

## **HG 516 - EPISTEMOLOGIA DA FÍSICA**

Prof. Silvio Seno Chibeni – 1º semestre 2008

### **Segunda prova – 26/6/2008**

- *Responda com letra legível, de forma clara e objetiva.*
- *Deixe amplas margens para permitir eventuais anotações do professor.*
- *Indique os itens e sub-itens em cada resposta. Não responda em bloco.*
- *Permitida (exclusivamente) a consulta a materiais impressos não-circulantes.*
- *As questões têm pesos iguais. Esta prova tem peso igual ao da primeira. Exame (para quem tiver média menor que 5,0.) dia 8 de julho, sobre toda a matéria do curso.*

1. Considere as seguintes concepções ontológicas:
  - a) concepção ondulatória da luz;
  - b) concepção corpuscular da luz;
  - c) concepção corpuscular da matéria “ponderável” (átomos, elétrons, etc.).
  - d) concepção ondulatória da matéria “ponderável” (átomos, elétrons, etc.);

a) Indique, em cada caso, alguns dos principais fenômenos e/ou teorias que, em determinadas épocas da história da física moderna e contemporânea (i.e. do séc. XVII para cá), foram vistos como evidência a favor da concepção. b) Indique também essas épocas e pelo menos um cientista importante que defendeu a concepção.
2. a) Descreva o experimento das duas fendas (faça os desenhos apropriados e indique o que significa cada elemento desse desenho). b) Indique que aspectos requerem uma ontologia de ondas, e que aspectos requerem uma ontologia de partículas (não basta só indicar elementos do diagrama; explique do que se trata).
3. a) Como é descrito o estado de um objeto simples (“ponto material”) na mecânica clássica? Que lei determina a evolução temporal desse estado? b) O que se entende quando se diz que essa evolução é determinista?
4. a) Como a mecânica quântica caracteriza estados e grandezas físicas? Como a teoria atribui valores às grandezas físicas? b) Explique por que esse modo pelo qual a mecânica quântica funciona matematicamente sugere que os estados quânticos não fornecem uma descrição completa das propriedades dos objetos físicos. (Nessas respostas não precisa dar detalhes matemáticos; basta explicar em termos gerais.)
5. Schrödinger mostrou, em 1935, que se os estados quânticos forem considerados como contendo toda a informação possível sobre as propriedades dos objetos e se eles evoluírem temporalmente segundo sua equação, chega-se a uma conclusão que não apenas contraria os fatos, mas parece mesmo absurda. Explique esse argumento em linhas gerais (não precisa dar detalhes matemáticos).

**Correção:**

1.

*A) concepção ondulatória da luz:*

a) Difração e interferência da luz, redução da óptica ao eletromagnetismo pela teoria de Maxwell.

b) A concepção foi proposta por Huygens, no séc. XVII, e depois retomada início do século XIX por Young e Fresnel.

*B) concepção corpuscular da luz:*

a) Propagação retilínea da luz (projeção de sombras nítidas), composição e decomposição da luz branca em cores, efeito fotoelétrico e efeito Compton.

b) No séc. XVII, essa concepção foi defendida, em versões diferentes, por Descartes, Gassendi e Newton. A teoria newtoniana da luz, exposta no *Opticks*, de 1704, que propunha uma ontologia corpuscular, teve aceitação quase unânime no séc. XVIII. No início do séc. XX, uma ontologia de corpúsculos voltou a ser considerada por Einstein, para explicar o efeito fotoelétrico, e por Compton, para explicar o fenômeno que leva seu nome.*C) concepção corpuscular da matéria “ponderável”:*

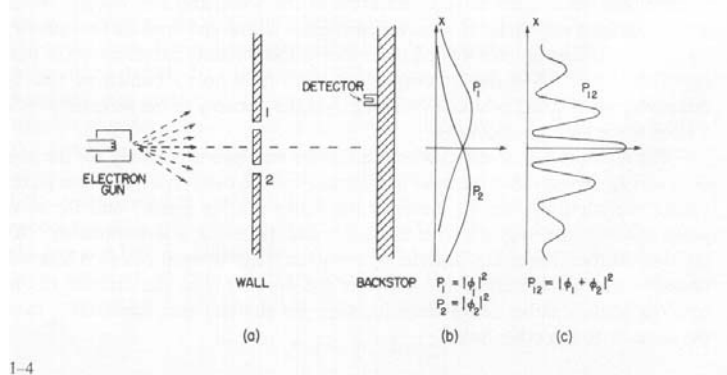
a) Fenômenos químicos, teoria cinética dos gases, mecânica estatística, movimento browniano, experimentos de J. Thomson (descoberta do elétron) e Rutherford (espalhamento de radiação alfa por uma película de ouro).

b) Essa concepção remonta aos atomistas da Antigüidade (Leucipo, Demócrito, Lucrecio); voltou a ser defendida no início do período moderno (séc. XVII) por Boyle, entre outros, que propôs uma química e teoria cinética baseadas nela. No séc. XIX ganhou impulso com a teoria química de Dalton, e depois com a mecânica estatística de Maxwell e Boltzmann. No séc. XX recebeu evidência muito forte por ser capaz de prever detalhes e explicar o fenômeno do movimento browniano (Perrin, Einstein).

*D) concepção ondulatória da matéria “ponderável”:*

a) Difração e interferência de elétrons (experimentos de C. Davisson e G. Thomson), quantização no átomo de Bohr.

b) Os fenômenos acima referidos foram observados em meados da década de 1920, comprovando assim a idéia de Louis de Broglie, em sua tese de 1924.

2. a) (Figura adaptada de Feynman, *Lectures on Physics*, vol. 3, p. 1-4.)

À esquerda está a fonte do objetos quânticos (neste caso, elétrons, mas poderia ser outro tipo de objeto, como fótons). Depois vem um anteparo com as duas fendas, 1 e 2. Em seguida vem uma placa onde os objetos são detectados, como um filme fotográfico, uma tela fosforescente, uma placa com um pequeno detector móvel (como indicado nesta figura). Os dois gráficos da direita representam as distribuições estatísticas dos objetos detectados. A curva indicada por  $P_1$  é a que se obtém quando somente a fenda 1 está aberta; analogamente para  $P_2$ . Quando ambas estão abertas, obtém-se  $P_{12}$ .

b) Se os objetos fossem partículas, que passassem por uma ou outra das fendas, o resultado com ambas as fendas abertas seria simplesmente a soma de  $P_1$  e  $P_2$ , o que não dá o mesmo que  $P_{12}$ . Esta última apresenta franjas (alternância de regiões de maior e de menor intensidade, ou probabilidade de chegada dos objetos), e esse fenômeno só se explica pela suposição de que os objetos passam por ambas as fendas e têm natureza ondulatória. Mas prestando-se atenção ao processo pelo qual as franjas se formam (ou, aliás, qualquer uma das outras duas curvas), nota-se que vão surgindo ponto a ponto, o que requer que se conceba os objetos como partículas.

3. a) Para um corpo pequeno (“partícula”), o estado na mecânica clássica é especificado por sua posição e seu *momentum* (massa vezes velocidade). O estado é, então, um conjunto de 6 números, dando as componentes da posição e momentum ao longo dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Esse estado evolui no tempo segundo a segunda lei de Newton, ou seja,  $F=ma$ , onde  $F$  é a força que age sobre o corpo,  $m$  sua massa e  $a$  sua aceleração.

b) Determinismo significa que a partir do conhecimento da massa, posição e a velocidade de um corpo em um dado instante, a lei dinâmica de evolução do estado permite prever sua posição e velocidade em um instante posterior ou anterior qualquer, se forem especificadas as forças que atuam sobre o corpo durante esse intervalo de tempo.

4. a) Na mecânica quântica, os estados são representados por funções matemáticas de valores complexos, chamadas funções de onda; de forma mais geral, os estados são vetores em espaços de Hilbert. As grandezas físicas, por sua vez, são caracterizadas por operadores nesses espaços, ou seja, elementos matemáticos que transformam um vetor em outro. A teoria só atribui valores a uma grandeza física  $A$  quando o estado for tal que o operador que representa a grandeza aplicado a ele transforma-o no mesmo estado, multiplicado por um número real,  $a$ , digamos; o valor atribuído à grandeza é justamente esse número. Em outros termos: À grandeza  $A$  atribui-se um valor quando, e somente quando, o estado for um autoestado do operador  $A$ ; o valor atribuído é o autovalor  $a$  associado ao autoestado.

b) Como isso nem sempre ocorre – na verdade é uma exceção, e não situação mais comum –, para qualquer grandeza física, na maioria dos estados possíveis para o objeto a teoria não atribui um valor à grandeza. Mas como a grandeza física pode, mesmo nessas condições, ser mensurada, com a obtenção normal de um resultado, e esse resultado não estando previsto na teoria, temos, aparentemente, uma falha preditiva.

5. A situação paradoxal surge quando aplicamos a lei da evolução temporal dos estados quânticos, a equação de Schrödinger, ao estado de um sistema composto, formado por um objeto e um aparelho de medição. Se o estado quântico do objeto inicialmente for tal que não há indicação do valor da propriedade medida (ou seja, se o estado não for autoestado do operador que representa a grandeza medida), o estado do sistema evolui de tal modo que essa indefinição de propriedade se transmite (“contamina”) o estado do aparelho, que assim fica, no final, num estado também indefinido. Isso evidentemente não corresponde aos fatos, nem é impossível visualizarmos ou concebermos um objeto macroscópico neste estado (sem uma posição de ponteiro definida, por exemplo). Para tornar o problema mais dramático, Schrödinger considerou o acoplamento do aparelho a um “mecanismo infernal”, envolvendo um gato, que no fim da estória, se a mecânica quântica for considerada completa, também fica num estado indefinido de vida e morte.