



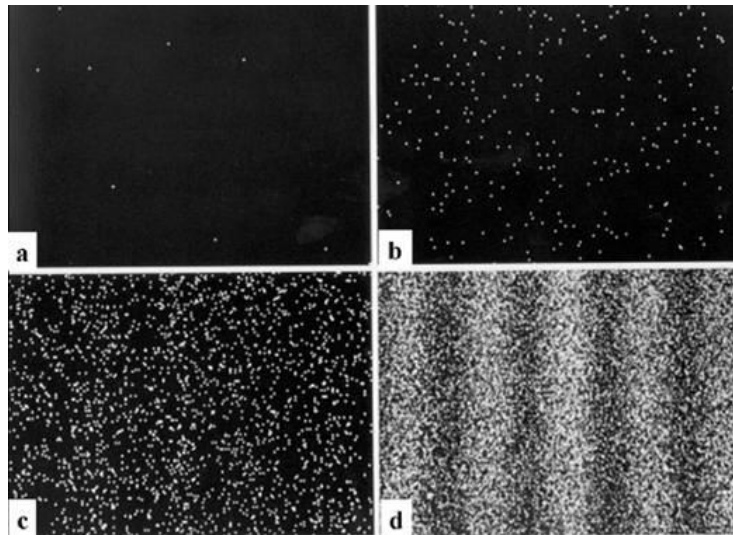
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA



Física Moderna I - 4300375 - Período: noturno

1º Semestre de 2012

GUIA DE TRABALHO



Tópico II – Fenômenos físicos e o caráter dual da radiação eletromagnética: onda-partícula – os fótons.

Maria José (Mazé) Bechara



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



INSTITUTO DE FÍSICA

Física Moderna I – 4300375 - período noturno - 1º semestre de 2012

Professora Maria José (Mazé) Bechara

Guia de trabalho

Tópico II – Fenômenos físicos e o caráter dual da radiação eletromagnética: onda-partícula – os fótons

Tempo previsto: ~07 aulas

Obs. importante: este tópico tem como pré-requisito os conhecimentos básicos de ondas eletromagnéticas e de dinâmica relativística.

Apresentação do Tópico:

O tópico se iniciará discutindo a principal consequência da existência de cargas com acelerações nos constituintes da matéria: a emissão de ondas eletromagnéticas, como previsto no eletromagnetismo clássico, que levou à primeira quantização na Física, proposta por Planck. Depois evoluirá para a proposta de Einstein para o caráter dual da radiação eletromagnética e os fenômenos físicos que sustentam esta concepção.

Os resultados relativos à emissão de um corpo na temperatura T foram obtidos a partir de experimentos com cavidades no interior de diferentes materiais sólidos em equilíbrio termodinâmico. As medidas são da intensidade total (nos diversos comprimentos de onda) e da intensidade espectral, ou seja, da intensidade por intervalo (infinitesimal) de comprimento de onda, emitidos pelo sistema no equilíbrio termodinâmico na temperatura T .

Esta cavidade representa um “forno perfeito”, e é muito próximo do que se chama em Física de “corpo negro”: um corpo com coeficiente de emissão = coeficiente de absorção = 1. A radiação emitida por qualquer forno real é igual à de qualquer corpo na mesma temperatura, e estes corpos seguem o mesmo padrão de emissão do corpo negro, apenas multiplicado por uma constante – seu coeficiente de emissão.

Este fenômeno era esperado ser bem descrito do ponto de vista teórico usando a mecânica estatística de Boltzmann no modelo cinético (mecanicista) do sólido e as ondas eletromagnéticas estacionárias na cavidade, descritas no eletromagnetismo de Maxwell. Surpreendentemente os resultados experimentais não são descritos por estas teorias. As previsões teóricas da Física Clássica não apenas não concordam com os experimentos como

preveem a emissão de intensidade infinita, portanto de energia infinita nas frequências mais altas, para qualquer temperatura T!

Este resultado é um “sacrilégio” na Física, e por isso recebeu o dramático nome de “catástrofe do ultravioleta”. Este efeito foi calculado pioneiramente, e de forma independente pelos físicos: Rayleigh e Jeans.

Como explicar a previsão incorreta por modelo e teorias corretas? Ou estaria errado o modelo mecânico de sólido? Ou uma das teorias: a mecânica estatística de Boltzmann ou a eletrodinâmica de Maxwell, não seria correta? Qual delas? Ou ambas? Mas porque descrevem tão bem tantos outros fenômenos?

É nesse contexto que Planck, em um trabalho (teórico) de 1900, introduz uma hipótese nova: a quantização da energia dos osciladores no interior da matéria. E com esta hipótese, e utilizando a mecânica estatística de Boltzmann com energias discretas e a eletrodinâmica de Maxwell, ele consegue reproduzir quantitativamente os resultados experimentais da radiação do corpo negro, e com precisão espantosa, ajustando uma única constante por ele inventada, que ficou conhecida como constante de Planck (h). Ficaram preservadas as teorias, e foi introduzida uma quantização na energia dos osciladores da matéria.

Como sua hipótese de quantização era totalmente sem sentido nas teorias físicas e nas observações do mundo macroscópico, o próprio criador não acreditou muito em sua criação.

Em 1905, portanto 05 anos após a proposta de Planck, Einstein propõe que a luz, apesar de ser onda eletromagnética descrita por Maxwell, tem a energia “granulada”, diferentemente do resultado ondulatório com energias continuamente distribuídas no espaço. Segundo tal concepção a energia eletromagnética está em “pacotes” de energia proporcionais à frequência da onda eletromagnética: $\epsilon = h\nu$ (a constante de proporcionalidade é exatamente a de Planck), que se movem “guiados” pela onda eletromagnética, e com a velocidade dela. Estas porções (quanta em latim) de energia obedecem à dinâmica de uma partícula relativística de massa de repouso zero. Estas “partículas” são conhecidas por fótons. Elas nunca existem em repouso já que viajam sempre com a velocidade da onda eletromagnética: c no vácuo para quaisquer referenciais inerciais!

Todos os resultados previstos para o conjunto de fótons são compatíveis com os resultados obtidos na teoria ondulatória de Maxwell. O entendimento atual é que os fótons só se “revelam” quando, luz de qualquer frequência, mesmo não visível pelos olhos humanos, interage com um constituinte da matéria, ou seja, quando a interação não é do conjunto de fótons com o conjunto dos constituintes da matéria (partículas materiais). A partir concepção foram buscados e encontrados muitos fenômenos de interação da onda eletromagnética com a matéria nos quais se evidencia a existência dos fótons.

Essa nova concepção, do caráter dual da energia eletromagnética, sugere que é mais correto nomear esse ente físico de radiação eletromagnética em vez de onda eletromagnética. Este é o tema que segue no tópico ao tratamento da radiação do corpo negro, e permite entender, em parte, porque a proposta de Planck, aparentemente “non sense” levava a resultados em acordo com o experimento.

Muitos dos fenômenos, interpretações dos fenômenos, determinações dos resultados pela idéia fotônica, a compatibilidade com o observado e a descrição ondulatória, serão

tratados no Tópico II: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton, a produção de raios-X por interação de elétrons energéticos com a matéria, a produção e a aniquilação de pares de partículas, em particular do par elétron-pósitron.

Entender o caráter dual da radiação eletromagnética, cada um dos fenômenos que evidenciam o caráter fotônico, determinações quantitativas sobre eles, as diferenças entre eles, compõem o tema central do presente tópico.

Com o avançar dos conhecimentos científicos no século XX se chegou a muitas quantizações no universo físico, em particular às quantizações de energia em alguns sistemas descritos na mecânica quântica, e aparece a constante “ajustadora” da radiação do corpo negro criada por Planck. O que se constatou é que Planck “atirou onde viu e acertou onde não viu”. Profundo conhecedor da Física Clássica e de extrema honestidade intelectual relutou em aceitar a universalidade de sua criação, que a evolução da ciência consagrou.

A introdução do conceito da dualidade onda-partícula para a radiação eletromagnética, inconcebível na concepção clássica na qual “onda é onda e partícula é partícula”, foi muito lentamente absorvida pela comunidade científica, pois apesar de serem antagônicas às idéias clássicas, as evidências experimentais a sustentam.

Em 1924, com argumento de simetria na natureza dos entes físicos que compõem o universo físico então conhecido: partículas materiais e radiação eletromagnética, Louis de Broglie propôs o caráter dual também das partículas da matéria. E um ano depois nasce a mecânica quântica.

Mas esta é outra história que fica para os próximos tópicos!

Conteúdo detalhado:

II.1 A radiação de um corpo real por efeito de temperatura e a radiação do corpo negro: resultados experimentais. O fracasso das previsões da teoria clássica do eletromagnetismo e da mecânica estatística clássica dos sólidos para descrever a emissão por efeito do corpo negro (por efeito de temperatura): a catástrofe do ultravioleta obtida teoricamente por Rayleigh e Jeans. A proposta de Planck que permitiu a descrição das observações do corpo negro – o início da Física Quântica.

II.2 A proposta do caráter corpuscular da radiação eletromagnética por Einstein: o fóton, partícula de massa nula, energia proporcional à frequência e módulo do momento linear inversamente proporcional ao comprimento de onda. Comparação entre a quantização de Planck e a de Einstein.

II.3 A compatibilidade entre as concepções ondulatória e corpuscular da radiação eletromagnética para a intensidade da radiação eletromagnética monocromática e harmônica.

II. 4 Fenômenos que evidenciam o caráter corpuscular da radiação: o espalhamento de raios-X e raios- γ com mudança de comprimento de onda (efeito Compton); a produção de raios-X com a frequência máxima produzidos no freamento de elétrons (de keV de energia cinética) na matéria, a produção e a aniquilação de um par partícula-anti-partícula (elétron e pósitron, por exemplo).

II.5 A absorção da radiação pela matéria nas descrições ondulatória e corpuscular. A competição entre os vários fenômenos: a seção de choque (probabilidade) de cada fenômeno em função da frequência e a seção de choque total.

Livros textos (Escolha! A leitura de pelo menos um deles é indispensável):

1. *Física Quântica* do Eisberg e Resnick; Editora Campus Caps. 1 e 2.
2. *Física Moderna* - Paul A. Tipler e Ralph A. Llewellyn (TL), terceira edição - traduzido para o português pela editora LTC, Cap. 3 (a partir do item 3.2);
3. *Notas de aulas* do Prof. Roberto Ribas (IFUSP), no seguinte endereço na Internet - <http://www.dfn.if.usp.br/~ribas/download.html>; Caps. 2 e 3.

Outros textos:

4. *Modern Physics for scientists and engineers* de Thornton & Rex; Copyright © 2000 by Saunders College Publishing; Cap. 3;
5. *Modern Physics* de Serway, Moses e Moyer; 2ª edição da Saunders College Publishing; Cap. 2.
6. *Introduction to Atomic Physics* de Enge, Wehr e Richards, Copyright © 1972 by Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Cap. 3;

Seguem questões **para serem trabalhadas**. Há muitas mais no final dos textos sugeridos. As mais de 40 questões, algumas qualitativas e outras quantitativas, precisam ser **efetivamente trabalhadas para se chegar ao aprendizado** dos muitos fenômenos e concepções novos, próprios do tema. Use as sessões de monitoria para tornar mais eficiente o seu aprendizado.

Não desanime. Trabalhar cansa só no começo. Depois dá enorme prazer!

QUESTÕES REFERENTES DO TÓPICO II

⇒ ***Radiação eletromagnética emitida por efeito da temperatura – radiação de corpo negro.***

1. Qual a relação entre os modelos de matéria e a o fato da matéria em qualquer estado emitir radiação eletromagnética de mesma forma para cada temperatura? Use argumento qualitativo.
2. O que você entende por corpo negro? O corpo negro tem necessariamente a cor preta? Justifique.
3. Por que há radiação eletromagnética na cavidade de um metal sólido em uma dada temperatura T ? O que quer dizer “equilíbrio térmico” de um sistema que tem um corpo que é matéria, com a sua cavidade que é vácuo? Justifique com argumentos qualitativos.
4. Considere que a superfície do Sol irradia aproximadamente como um corpo negro de 5700K. Uma esfera de cobre de 1m de raio, coeficiente de absorção igual de

corpo negro que está na superfície da Terra, portanto distante $1,5 \times 10^{11}$ m do Sol, é por ele irradiada. O raio do Sol é de $6,4 \times 10^8$ m.

- a) Determine a potência total irradiada pelo Sol.
- b) Determine o comprimento de onda mais provável do espectro de irradiação solar.
- c) O comprimento de onda mais provável do espectro determinado no item anterior corresponde à frequência mais provável? Justifique.
- d) Como mudariam suas respostas anteriores se o coeficiente de absorção da esfera de cobre não for um corpo negro? E se o Sol não for um corpo negro? Justifique.

5. A temperatura da superfície do corpo humano é de aproximadamente 36°C . Qual é o comprimento de onda no qual ocorre o pico da radiação emitida por ele? Qual é a potência total da emissão da superfície do corpo humano? Estes valores são diferentes para um líquido na mesma temperatura? Justifique.

6. Defina: radiança espectral na temperatura T ($R_T(\nu)$), radiança total na temperatura T (R_T) e densidade volumétrica espectral de energia na cavidade de um corpo na temperatura T ($\rho_T(\nu)$). Dê as unidades destas grandezas no sistema universal (MKS).

7. Pode ser dito que a radiança espectral é uma distribuição das intensidades de onda eletromagnética emitidas por um corpo na temperatura T ? Em caso de resposta positiva, esta distribuição é normalizada? Explique.

8. O que é a “catástrofe do ultravioleta”? Qual é a origem do “fenômeno”? E do nome? Explique.

9. Quais as ideias físicas comuns sobre a matéria e a radiação do corpo negro na determinação da expressão da radiança espectral de Rayleigh - Jeans e na expressão de Planck? Quais são as diferentes? Justifique com clareza e concisão.

10. Há grandezas físicas quantizadas na física clássica do **movimento** de partículas? E na física ondulatória clássica? Se sua resposta for positiva cite pelo menos um exemplo de grandeza quantizada no movimento de partículas materiais e em ondas.

11. Há partículas com energia quantizada na física clássica? Há ondas com energias quantizadas? Se houver cite um exemplo.

12. Há um tipo de radiação eletromagnética no Universo chamada de radiação cósmica de fundo, que se propaga em todas as direções do espaço. Essa radiação tem uma distribuição espectral idêntica a do corpo negro na temperatura de $2,7\text{K}$. (a) Qual é o comprimento de onda mais provável da radiação cósmica de fundo? (b) Determine a intensidade total da radiação cósmica de fundo. Justifique.

Obs. Trabalhos experimentais relativos à radiação cósmica de fundo resultaram duas vezes em prêmio Nobel de Física: em 1978 e em 2006.

13. A temperatura do filamento de uma lâmpada incandescente de 40W é de 3.300K . Supondo que o filamento se comporte como um corpo negro:

- (a) Determine o comprimento de onda no máximo da radiança espectral em função do comprimento de onda.

- (b) A frequência da radiação correspondente ao comprimento de onda no máximo da radiança também corresponde ao máximo na radiança espectral em função da frequência? Justifique.
- (c) Faça uma estimativa do número médio de fótons emitidos pela lâmpada. Justifique as hipóteses e aproximações adotadas na sua estimativa.
- (d) Se alguém está olhando para a lâmpada situada a uma distância de 5m, quantos fótons penetram por segundo nos olhos desse observador cuja pupila tem um diâmetro de aproximadamente 5,0mm? Justifique.
- (e) O que muda nas respostas dadas aos itens anteriores se o filamento não for um corpo negro? Justifique.

⇒ ***A onda eletromagnética tem seu lado partícula – o fóton.***

14. Há relação entre a quantização de Planck e a energia dos fótons proposta por Einstein? Explique com clareza.

15. O que você entende por feixe de onda eletromagnética?

16. Há incompatibilidade entre o fato da intensidade de uma onda eletromagnética plana e monocromática ser independente da frequência na teoria de Maxwell, e a energia do fóton depender da frequência? Justifique.

17. (a) Faça esboços esquemáticos da distribuição espacial da energia eletromagnética na frente de onda plana: segundo o eletromagnetismo clássico e segundo a descrição fotônica de Einstein. *Atenção – não está sendo pedido o gráfico da intensidade versus posição, que você deve saber fazer também!* (b) Explique, a partir destes esboços, a compatibilidade entre as descrições ondulatória e fotônica tendo em conta a observação experimental. (c) Elas poderiam ser incompatíveis? Justifique todas as respostas.

18. Uma rádio FM de frequência 107,7MHz emite um sinal de 50.000W. Determine o número médio de fótons emitidos por segundo pelo rádio.

19. Quantos fótons, em média, são emitidos por segundo pelas seguintes fontes de radiação eletromagnética que tem uma potência de 150W:

- a) Uma estação de rádio de 11.000Hz;
- b) Um feixe de raios-X de 8nm;
- c) Um feixe de raios gama de 4MeV.

Justifique.

20. O olho humano é sensível a um pulso de luz que contenha no mínimo da ordem de 100 fótons. Para a luz de comprimento de onda de 5.800angstroms (amarela) quanto de energia existe neste pulso? Para luz azul há maior ou menor quantidade de energia? Justifique.

21. O olho humano normal detecta luz, ou seja, radiação eletromagnética de comprimento de onda entre 4000 e 7000 angstroms. Quais são os intervalos de frequência que o olho humano normal detecta? E os intervalos de energia dos fótons? Justifique.

⇒ **Fenômenos que mostram o caráter corpuscular da radiação eletromagnética: efeito fotoelétrico, efeito Compton, produção de pares de partícula/anti-partícula e produção de raios-X por colisão de elétrons.**

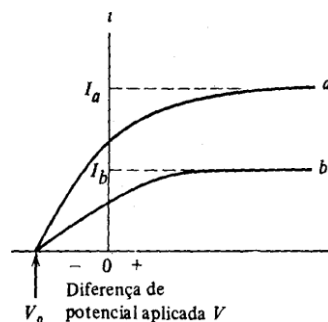
22. Qual é o fato experimental que permite saber se todos os fotoelétrons emitidos por incidência de radiação eletromagnética monocromática (efeito fotoelétrico) têm ou não tem a mesma velocidade na sua emissão? Justifique.

23. A existência de uma frequência limiar (mínima) para que ocorra o efeito fotoelétrico é freqüentemente citada como a mais forte indicação da teoria corpuscular da radiação. Justifique.

24. A corrente fotoelétrica i emitida por um dado material que recebe radiação monocromática tem aproximadamente a forma da figura abaixo.

a) **Dê as razões físicas** das duas curvas da figura apresentarem o mesmo potencial $-V_0$ que corta a corrente fotoelétrica, porém valores diferentes I_a e I_b de corrente de saturação.

b) **Dê razões físicas** que explicam a variação da corrente fotoelétrica com o potencial aplicado, na forma a figura abaixo, ou seja, corrente crescente a partir da diferença de potencial $-V_0$ até uma diferença de potencial positiva, atingindo uma corrente constante (corrente de saturação) para valores crescentes da diferença de potencial positiva.



25. Os filmes fotográficos preto-e-branco são expostos por fótons com energia suficiente para dissociar as moléculas de brometo de prata (AgBr) contidas na emulsão fotossensível. A energia mínima necessária para a dissociação desta molécula é de $0,68\text{eV}$. Qual é o comprimento de onda limite capaz de impressionar este tipo de filme? Este limite é superior ou inferior? Justifique. Em que região do espectro está este comprimento de onda limite?

26. Numa experiência fotoelétrica na qual se usa luz monocromática e um fotocátodo de sódio encontra-se um potencial de corte de $1,85\text{V}$ para $\lambda=3000\text{\AA}$, e de $0,82\text{V}$ para $\lambda=4000\text{\AA}$. A partir destas informações determine:

- O valor da constante de Planck.
- A função trabalho do sódio em elétron-volt.
- O comprimento de onda limite para o efeito fotoelétrico no sódio.
- Diga o significado físico da função trabalho e do comprimento de onda limite, explicitando se este é um limite superior ou inferior.

27. Uma fonte pequena, esférica e monocromática de 5000\AA emite isotropicamente $125\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$. A fonte é colocada a 1m de uma placa quadrada de potássio de 5 cm de lado, de forma que a radiação incide normalmente à superfície da placa. A função trabalho do potássio é de $2,0\text{eV}$.

a) Quais os valores de energia cinética dos elétrons emitidos pelo potássio? Justifique.

b) Determine o “potencial de freamento” ou “potencial de corte” do potássio e diga o que ele significa.

c) Determine a energia média que a placa de potássio recebe da fonte por unidade de tempo.

d) Determine o número médio de fótons que a placa recebe por segundo.

28. O potencial de corte para elétrons emitidos por uma superfície atingida por luz de comprimento de onda $\lambda=4910\text{\AA}$ é $0,71\text{V}$. Quando se muda o comprimento de onda da radiação incidente, encontra-se para este potencial um valor de $1,43\text{V}$. Qual é o novo comprimento de onda? Justifique.

29. Quando está em órbita, o ônibus espacial gira em torno da Terra muito acima da altitude de 99 por cento da atmosfera, mas mesmo assim acumula uma carga elétrica no casco devido, em parte, à perda de elétrons causada pelo efeito fotoelétrico da luz solar. Suponha que o casco da nave seja revestido com Níquel, que possui uma função trabalho relativamente elevada ($\phi=4,87\text{eV}$) nas temperaturas encontradas no espaço. (a) Determine o maior comprimento de onda do espectro solar capaz de fazer com que o casco do ônibus espacial emita fotoelétrons; (b) Qual a fração da potência total da radiação solar incidente no ônibus espacial pode provocar a emissão de fotoelétrons?

30. O que você entende por efeito Compton? É possível observar o efeito Compton com a luz visível? Por quê? Justifique.

31. Por que no efeito fotoelétrico se leva em conta o fato do elétron do metal ter uma energia de ligação, enquanto no efeito Compton o elétron é considerada “livre”, ou seja, com energia de ligação nula? Justifique com clareza e concisão.

32. (a) Mostre que um elétron livre não pode absorver um fóton e durante esse processo conservar simultaneamente a energia e a quantidade de movimento (momento linear). (b) No cálculo do efeito Compton que descreve o resultado experimental, por outro lado, considera-se que os raios-X arrancaram os elétrons livres do material, sendo totalmente desprezada a energia de ligação destes elétrons. Não há alguma inconsistência nestes dois resultados/cálculos?

33. No espalhamento de um feixe de raios-X por um material (efeito Compton) o espectro (intensidade de radiação versus frequência) observado num dado ângulo mostra dois picos. Um dos picos tem a mesma frequência que o feixe incidente, o outro tem frequência diferente do feixe incidente.

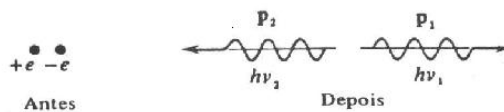
a) Cada um dos dois picos pode ser descrito pela idéia fotônica? Em caso positivo descreva com clareza e concisão.

b) Cada um dos dois picos pode ser descrito pela física clássica? Em caso positivo descreva com clareza e concisão.

34. Um fóton produz um par elétron-pósitron. Mostre que sem a presença de um terceiro corpo a energia e o momento não podem se conservar simultaneamente na interação.

35. Descreva o que ocorre com o fóton nas interações com a matéria que causaram os seguintes fenômenos: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares. Faça esta descrição comentando as semelhanças e diferenças entre as interações que ocorreram nestes fenômenos.

36. Considere a figura abaixo que representa a aniquilação de par de partículas

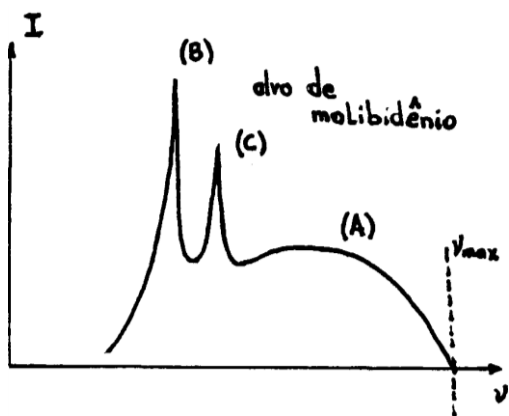


Aniquilação de pares produzindo dois fótons.

produzindo dois fótons. Suponha que a figura represente o processo de aniquilação em um sistema de referência no qual o par elétron-pósitron esteja em repouso, e os dois fótons resultantes da aniquilação movam-se ao longo do eixo x. Ache o comprimento de onda desses fótons em função da massa de repouso do elétron e do pósitron (m_0).

37. A figura abaixo representa a variação da intensidade de raios X emitidos em função da frequência, com tensão V de aceleração em um tubo de produção de raios X.

a) Descreva os processos que deram origem no gráfico ao espectro contínuo (A) e aos dois picos (B) e (C)?



b) O que acontece com (B) e (C) quando a tensão de aceleração V é dobrada para $2V$, mantendo-se o mesmo alvo?

c) O que acontece com o espectro contínuo (A) quando a tensão de aceleração V é dobrada para $2V$, mantendo-se o mesmo alvo? Justifique.

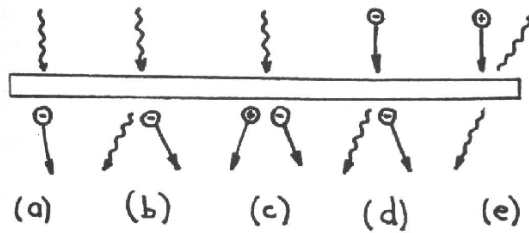
d) O que acontece com as regiões (A), (B) e (C) quando a tensão de aceleração é V , porém o material do alvo é modificado?

e) Determine ν_{\max} nas situações descritas nos itens (a) e (b) e (d).

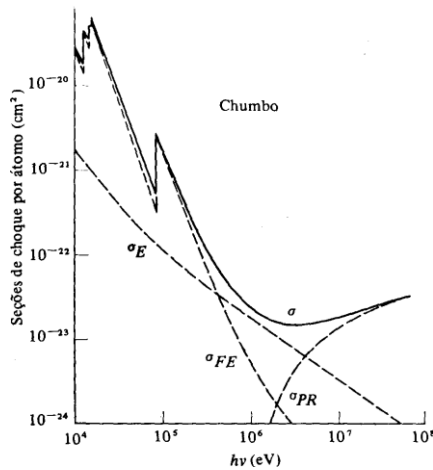
38. Uma televisão (antiga) de tubo opera a $20.000V$. Qual é o comprimento de onda mínimo do espectro contínuo de raios-X produzido quando os elétrons batem na tela?

39. A figura abaixo é um esquema de processos de interação com a matéria que envolvem elétrons, pósitrons e fótons. Em cada um dos cinco processos um fóton e/ou um elétron e/ou um pósitron se aproxima do material do alvo, colide e uma ou mais partículas

emergem. Identifique e descreva, de forma sucinta, cada um desses cinco processos. Explícite também as leis de conservação de energia e de momento linear em cada um dos processos. Quando houver algum termo desprezado nessas equações diga as razões físicas.



40. Em uma explosão termonuclear a temperatura do centro da explosão é momentaneamente de 10^7 K (esta é a temperatura no interior do Sol!). Ache o comprimento de onda para o qual a radiação emitida é máxima.



41. Na figura ao lado (extraída do livro do Eisberg e Resnick) o σ_{EF} é a seção de choque para o efeito fotoelétrico, σ_E a para o espalhamento Compton, σ_{PR} para a produção de pares elétron-pósitron e σ é a seção de choque total.

- (a) Use os dados da figura para calcular a espessura de uma lâmina de chumbo que atenua um feixe de raios-X de 10keV por um fator 1000.
- (b) Como se explica o efeito fotoelétrico com fótons nesses valores de energia?
- (c) Por que o σ_{PR} é nulo até mais de 10^6 eV?

42. Um feixe monocromático de fótons incide em um bloco metálico. Um detector registra os fótons espalhados pelo alvo metálico num ângulo de 90° com relação ao feixe incidente. O espectro de energias dos fótons emergentes está representado na figura abaixo. Nele são observados três picos: em 0,36, 0,51 e 1,24 MeV.

- a) Qual a energia dos fótons do feixe incidente? Justifique.
- b) Descreva o processo que gerou cada um dos três picos observados. Justifique.

