



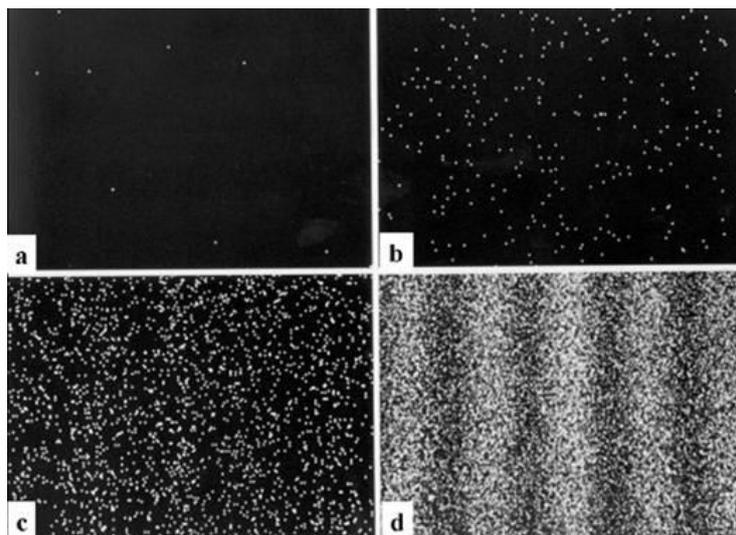
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA



Física V - 4300311
Período: noturno

2º Semestre de 2012

GUIA DE TRABALHO



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

Maria José (Mazé) Bechara



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA



Física 5 – 4300311 - período noturno
2º semestre de 2012
Profa. Maria José (Mazé) Bechara

Guia de trabalho

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

Tempo previsto: ~10 aulas

Obs. importante: este tópico tem como pré-requisitos: 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, em qualquer temperatura, como previsto no eletromagnetismo clássico. Esta emissão é conhecida como **radiação do corpo negro**.

Os resultados experimentais são obtidos a partir de medidas da intensidade da radiação emitida por sólidos de diferentes materiais, em equilíbrio térmico com cavidades no seu interior, e levaram a diversas leis empíricas. As medidas são da intensidade total (com qualquer comprimento de onda) da onda eletromagnética e sua relação com a temperatura, mas também da intensidade espectral, ou seja, da intensidade por intervalo (infinitesimal) de comprimento de onda (ou frequência). A máxima intensidade ocorre em comprimento de onda que depende exclusivamente da temperatura.

O fenômeno parecia poder ser bem descrito no contexto da Física clássica, mais especificamente com a teoria mecânica estatística clássica aplicada ao sólido, e a teoria eletromagnética de Maxwell das ondas na cavidade do sólido.

Surpreendentemente, a intensidade da radiação prevista por estas teorias não só não descreviam os resultados experimentais, como previam a emissão de intensidade (portanto, energia) infinita nas altas frequências, em qualquer temperatura T . Este resultado é um “sacrilégio” na Física, e foi chamado de “catástrofe do ultravioleta”. Esta intensidade espectral é conhecida como resultado de Rayleigh e Jeans, que foram os pioneiros nesta determinação.

Como explicar a previsão incorreta da radiação por efeito da temperatura usando “teorias corretas”? Ou a mecânica estatística de Boltzmann está errada? Ou é a eletrodinâmica de Maxwell que têm incorreções?

É nesse contexto que **Planck, em um trabalho (teórico) de 1900, introduz uma hipótese nova**, nunca observada antes em sistemas macroscópicos: **a quantização da energia dos osciladores da matéria**. Com essa hipótese, e usando a mecânica estatística de Boltzmann e os resultados da eletrodinâmica, **consegue reproduzir os resultados experimentais da radiação do corpo negro**, com precisão espantosa, ajustando uma única constante, que leva o seu nome.

Como sua hipótese era totalmente “non sense” no universo físico macroscópico conhecido, o próprio criador não ficou muito satisfeito com a sua criação. Achou que sua hipótese não tendo sido observada no universo físico conhecido levou a um bom resultado por mera coincidência. Mas o tempo mostrou que Planck atirou onde viu, mas acertou também onde não viu!

Em 1905, portanto 05 anos depois de Planck, **Einstein propõe que a luz**, apesar de ser onda eletromagnética, como descrita por Maxwell, **tem energias em pacotes discretos proporcionais à frequência da onda eletromagnética: $\epsilon=h\nu$** , e não distribuída de forma contínua no espaço, como na descrição ondulatória. E estes “pacotes de energia” seguem a dinâmica de partículas relativísticas com massa de repouso zero, que seriam “guiadas” pela onda eletromagnética, e, portanto, tem velocidade c no vácuo. Posteriormente tais “quanta de energia” receberam o nome de fótons.

Essa nova concepção admite, portanto, um caráter dual: onda e partículas (os fótons) para a energia eletromagnética de ondas, o que sugere que é mais correto nomear esse ente físico de outro nome que contenha estas duas naturezas: **radiação eletromagnética**.

A proposta de Einstein foi feita visando descrever um fenômeno, chamado de efeito fotoelétrico, que não podia ser completamente entendido no contexto das teorias clássicas. A partir desta proposta foram buscados e observados muitos outros fenômenos de interação da onda eletromagnética com a matéria, que não podiam ser descritos pelo eletromagnetismo de Maxwell.

O entendimento do **efeito fotoelétrico**, e de outros fenômenos que exigem o caráter dual para serem entendidos, **é o objeto central do tópico II**. Estes outros fenômenos são: o **espalhamento ou efeito Compton**, o espalhamento Thomson ou Rayleigh, **a produção e aniquilação de pares: partícula e anti-partícula, e a criação de raios-X no freamento de elétrons energéticos (keV de energia cinética) na matéria**.

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 lentamente absorvida pela comunidade científica diante das evidências experimentais. Em 1924, com argumento de simetria na natureza dos entes constituintes do universo físico: partículas materiais e radiação eletromagnética, Louis de Broglie propôs o caráter dual também das partículas da matéria.

Mas essa é outra história que fica para outro tópico...

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 do corpo negro. A catástrofe do ultravioleta no contexto de 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 - os fótons.

(1) Comparação da quantização de Planck com a de Einstein.

(2) O número de fótons por área e tempo que garante a compatibilidade entre as descrições ondulatória e corpuscular da radiação eletromagnética na intensidade da radiação eletromagnética monocromática e harmônica.

II.3 Fenômenos que evidenciam o caráter corpuscular da radiação:

(1) o **efeito fotoelétrico** com luz e ultravioleta;

(2) o espalhamento de raios-X e γ com mudança de comprimento de onda - **efeito Compton**;

(3) A **produção e a aniquilação de** pares de partícula-antipartícula;

(4) **O espectro de raios-X** produzidos na desaceleração de feixe de elétrons na matéria pesada.

II.4 A absorção e espalhamento da radiação-X e gama pela matéria – compatibilidade das descrições ondulatória e corpuscular e o conceito de seção de choque. **A competição entre os fenômenos de absorção:** efeito fotoelétrico e produção de pares, e **de espalhamento:** sem (Thomson) e com mudança no comprimento de onda (Compton). 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. *Notas de aulas* do Prof. Roberto Ribas (IFUSP), no seguinte endereço na Internet - <http://www.dfn.if.usp.br/~ribas/arquivos.html>; Caps. 2 e 3.

3. *Modern Physics for scientists and engineers* de Thornton & Rex; Copyright © 2000 by Saunders College Publishing; Cap. 3;

Outros textos:

4. *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);

5. *Modern Physics for scientists and engineers* de Thornton & Rex; Copyright © 2000 by Saunders College Publishing; Cap. 3;

6. *Modern Physics* de Serway, Moses e Moyer; 2ª edição da Saunders College Publishing; Cap. 2.

7. *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 os horários de atendimento 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 mecânicos de matéria e a emissão de radiação eletromagnética por efeito de temperatura? Justifique
2. O que você entende por corpo negro? O corpo negro tem necessariamente a cor preta?
3. Por que há radiação eletromagnética na cavidade de um metal numa dada temperatura T ? O que quer dizer equilíbrio térmico entre um corpo e uma cavidade (vácuo) em seu interior? Justifique com argumentos qualitativos.
4. A superfície do Sol irradia aproximadamente como um corpo negro à temperatura de 5700K. Uma esfera de cobre de 1m de raio, coeficiente de absorção igual a 1 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 b), corresponde à frequência mais provável? Justifique.
 - d) No equilíbrio térmico qual é a potência irradiada pela esfera de cobre? E qual é a sua temperatura? Justifique.
 - e) Como mudariam suas respostas anteriores se o coeficiente de absorção da esfera de cobre não for 1?
5. Um pedaço de metal brilha com uma cor vermelha brilhante a 1100 K. Nesta mesma temperatura, no entanto, um pedaço de quartzo, absolutamente não brilha. Explique. (Dica: o quartzo é transparente à luz visível.)
6. 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 do corpo humano nessa temperatura?
7. Defina: radiança espectral ($R_T(\nu)$) na temperatura T , radiança total (R_T) na temperatura T e densidade de energia na cavidade de um corpo na temperatura T ($\rho_T(\nu)$). Idem em termos do comprimento de onda. Dê as unidades destas grandezas no sistema universal (MKS).

8. Pode-se dizer que a radiança espectral (em termos de comprimento de onda ou de frequência) é uma distribuição das intensidades? Se sua resposta for positiva, é uma distribuição normalizada? Justifique.

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

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

11. Há grandezas físicas quantizadas na física clássica no movimento de partículas? E na física ondulatória? Se sua resposta for positiva cite pelo menos um exemplo de grandeza quantizada no movimento de partículas materiais e em ondas clássicas, mecânicas ou eletromagnéticas.

12. Há partículas com energia quantizada no contexto da física clássica? E em sistemas ondulatórios? Justifique. Se houver cite um exemplo.

13. 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 à do corpo negro na temperatura de 2,7K. (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. As medidas da radiação cósmica de fundo resultaram duas vezes em prêmio Nobel de Física aos pesquisadores.

14. Um material sólido está em equilíbrio termodinâmico com uma cavidade cúbica no seu interior, de 2cm de lado. A temperatura do material é de 3500K.

a) Como são descritos os constituintes do material e seus movimentos no modelo mecânico mais simples para os sólidos? Este modelo justifica a emissão de radiação eletromagnética pelo material?

b) Que tipo de onda eletromagnética existe dentro do material? E dentro da cavidade? Justifique.

c) Usando o resultado do eletromagnetismo de Maxwell (você precisa saber chegar nele!) determine o número de ondas eletromagnéticas por unidade de volume na cavidade em questão para os comprimentos de onda entre 4995 e 5005 angstroms, ou seja, em um intervalo (infinitesimal) de 3 angstroms. Justifique

d) Usando o resultado do item anterior determine a energia emitida pela cavidade por unidade de área e de tempo, no mesmo intervalo de comprimento de onda do item anterior, supondo que a energia das ondas:

d1. seja igual a energia média de uma oscilação harmônica unidimensional segundo a teoria clássica de Boltzmann, como no resultado de Rayleigh e Jeans;

d2. seja igual a energia média de um oscilador quantizado, como proposto por Planck.

Justifique as determinações, compare os resultados obtidos, comentando se são iguais ou diferentes e por que.

15. 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.

16. Há relação entre a quantização de Planck para a radiação do corpo negro e a energia dos fótons proposta por Einstein? Explique.

17. Identifique no mundo em que você vive fontes de ondas eletromagnéticas planas, cilíndricas e esféricas. Defina o seu entendimento de frentes de onda de cada um destes tipos de ondas. A intensidade de cada uma destas fontes depende da frequência? Como a intensidade varia com a distância à fonte? Justifique qualitativamente suas afirmações.

18. 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.

19. (a) Faça esboços esquemáticos da distribuição da energia eletromagnética no espaço 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 ou a incompatibilidade entre as descrições ondulatória e fotônica tendo em conta a observação experimental.

20. Uma rádio FM de frequência 107,7MHz emite um sinal de 50.000W. Quantos fótons por segundo são emitidos por esta rádio?

21. Quantos fótons por segundo são emitidos 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.

22. 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? Justifique.

23. O olho humano detecta luz, ou seja, ondas eletromagnéticas de comprimentos de onda entre 4000 e 7000 angstroms. Quais são os intervalos de frequência e os intervalos de energia dos fótons que o olho humano detecta? Justifique.

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

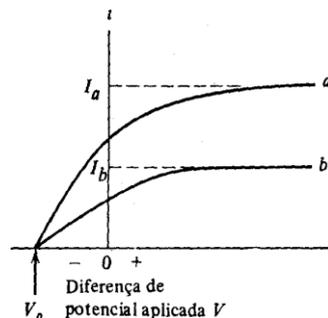
24. Qual é o fato experimental que permite saber se todos os fotoelétrons emitidos por incidência de radiação eletromagnética monocromática têm a mesma velocidade na emissão ou velocidades diferentes? Justifique.

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

26. 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.



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

28. 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 comprimento de onda $\lambda=3000\text{Å}$, e de $0,82\text{V}$ para comprimento de onda incidente de $\lambda=4000\text{Å}$. 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.

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

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

30. 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.

31. Uma superfície metálica recebe um feixe de radiação eletromagnética monocromática de diferentes comprimentos de onda. São observados experimentalmente os seguintes potenciais de corte na emissão de elétrons por este metal:

λ (angstroms)	3.600	4.050	4360	4.920	5.460	5.790
V_0 (Volts)	1,48	1,15	0,93	0,62	0,36	0,24

- (a) Diga em palavras o que você entende por potencial de corte. Faça um gráfico (em papel e escala que permitam resultados numéricos confiáveis) do potencial de corte versus a frequência (em hertz);
- (b) Determine diretamente do gráfico a frequência limite para ocorrer a emissão fotoelétrica. Explique as razões físicas para a existência deste limite;
- (c) Determine a energia de ligação mínima e a energia de ligação máxima dos elétrons que foram arrancados da superfície em questão, para cada um dos feixes incidentes. Justifique;
- (d) Determine, diretamente do gráfico, o valor da constante de Planck (h) em $\text{eV}\times\text{s}$;
- (e) Esboce em um mesmo gráfico a corrente fotoelétrica versus o potencial aplicado entre o coletor e o emissor do equipamento para o menor e o maior comprimento de onda da tabela, sabendo que a intensidade dos dois feixes é a mesma. Justifique.
- (f) Faça um esboço da placa emissora com a distribuição da energia eletromagnética sobre ela, quando o feixe atinge a atinge, em dois casos: quando o feixe tem o menor e quando tem o maior comprimento de onda da tabela. Justifique.

32. 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?

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

34. 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.

35. No efeito Compton, para que ângulo de espalhamento a variação do comprimento de onda é máxima? Nestas condições de espalhamento, de máxima variação do comprimento de onda, mostre que a energia cinética com que o elétron recua é dada por:

$$K_{\max} = \frac{(h\nu)^2}{h\nu + \frac{m_0c^2}{2}}$$

36. (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?

37. No espalhamento de um feixe de raios X por um material 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.

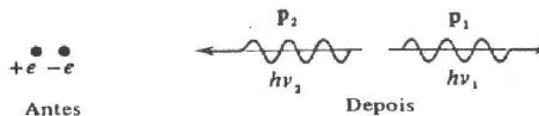
b) Cada um dos dois picos pode ser descrito pela física clássica? Em caso positivo descreva com clareza e concisão.

38. Um fóton de raio X ou γ pode produzir um par elétron-pósitron. Mostre que sem a presença de um terceiro corpo para absorver uma parte do momento, a energia e o momento não podem se conservar simultaneamente.

39. Descreva o que ocorre com o fóton nas seguintes interações com a matéria: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton, espalhamento Thomson e produção de pares. Faça esta descrição comentando as semelhanças e diferenças entre esses casos.

40. (a) Relate dois resultados experimentais que são conflitantes com a descrição das ondas eletromagnéticas (concepção de Maxwell). Deixe claro o resultado experimental em si e porque o resultado conflita com o previsto pela teoria eletromagnética clássica. (b) Em cada um destes experimentos, explique como a proposta da existência de fótons, feita por Einstein, explica o resultado experimental sem negar o eletromagnetismo clássico.

(a) Considere a figura abaixo, que representa a aniquilação de pares produzindo dois fótons.

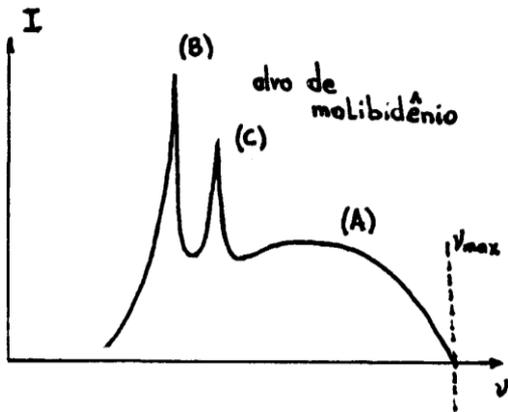


Aniquilação de pares produzindo dois fótons.

Suponha que a figura represente o processo de aniquilação em um sistema de referência S 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 ou do pósitron (m_0). Justifique.

41. 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)?

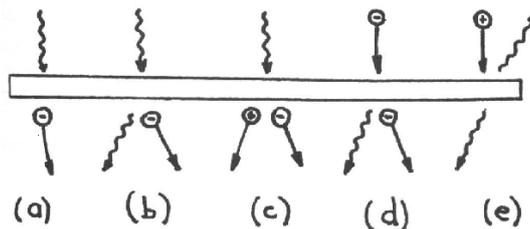


b) O que acontece com (B) e (C) quando a tensão de aceleração V é dobrada para $2V$, mantendo-se o mesmo alvo?

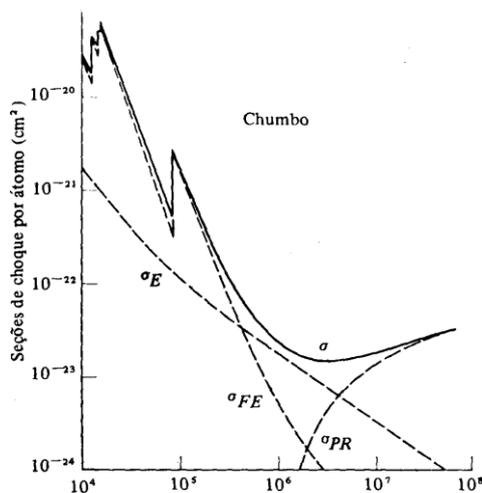
- c) O que acontece com o espectro contínuo (A) quando a tensão de aceleração V é dobrada para $2V$, mantendo-se o mesmo alvo? Justifique.
- d) O que acontece com as regiões (A), (B) e (C) quando a tensão de aceleração é V , porém o material do alvo é modificado?
- e) Determine ν_{max} nos casos das situações descritas nos itens (a), (b) e (d).

42. Um tubo antigo de televisão opera a 20.000V. Determine o comprimento de onda mínimo do espectro contínuo de raios-X produzido quando os elétrons batem na tela. Justifique.

43. 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. Explícite se houver algum termo desprezado nessas equações, dando as razões físicas que validam tal aproximação.



44. Em uma explosão termonuclear a temperatura do centro da explosão é momentaneamente 10^7 K. Ache o comprimento de onda para o qual a radiação emitida é máxima.



45. 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 atenuie 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?

46. Um feixe monocromático de fótons incide em um bloco metálico. Um detetor 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, onde são observados três picos: 0,36, 0,51 e 1,24 MeV.

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

