

5 - Física Moderna I

Tópicos Fundamentais de Física

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

1/106

Física Quântica

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

2/106

Teorias Clássicas da Estrutura da Matéria

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

3/106

Precursores

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

4/106

Babilônicos

- caos úmido
- *“Quando no alto o céu não era ainda nomeado, nem em baixo a terra tinha nome, Apsu, o primordial, de quem nascerão os deuses, e Tiamat, a genítriz, que os parirá todos, misturaram em um só todas as suas águas, mas não tinham formado as pastagens, nem descobertos os canaviais, quando nenhum dos deuses ainda aparecera, nem era dotado de nome nem provido de destino, então, de seu seio, os deuses foram criados.”* (Enuma elish, tablete 1)

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

5/106

Hermes Trismegistus

- trevas úmidas:
- *“Subitamente, tudo se abriu diante de mim num momento, e tive uma visão sem limites, tudo tornou-se luz, serena e alegre, e ao vê-la apaixonei-me por ela. E pouco depois surgiu uma obscuridade dirigindo-se para baixo, em sua natureza assustadora e sombria, enrolando-se em espirais tortuosas, como uma serpente, foi assim que a percebi. Depois esta obscuridade transformou-se numa espécie de natureza úmida, agitada de uma maneira indizível e exalando um vapor, como o que sai do fogo e produzindo uma espécie de som, um gemido indescritível. Depois lançando um grito de apelo, sem articulação, tal que o comparei a uma voz de fogo, e ainda que saindo da luz auto-existente; um Verbo santo veio cobrir a Natureza, e um fogo sem mistura exalta-se da natureza úmida em direção à região sublime, era leve, vivo e ativo ao mesmo tempo; e o ar, sendo leve, seguia ao sopro ígneo elevando-se ao fogo, a partir da terra e da água, de forma a parecer preso ao fogo; pela terra e pela água, permaneciam no mesmo lugar, se bem que não se percebesse a terra separada da água: estavam continuamente em movimento sob a ação do sopro do Verbo que colocara-se sobre elas, segundo percebia minha audição.”* (Poimandres, 4)

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

6/106

Velho Testamento

- águas primordiais:
- “A terra estava informe e vazia; as trevas cobriam o abismo e o Espírito de Deus pairava sobre as **águas**.” (Gênesis 1,2)

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

7/106

Órficos

- ovo primordial
- “Ó Poderoso primordial (Protogonos), ouve minha oração, duplo, nascido de ovo e vagueando através do ar, rugindo glorioso em Suas asas douradas, de quem as raças dos Deuses e dos mortais provêm. Ericapæus de celebrado poder, inefável, oculto, toda brilhante flor. Obscuro aos olhos, Tu eliminas a obscuridade da noite, esplendor que tudo penetra, pura e santa luz Por isso chamado Fanes (Eros), a glória do céu, em ondulantes asas pelo mundo tu voas. Príapo, esplendor de olhos negros, a Ti eu canto, gentil, todo prudência, sempre abençoado rei, Com alegre face em nosso direito divino e santo sacrifício propício brilha.” (Hino órfico a Protogonus)

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

8/106

Mitologia grega

- Eurinome e Oflão (vento norte)
- “No começo, no imenso caos do mundo, vivia solitária a bela e poderosa deusa Eurinome. Ela adorava dançar mas, não tendo uma base para apoiar seus pés, acabou por separar o céu do mar. Assim, começou a saltar e dançar por sobre as ondas que criara até que encontrou, do lado norte do mundo, um vento forte. Eurinome gostou do vento. Achou o seu frescor agradável e decidiu começar por ele a obra da criação. Apanhou, então, o flúido companheiro e, com as mãos enérgicas, esfregou-o até que se tornasse sólido. O vento se transformou em uma serpente, Oflão, que se estendeu aos pés de sua criadora. Com frio, Eurinome voltou a dançar para se aquecer. Ao tou a dançar para se aquecer. Ao vê-la dançando, a serpente se apaixonou pela deusa e uniu-se a ela para gerar todas as coisas que hoje existem. Ela, então, transformou-se em pomba, sentou-se sobre as águas do mar e pôs um ovo, que continha a natureza. Então, Oflão enrolou-se sete vezes ao redor do ovo para chocá-lo. Quando a casca rompeu saíram o Sol, a Lua, os planetas, os outros astros, a Terra, com suas montanhas e rios, as árvores, plantas, animais e os homens”

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

9/106

Mitologia grega

- Gaia e Urano
- “Primeiro que tudo surgiu o Caos E depois Gaia, de amplo peito Para sempre firme alicerce de todas as coisas E o brumoso Tartaro num recesso da terra de largos caminhos E Eros, o mais belo de entre os deuses imortais Que amolece os membros E no peito de todos os deuses e de todos os homens, domina o espírito e a vontade ponderada. Do Caos nasceu o Erebro e a negra Noite Da noite, por sua vez, nasceu o Éter e o Dia Que ela concebeu e deu a luz, depois da sua ligação amorosa com Érebro. E Gaia gerou primeiro Urano (o céu) constelado, igual a ela própria Para a cobrir em toda a volta E para ser eternamente a morada segura dos deuses bem-aventurados Deu à luz, em seguida, as altas montanhas Retiros aprazíveis das ninfas divinas Que habitam as montanhas arborizadas Também deu à luz o mar estéril Que agita com as suas vagas, o Ponto, seu deleitoso amor. E seguidamente, tendo partilhado o leito com Urano, Gerou o oceano dos redemoinhos profundos, E Coio e Crio e Hiperion e Jápeto...” (Hesíodo, Teogonia, 116-130)

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

10/106

Os Pré-Socráticos

- Busca de uma unidade, **um princípio**
 - Tales de Mileto: água
 - Anaximandro de Mileto: ápeiron
 - Anaximandro: ar
 - Xenófonos de Cólofon: terra
 - Heráclito de Éfeso: fogo

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

11/106

Os Pré-Socráticos

- matéria era contínua, não aceitavam o ‘vazio’ e, portanto, não podia haver ‘átomos’
- descrição era sensorialista, baseada em propriedades (macroscópicas)

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

12/106

Tales de Mileto (624-546 a.C.)



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

13/106

Tales

- primeiro a buscar uma explicação naturalística para o mundo
- rejeitou a tradição pela inquirição

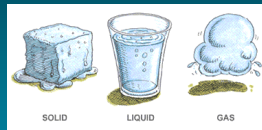
11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

14/106

Tales

- para Tales, o elemento básico, a partir do qual se tinha formado toda a matéria do Universo, era a **água**, possivelmente
 - porque se manifesta nos três estados da matéria e
 - porque a umidade é essencial à vida
- possível influência do Egito (rio Nilo)



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

15/106

Anaximandro (611-547 a.C.)



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

16/106

Anaximandro

- como a Natureza é cíclica, nem o fogo, nem a água, nem o ar e nem a terra podiam ser o princípio fundamental
- este deveria ser informe e conter os elementos antagonistas em forma potencial
- ⇒ *ápeiron*

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

17/106

“Os Atomistas”

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

18/106

“Atomistas”

- Introdução do atomismo
 - Anaxágoras de Clazômenas: *homeomerias*
 - Leucipo & Demócrito: ‘átomos’
 - Platão (Timeu): ‘átomos’ geométricos
- átomos ainda com propriedades
- substancialista
- realista (existência real, não modelos)

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

19/106

Demócrito (460-370 a.C.)



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

20/106

Demócrito de Abdera

- Desenvolveu a teoria do atomismo.
- Natureza composta por átomos, partículas individuais, eternas e imutáveis.
 - água: átomos arredondados e lisos
 - terra: átomos com arestas
 - sólidos: átomos com ganchos
 - óleo: átomos pequenos, penetrantes

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

21/106

Demócrito

- “Nada nasce do nada” e tudo se encadeia necessariamente em formulações atomistas.
- surgimento por composição de átomos,
- transformação por novos arranjos atômicos,
- destruição e morte por sua separação.

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

22/106

Demócrito

- Os seres surgiriam por composição destes átomos, transformando-se por novos arranjos atômicos e morrendo por sua separação.
- Somente o pensamento poderia conhecer os átomos, invisíveis às percepções sensoriais ⇒
 - o que se conhece pela percepção e
 - o que se conhece pelo pensamento

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

23/106

Platão (427-347 a.C.)



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

24/106

Platão

- fundou a *Academia*
- Inscrição sobre o portal: “Não entre aqui quem não sabe Matemática”
- escreveu *Diálogos e República* (utopia, sociedade ideal)
- teve influência sobre o Cristianismo

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

25/106

Platão

- em sua teoria das idéias, distingue o mundo sensível dos fenômenos do mundo inteligível das **idéias**, as quais, sendo a única verdade, o mundo dos fenômenos só existe na medida em que participa do mundo das idéias.
- a dialética eleva as almas e as idéias gerais são hierarquizadas, tendo no topo o Bem Supremo, reflexo da suprema beleza.

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

26/106

Platão

- o exemplo perfeito do conhecimento estaria na Matemática, que não se submete a opiniões subjetivas, sendo o conhecimento matemático preparatório para o pensamento chegar à intuição intelectual das idéias verdadeiras ⇒
 - conhecimento sensível (crença e opinião)
 - conhecimento racional (raciocínio e intuição)
- somente este último alcança o Ser e a verdade.

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

27/106

Platão

- os sentidos físicos não nos revelam a verdadeira natureza das coisas
- Ex.:
 - branco, reta, ouro (idéias)
 - objetos brancos, retilíneos, feitos de ouro (real)
- ⇒ as únicas coisas de fato permanentes e verdadeiras seriam as **idéias**

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

28/106

Platão

- o Mundo físico, por sua vez, não passaria de uma cópia imperfeita e mutável.
- observar o Mundo físico tal como a Ciência faz hoje pouco serviria, portanto, para alcançarmos uma compreensão da realidade, embora servisse para reconhecermos, ou recordarmos, as idéias perfeitas que traríamos dentro de nós.

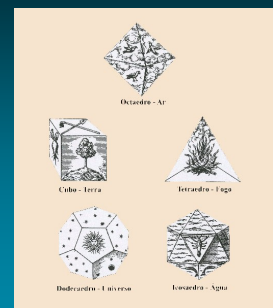
11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

29/106

Platão

- atomismo geométrico
- fogo - tetraedro (4 faces)
- terra - cubo (6 faces)
- ar - octaedro (8 faces)
- água - icosaedro (12 faces)
- éter - dodecaedro (20 faces)



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

30/106

A Recuperação do atomismo

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

31/106

Recuperação do atomismo

- átomo como modelo
 - Francis Bacon
 - Gassendi
 - Boyle
 - Lémery
 - Newton: deduz a Lei de Boyle
 - Descartes: horror ao vácuo
 - Faraday: vácuo isolante

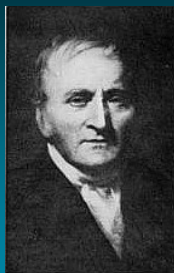
11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

32/106

Modelo Atômico de Dalton

- Aplicação à Química
 - formação dos compostos a partir dos elementos
 - única propriedade: "peso"
 - "peso relativo" = equivalente-grama
 - molécula: combinação de átomos em proporções simples

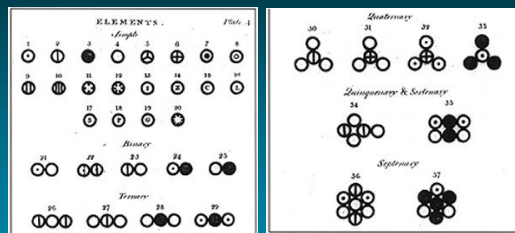


11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

33/106

Modelo Atômico de Dalton



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

34/106

Modelo Atômico de Dalton

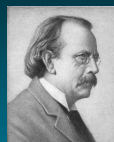
- início do átomo clássico, mecânico
- racionalização dos dados químicos
- conservação da massa

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

35/106

Modelo Atômico de Thompson



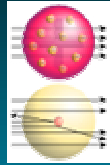
- raios catódicos: e/m = elétron
- cargas elétricas
- átomo composto
- 'pudim de ameixas'

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

36/106

Modelo Atômico de Rutherford



- estudante de Thompson
- espalhamento por folha de ouro
 - ⇒ partículas carregadas
 - ⇒ núcleo

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

37/106

Modelo Atômico de Rutherford

- coroamento do átomo clássico
- propriedades macroscópicas resultantes das interações
- átomo material, com propriedades microscópicas

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

38/106

Röntgen & Von Laue



- Em 1895 e 1896 Röntgen elabora pesquisas que evidenciam a emissão de uma radiação diferente que chamam de raio X, von Laue confirma em 1912 estes trabalhos.

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

39/106

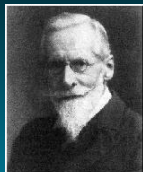
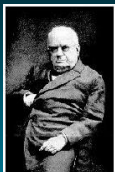
Final do séc. XIX

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

40/106

O Fim da Física



- Os raios catódicos são identificados no final do século XIX por Hottorf, e aperfeiçoados por Goldstein e Crookes
- No final do século XIX, parece que a física está acabada para a maioria dos físicos.

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

41/106

O Fim da Física

- *“Agora, não há mais nada novo para ser descoberto pela Física. Tudo o que nos resta são medições cada vez mais precisas.”* (Lord Kelvin, matemático, físico e presidente da *Royal Society* Britânica)

(em palestra para a *British Association for the Advancement of Science* em 1900)

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

42/106

Séc. XX

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

43/106

Pierre e Marie Curie

- Pierre e Marie Curie: pesquisa em química sobre as substâncias a que dão o nome de **radioativas**



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

44/106

Radioactividade

- natural: urânio, tório
- artificial: reactores, plutônio, tecnécio

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

45/106

Efeitos biológicos

1. Ionização atômica: radicais livres
2. Átomos excitados: reacções químicas
3. Alterações biológicas no núcleo

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

46/106

Aplicações das radiações

- imageologia: radiografia, TAC, termografia
- terapias: infravermelhos, ultravioletas, raios X, laser

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

47/106

Rutherford & Soddy



- Entre 1900 e 1904, Rutherford e Soddy lançam a hipótese da transmutação dos átomos radioativos, hipótese ousada para a época, que sofreu várias críticas.

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

48/106

Radiação de Corpo Negro

- corpo quente emite radiação
- a frequência é característica da temperatura (Lei do corpo negro)
 - infravermelho (calor)
 - luz visível (rubro)
 - raios X
 - raios gama

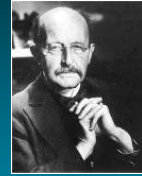
11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

49/106

Planck

- hipótese de radiação em pacotes, que denominou, no singular de quantum.
- frequência proporcional à energia contida



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

50/106

Radiação de Corpos Negros

- h: cte. de Planck: $6,63 \times 10^{-34}$ J·s
- k: cte. de Boltzmann: $1,38 \times 10^{-23}$ J/K
- 12/1900: "elemento de energia" → quantum
- radiação contínua

$$E(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

$$U_n = N\varepsilon$$

$$\varepsilon = h\nu$$

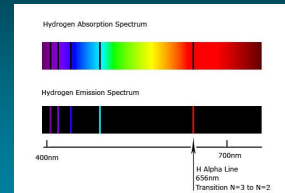
11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

51/106

Espectros de emissão

- conhecidos desde 1860



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

52/106

Bohr

- início da visão quântica
- utiliza a teoria quântica de Planck
 - estados estacionários
 - órbitas clássicas



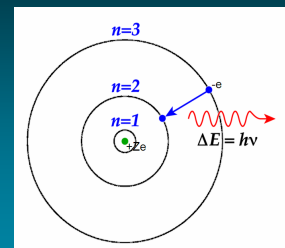
11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

53/106

Interpretação de Espectros

- racionaliza dados espectroscópicos
- ação quantizada
- frequência proporcional à diferença de energias



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

54/106

Interpretação de Espectros

- cte. de Rydberg:
1,097×10⁷ m⁻¹
- raio de Bohr:
5,292×10⁻¹¹ m

$$L = n \frac{h}{2\pi}$$

$$\Rightarrow E = -\frac{me^4}{8\epsilon_0 h^2} \frac{1}{n^2}$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

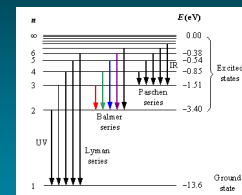
11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

55/106

Modelo Atômico de Bohr

- passo decisivo no conhecimento do átomo
- comparável à introdução do sistema de Copérnico



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

56/106

Modelo Atômico de Bohr

- deu sólida base experimental à elaboração da mecânica quântica
- estudou as variações progressivas das propriedades químicas dos elementos

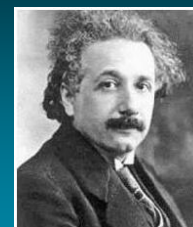
11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

57/106

Einstein

- Aos 3 anos é considerado retardado pelo pai
- Aos 23 anos começa a elaborar a Teoria da Relatividade (Restrita)



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

58/106

Einstein

- 1905 – publica a TR sob o título de “sobre a Termodinâmica dos corpos em movimento”
- 1907 - Universidade de Berna oferece-lhe emprego de professor de física
- 1916 - enuncia a Teoria da Relatividade Geral
- 1921 - Prêmio Nobel de Física por seus estudos sobre o **efeito fotoelétrico**
- 1955 - morre aos 76 anos, deixando incompleta a Teoria do Campo Unificado

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

59/106

Efeito Fotoelétrico

- probl. da intensidade
- probl. da freqüência
- 03/1905: radiação quantizada
- Teoria corpuscular da luz
- Planck (1913): Einstein “perdeu o rumo nas suas especulações”

$$E = h\nu$$

$$E = E_c + mc^2$$

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

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

$$E = h\nu = \phi + eV_0$$

$$\Rightarrow V_0 = (h/e)\nu - \phi/e$$

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

60/106

de Broglie

- raciocinou por analogia: existem cargas positivas e negativas, frio e o calor, etc.
- o universo observável é composto inteiramente de matéria e energia (luz, raios cósmicos, etc.).
- previu o comprimento de onda de uma radiação associada a um elétron



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

61/106

Dualismo Partícula-Onda

- Einstein, de Broglie & Schrödinger
- energia quantizada: partícula
- momento linear como função do comprimento de onda: onda
- de Broglie (1923): extensão à matéria
- difração de elétrons (1927)

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

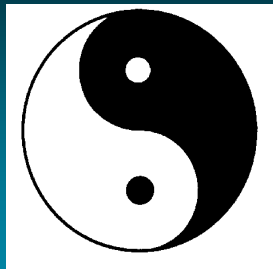
11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

62/106

Princípio da Complementaridade

- Bohr (1928): partícula e onda: aspectos complementares mas não simultâneos
- Davies: "não tente visualizar uma onda-partícula!"



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

63/106

Efeito Compton

- Compton (1923): dois picos: λ e λ'
- fóton perde energia na colisão com elétron livre $\Rightarrow \lambda' < \lambda$
- colisão com elétron não livre: elástica $\Rightarrow \lambda$
- colisão c/ conservação de momento e de energia
- extensão do modelo dualístico ao raio-X

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

64/106

Princípio de Incerteza

- Heisenberg (1927)
- não se pode saber ao mesmo tempo onde está e com qual velocidade
 - \Rightarrow abandonar a "falácia da bolinha"

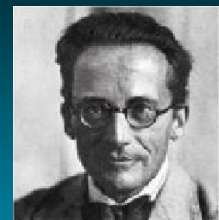
$$\begin{aligned}\Delta x \cdot \Delta p_x &\approx h \\ \Delta E \cdot \Delta t &\approx h \\ \Delta x &= L \\ \Delta p &= 2p = \frac{2h}{2L} \\ \Delta x \cdot \Delta p &\approx h\end{aligned}$$

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

65/106

Erwin Rudolf Josef
Alexander Schrödinger
(1887-1961)



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

66/106

Schrödinger

- físico austríaco
- 1933: deixou Alemanha devido ao Nazismo
- 1933: em Oxford mas com problemas por ser adúltero, bem como sua mulher, com seu amigo Weyl
- 1934: não conseguiu Princeton nem Edimburgo por causa do seu relacionamento
- 1936: conseguiu posição em Graz
- 1938: Hitler invade Áustria, foge p/ Itália
- 1940: convidado para estabelecer o Instituto de Estudos Avançados em Dublin
- mantém casos escandalosos com estudantes

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

67/106

Schrödinger

- 1944: publica *O que é a vida?*, discussão sobre a Neguentropia e sobre uma molécula complexa que contém o código genético que inspira Watson e Crick a pesquisar o 'gene' e acabar descobrindo a molécula de DNA
- sempre teve interesse na filosofia Vedanta do Hinduísmo, inspirando especulações sobre a possibilidade de que a consciência individual seja apenas a manifestação de uma consciência unitária que pervade o Universo

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

68/106

Schrödinger

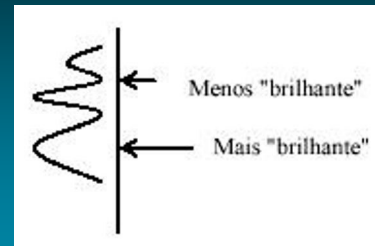
- 1944: publica *O que é a vida?*, discussão sobre a Neguentropia e sobre uma molécula complexa que contém o código genético que inspira Watson e Crick a pesquisar o 'gene' e acabar descobrindo a molécula de DNA
- sempre teve interesse na filosofia Vedanta do Hinduísmo, inspirando especulações sobre a possibilidade de que a consciência individual seja apenas a manifestação de uma consciência unitária que pervade o Universo

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

69/106

Experiência de Young para elétrons



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

70/106

Experiência de Young para elétrons

- $P_1 = |\psi_1(z)|^2$
- $P_2 = |\psi_2(z)|^2$
- $P_{1,2} = |\psi_1(z) + \psi_2(z)|^2$
 $= |\psi_1(z)|^2 + |\psi_2(z)|^2 + 2|\psi_1(z)\psi_2(z)|$
 $\neq |\psi_1(z)|^2 + |\psi_2(z)|^2$
- $|\psi_1(z)\psi_2(z)|$: termo de interferência
- $\psi_1(z), \psi_2(z)$: **funções de onda**

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

71/106

Função de onda

- na Mecânica Clássica, um sistema é completamente descrito pela posição e velocidade de todas as partículas. Sua evolução é determinista.
- na Mecânica Quântica, a descrição do sistema termina ao nível da função de onda. Sua evolução é probabilista.

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

72/106

Função de onda

- função complexa das coordenadas

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

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

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

73/106

Função de onda

- Onda plana:
- $\psi_1(x,t) = Ae^{i(kx-\omega t)}$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} &= \frac{\partial Ae^{i(kx-\omega t)}}{\partial t} \\ &= -i\omega Ae^{i(kx-\omega t)} \\ &= -i\omega \psi(x,t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 Ae^{i(kx-\omega t)}}{\partial x^2} \\ &= -k^2 Ae^{i(kx-\omega t)} \\ &= -k^2 \psi(x,t) \end{aligned}$$

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

74/106

Equação de Schrödinger

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V(x, y, z) \Psi$$

- obteve a 'equação de movimento' quântica
- descreve a evolução da 'função de onda' da partícula
- embora seja chamada de 'equação de onda', é, na verdade, uma **equação de difusão**

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

75/106

Schrödinger

- 1922: publica artigo "Quantisierung als Eigenwertproblem" na Annalen der Physik, contendo sua equação, que dava os níveis de energia corretos para o átomo de Hidrogênio

$$\psi_{nlm} = R_{nl}(r) Y_{lm}(\theta, \phi)$$

$$R_{nl}(r) = \sqrt{\left(\frac{2Z}{na_0}\right)^3 \frac{(n-l-1)!}{2n[(n+l)!]} e^{-Zr/na_0} \left(\frac{2Zr}{na_0}\right)^l L_{n-l-1}^{2l+1}\left(\frac{2Zr}{na_0}\right)}$$

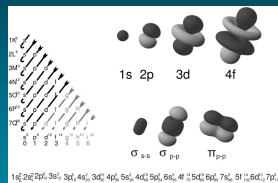
11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

76/106

Mecânica Quântica

- Born (1926): interpretação probabilística
- Schrödinger:
 - $e\Psi\Psi^*$: densidade de carga
 - Ψ : no espaço de configurações

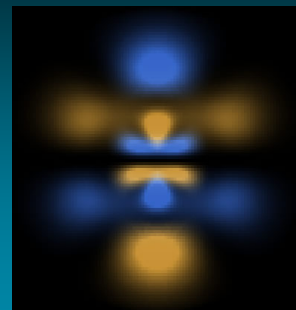


11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

77/106

Orbitais atômicos



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

78/106

Irrealidade

- “Os físicos estão se acostumando, pouco a pouco, a considerar as órbitas eletrônicas etc., não como realidade e sim como uma espécie de ‘potência’. A linguagem terminará se acostumando, ao menos até certo ponto, a esta situação real. Mas não é uma linguagem precisa com que se possa empregar os modelos lógicos normais, é uma linguagem que produz imagens em nossa mente, porém junto com elas provoca também a sensação de que as imagens só têm uma vaga relação com a realidade, que representam somente uma tendência até a realidade.”

Heisenberg

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

79/106

Princípio da Correspondência

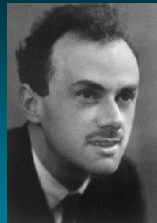
- “As equações da Física Quântica reduzem-se às leis clássicas, nas condições em que há concordância entre essas leis clássicas e a experiência.”
(Bohr & Heisenberg)

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

80/106

Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984)



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

81/106

Equação de Dirac

- 1928: quântica + relatividade = Equação de Dirac

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

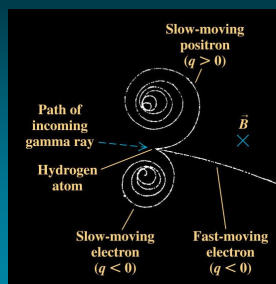
11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

82/106

Dirac

- soluções quadridimensionais
- 2 para os estados do elétron
- e as outras 2?
 - ⇒ pósitron (1932)
 - ⇒ antimatéria



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

83/106

Dirac

- 1930: publica Principles of Quantum Mechanics, livro-texto até hoje
- inclui a notação bra-ket

$$|\psi\rangle = (c_0, c_1, c_2, \dots)^T$$

$$\langle\psi| = (c_0^*, c_1^*, c_2^*, \dots)$$

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

84/106

Dirac

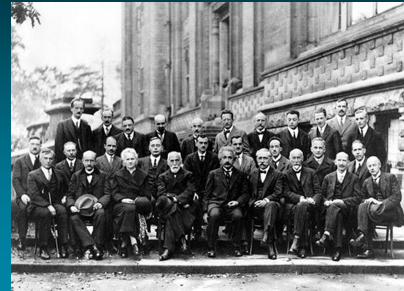
- 1930: eleito para Royal Society
- 1933: Prêmio Nobel com Schrödinger

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

85/106

Congresso de Solvay 1927



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

86/106

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

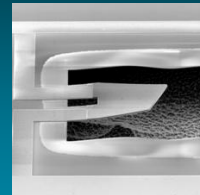
11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

87/106

Superposição macroscópica

- Aaron O'Connell (UC /Santa Barbara) & col.
- ressonador piezoelétrico (40 μm)
- $T=20 \times 10^{-3}$ K
- efeitos quânticos:
 - amplitude quantizada
 - superposição de estados vibrante e não-vibrante



11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

88/106

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

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

89/106

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

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

90/106

Medições

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

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

91/106

Interpretações

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

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

92/106

Principais Interpretações

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

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

93/106

Várias interpretações

Interpretação	Determinística?	Função de onda real?	História única?	Variáveis ocultas?	Funções de onda colapsantes?	Observador tem papel?
Interpretação de Copenhagen	Sim	Sim	Sim	Sim	N.A.	N.A.
Interpretação estatística	Sim	Sim	Sim	Agnóstica	Sim	Sim
Teoria dos colapsos objetivos	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Histórias consistentes	Agnóstica	Agnóstica	Sim	Sim	Sim	Interpretacional
Lógica quântica	Agnóstica	Agnóstica	Sim	Sim	Sim	Interpretacional
Interpretação de muitos mundos	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Interpretação de muitos mentes	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Interpretacional
Interpretação de Bohm-deBroglie	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Interpretação Transacional	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Consciência causa colapso	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Mecânica Quântica Relacional	Sim	Sim	Agnóstica	Sim	Sim	Sim
Medições incompletas	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Interpretacional

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

94/106

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?)

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

95/106

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 Copenhagen

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

96/106

Importância para o Ensino

- concepções errôneas (deu no Fantástico) arraigadas sobre MQ
- Ex.: 'sempre dual'
- tal como na Relatividade: tudo é relativo

- realistas (conservadores)
- particelistas (bolinha)(imagética dos livros-texto?)

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

97/106

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

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

98/106

Conclusão

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

99/106

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."*

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

100/106

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)

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

101/106

Conclusão

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

(fisica.net)

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

102/106

Referências

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

103/106

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.

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

104/106

Referências

- 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>>
- 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
- GOMBRICH, E.H. *História da Arte*.

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

105/106

Referências

- <http://pt.wikipedia.org/wiki/Cosmogonia>
- http://pt.wikipedia.org/wiki/Mecânica_quântica
- http://en.wikipedia.org/wiki/Interpretation_of_quantum_mechanics

11-jun-2011

© www.fisica-interessante.com

106/106