituais
- desconhecimento do processo histórico/epistemológico de construção da MQ (teoria completa, acabada)
- defesa acrítica da interpretação ortodoxa de Copenhague

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

33/45

## Importância para o Ensino

- concepções errôneas (deu no Fantástico) arraigadas sobre MQ
- Ex.: 'sempre dual'
- tal como na Relatividade: tudo é relativo
- realistas (conservadores)
- particulistas (bolinha)(imagética dos livros-texto?)

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

34/45

## Importância para o Ensino

- os alunos desenvolvem suas próprias "interpretações"
- diferentes interpretações incompatíveis convivem simultaneamente num mesmo indivíduo (Perfil Conceitual?)
- as aparentes contradições da MQ parecem sugerir ao aluno que o ponto acima é OK

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

35/45

## Conclusão

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

36/45

## Contribuições

- *“A indústria que tem como finalidade a produção de equipamentos eletrônicos ou seus subprodutos (como os softwares) está na liderança da economia mundial. Hoje, uma fração significativa do Produto Interno Bruto (PIB) dos países avançados está associada a tecnologias baseadas na física quântica. O físico Leon Lederman (vencedor do Nobel de 1988) afirmou que um terço do PIB norte-americano em 2001 era proveniente dessas tecnologias.*

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

37/45

## Contribuições

- *No entanto, a contribuição da mecânica quântica e de seus desdobramento na área da física, não tem contribuído na economia apenas pela criação de objetos. Analistas de grandes centros financeiros usam cotidianamente métodos de simulação que envolve conhecimentos de física e estatística para prever a evolução dos preços de ações e outros ativos financeiros.*
- *Os países mais bem sucedidos no campo social e econômico são exatamente aqueles que mais tem estimulado os avanços científicos e as pesquisas de base. Há uma correlação direta entre a rapidez do crescimento econômico e a ação sólida e consistente de governos que estimulam o avanço científico.”*

(NUNES, 2007)

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

38/45

## Conclusão

- *“30% da economia mundial depende dos conhecimentos de Mecânica Quântica. O que você está fazendo aí parado? Vá estudar Quântica!”*

(fisica.net)

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

39/45

## Referências

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

40/45

## Referências

- HALLIDAY, RESNICK & WALKER, **Fundamentos de Física**, vol. 4, cap. 43, 44 e 45
- MORTIMER, **Linguagem e formação de conceitos no ensino de Ciências**, cap. 3
- PESSOA, Jr., Osvaldo. **Conceitos de Física Quântica**.
- HERBERT, Nick. **A realidade quântica: nos confins da nova física**. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1989.

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

41/45

## Referências

- MONTENEGRO, Roberto Luiz; PESSOA, Jr., Osvaldo. Interpretações da Teoria Quântica e as Concepções dos Alunos do Curso de Física. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 7, n. 2, maio 2002. Disponível em <[http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo\\_ID84/v7\\_n2\\_a2002.pdf](http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID84/v7_n2_a2002.pdf)>. Acesso em 4 abr. 2008

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

42/45

## Referências

- NUNES, Anderson Lupo. A Física Quântica para Todos. In: **Atas do XVII SNEF**, São Paulo : SBF, 2007. Disponível em <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xvii/sys/resumos/T0071-1.pdf>>. Acesso em 4 abr. 2008
- REIS, J. C.; GUERRA, A.; BRAGA, M.: Ciência e arte: relações improváveis? **História, Ciências, Saúde** - Manguinhos, out./2006. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/hcsm/v13s0/04.pdf>>

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

43/45

## Referências

- JACKIW, R. and KLEPPNER, D., One Hundred Years of Quantum Physics, **Science**, v. 289 n. 5481, p. 893, ago. 2000.
- JAMMER, Max. **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**. Wiley, 1974.
- GOMBRICH, E.H. **História da Arte**.

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

44/45

## Referências

- [http://pt.wikipedia.org/wiki/Mecânica\\_quântica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Mecânica_quântica)
- [http://pt.wikipedia.org/wiki/Interpretações\\_da\\_mecânica\\_quântica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Interpretações_da_mecânica_quântica)
- [http://pt.wikipedia.org/wiki/Paradoxo\\_EPR](http://pt.wikipedia.org/wiki/Paradoxo_EPR)
- [http://pt.wikipedia.org/wiki/Computador\\_quântico](http://pt.wikipedia.org/wiki/Computador_quântico)

23-mar-2010

© www.fisica-interessante.com

45/45