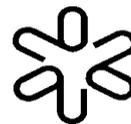




**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**INSTITUTO DE FÍSICA**



## **Física V - 4300311**

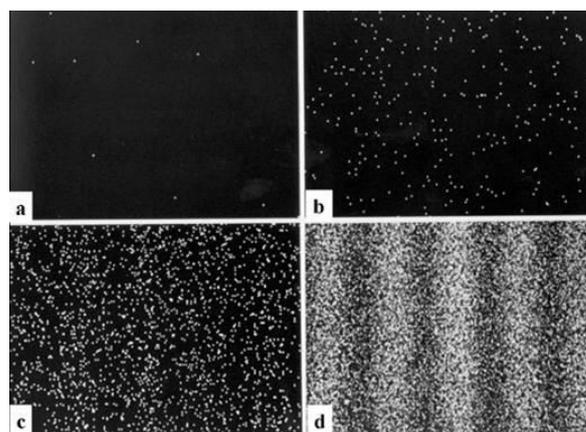
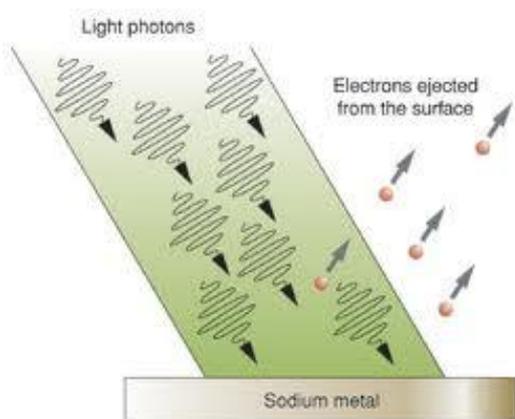
**2º Semestre de 2013 - Período: noturno**

---

### **GUIA DE TRABALHO ao 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 V – 4300311 - período noturno  
2º semestre de 2013  
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. Se não se sente bem preparado nestes tópicos, reveja-os.*

#### ***Apresentação do Tópico:***

O tópico se iniciará com a discussão sobre a principal consequência da existência de cargas com acelerações nos constituintes da matéria: **a emissão de ondas eletromagnéticas, por efeito de temperatura, como prevê o eletromagnetismo clássico. Esta emissão é conhecida como radiação do corpo negro.**

. As medidas experimentais de irradiação por efeito de temperatura eram obtidas, no final do século XIX, em medidas da intensidade da radiação emitida por diversos sólidos em equilíbrio térmico, com cavidades no seu interior. Estas medidas levaram não só a uma forma comum da intensidade espectral para todos os sólidos na mesma temperatura, como também estabeleceram duas leis empíricas: a da intensidade total da onda eletromagnética proporcional à quarta potência da temperatura (Lei de Stefan-Boltzmann), e a da constância do produto da temperatura com o comprimento de onda de máxima intensidade da radiação emitida (Lei do deslocamento de Wien).

À época, o fenômeno parecia poder ser bem descrito teoricamente no contexto da Física, mais especificamente, com o uso da mecânica estatística clássica aplicada aos sólidos, e a teoria eletromagnética de Maxwell das ondas na cavidade dos sólidos. Surpreendentemente, entretanto, a intensidade espectral da radiação calculada nestas teorias não só não descrevia os resultados experimentais, como previa a emissão de intensidade (portanto, energia) infinita nas frequências mais altas, em qualquer temperatura  $T$ .

Emissão de energia infinita é um “sacrilégio” na Física, e tal resultado foi chamado de “catástrofe do ultravioleta”. A intensidade espectral calculada neste contexto é conhecida como resultado de Rayleigh e Jeans, que foram autores que fizeram esta determinação.

Como explicar a previsão incorreta da radiação por efeito da temperatura usando “teorias corretas”? Estaria errada a mecânica estatística de Boltzmann? Ou a eletrodinâmica de Maxwell? Ou ambas as teorias?

**Planck, em um trabalho de 1900, introduziu uma hipótese nova, que equivale à quantização da energia dos osciladores da matéria:  $E=nh\nu$  (naquela época não estava muito bem definido o que seriam tais osciladores). E estava proposta a quantização na energia, nunca antes observada na história da energia de partículas.**

Usando os resultados da eletrodinâmica sobre ondas na cavidade da matéria, e a mecânica estatística de Boltzmann na matéria, mas com **a quantização de Planck, é possível reproduzir os resultados experimentais da radiancia espectral (contínua) do corpo negro** com precisão espantosa, ajustando uma única constante, que até hoje leva o nome de **constante de Planck  $h$** . **Esta constante é a mesma para todas as quantizações posteriores à de Planck.**

Como sua hipótese não se enquadrava no universo físico (macroscópico) conhecido até então, Planck não ficou muito satisfeito com a sua criação. Achou que sua hipótese levou a um bom resultado por mera coincidência. Mas o tempo mostrou que ele atirou onde viu, e acertou também onde não viu! Este acerto ficará claro neste e nos tópicos que seguem.

Em 1905, portanto 05 anos depois da quantização de Planck, **Einstein propõe que a luz ou onda eletromagnética de qualquer frequência**, em qualquer circunstância, além de ter a natureza ondulatória nos termos da teoria de Maxwell, **tem uma natureza não revelada nos fenômenos de propagação da luz: a energia eletromagnética está em pacotes discretos e proporcionais à frequência da onda eletromagnética -  $\epsilon=h\nu$** . E não está distribuída de forma contínua no espaço, como previsto na descrição ondulatória. Estes “pacotes de energia” seguem a dinâmica de partículas relativísticas com massa de repouso zero, e sendo “guiados” pela onda eletromagnética, tem velocidade da onda:  $c=3\times 10^8\text{m/s}=1,08\times 10^9\text{km/h}$  no vácuo. A quantização da energia eletromagnética se revela na interação da onda eletromagnética com a matéria, ou nas transições de estruturas atômico-moleculares ou “coisas” ainda menores. Tais **“quanta de energia” eletromagnética, as “partículas” de massa de repouso zero da relatividade, receberam o nome de fótons.**

**Essa nova concepção admite, portanto, um caráter dual para a luz de qualquer frequência: onda e partículas (os fótons).** O que sugere que é mais correto chamar tal ente físico de **radiação eletromagnética.**

A proposta de Einstein foi feita visando descrever um **fenômeno chamado de efeito fotoelétrico**, curiosamente observado primeiramente por Hertz quando provava experimentalmente a natureza ondulatória da luz. **Alguns aspectos** deste fenômeno não podiam ser entendidos no contexto da teoria eletromagnética de Maxwell.

O entendimento do **efeito fotoelétrico** e de outros fenômenos que **exigem o caráter corpuscular** da radiação eletromagnética para serem descritos, é o objeto central do Tópico II. Os outros fenômenos importantes que serão abordados na disciplina são: o **efeito Compton, que consagrou a idéia fotônica, a produção e aniquilação de pares de partícula e anti-partícula, em particular do par elétron-póstron, e a criação de raios-X no freamento de elétrons energéticos (keV de energia cinética) na matéria.**

A introdução do conceito da dualidade na radiação eletromagnética, inconcebível na física clássica na qual “onda é onda e partícula é partícula”, foi sendo lentamente absorvida e melhor compreendida pela comunidade científica, experimental e teoricamente, no decorrer do século XX.

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 materiais. *Mas essa é outra história que fica para o próximo 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 das teorias clássicas, eletromagnetismo e mecânica estatística clássica dos sólidos para descrever a emissão do corpo negro. **A catástrofe do ultravioleta** no tratamento teórico 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) Diferenças da quantização de Planck e 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) **Efeito Compton:** o espalhamento de raios-X e  $\gamma$  por matéria;
- (3) A **produção e a aniquilação de pares de partícula e sua antipartícula;**
- (4) **O espectro de raios-X** produzido na desaceleração de feixe de elétrons na matéria pesada.

II.4 **A absorção e espalhamento dos raios-X e gama pela matéria** – compatibilidade das descrições ondulatória e fotônica 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 (Compton) mudança no comprimento de onda.** 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* de Serway, Moses e Moyer; 2º 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 deste guia, algumas qualitativas e outras quantitativas, precisam ser **efetivamente trabalhadas para se chegar à compreensão** dos muitos fenômenos e concepções novos do tema. **Use as sessões de monitoria e os horários de atendimento do professor para tornar mais eficiente o seu aprendizado.**

***Não desanime. Trabalhar cansa só aos iniciantes. Depois dá enorme prazer!***

---

## QUESTÕES REFERENTES DO TÓPICO II

---

***Observação importante: ao falar sobre concepções em Física é preciso usar os termos com o significado que eles têm no contexto científico. Não se pode ser dúbio ou impreciso com as palavras e/ou termos. Não se trata de repetir o que se ouviu ou leu. Use sua forma própria de expressão para comunicar a sua compreensão, sendo o mais preciso e claro que conseguir. Isto faz parte do aprendizado da linguagem científica tanto quanto o tratamento formal matemático.***

***⇒ 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 de um corpo (matéria) com cavidade (vácuo) em seu interior? Justifique com argumentos qualitativos. Qual a consequência deste fato para o tipo de onda eletromagnética no interior da cavidade? E no interior da matéria?
4. A superfície do Sol irradia aproximadamente como um corpo negro à temperatura de 5700K. Uma esfera de cobre de 1m de raio está na superfície da Terra, portanto distante  $1,5 \times 10^{11}$  m do Sol, e é por ele irradiada. O raio do Sol é de  $7,0 \times 10^8$  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) Se o coeficiente de absorção da esfera de cobre for 1,0 qual é a potência recebida pela esfera de cobre? Justifique. E se o coeficiente de absorção for 0,5?

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) Supondo a temperatura da superfície do corpo humano como sendo 36°C, determine o comprimento de onda no qual ocorre a maior intensidade da radiação por ele emitida. (b) Qual é a radiação total da emissão do corpo humano nessa temperatura? Este resultado depende da forma do corpo? (c) Faça uma hipótese razoavelmente realista e estime o valor da potência emitida pelo corpo de um cidadão brasileiro de estatura mediana (1,65m de altura).

7. Defina: radiancia espectral na temperatura T, radiancia total na temperatura T e densidade de energia na cavidade de um corpo na temperatura T. Idem em termos do comprimento de onda. Dê as unidades destas grandezas no sistema universal (MKS).

8. Pode-se dizer que a radiação 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 são as propostas/ideias físicas iguais sobre a onda eletromagnética na cavidade e sobre a matéria onde está a cavidade para se chegar à expressão da radiação espectral de Rayleigh - Jeans e na expressão de Planck? Quais são as propostas/ideias diferentes? Justifique com clareza e concisão.

11. Há grandezas físicas quantizadas no movimento de partículas na validade da mecânica clássica? 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 no contexto da física clássica.

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 à do corpo negro na temperatura de 2,7K. (a) Qual é o comprimento de onda mais provável da radiação cósmica de fundo? Onda eletromagnética com este comprimento de onda tem que nome? (b) Determine a intensidade total da radiação cósmica de fundo. Justifique.

**Obs. As medidas da radiação cósmica de fundo resultaram em dois prêmios Nobel de Física (1978 e 2006).**

13. Um sólido cristalino está em equilíbrio termodinâmico com uma cavidade cúbica no seu interior de 2 cm de lado. A temperatura do material é 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 onda eletromagnética pelo material pela teoria de Maxwell? Explique.

b) Que tipo da 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 numericamente 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 10 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, com duas diferentes hipóteses sobre a energia das ondas:

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

d2. Que é igual à energia média de um oscilador quantizado, como proposto por Planck. Justifique as determinações, compare os resultados obtidos e comente.

**14.** A temperatura do filamento de uma lâmpada incandescente de 40W é de aproximadamente 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. Esta lâmpada é eficiente para sua função: iluminar (com luz visível)?

(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) Qual o valor da radiança no comprimento de onda máximo? E da radiança total? Comente os valores numéricos obtidos.

(d) O que muda nas respostas dadas aos itens anteriores se o filamento não for um corpo negro? Justifique.

**15.** Em uma explosão termonuclear a temperatura do centro da explosão é momentaneamente de  $10^7$ K (temperatura no interior do Sol onde ocorrem tais explosões). Ache o comprimento de onda para o qual a radiação emitida é máxima.

### ⇒ **A onda eletromagnética e “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.** (a) Identifique ao seu redor fontes de luz planas, cilíndricas e esféricas. (b) Defina o seu entendimento de frentes de onda planas, cilíndricas e esféricas. (c) A intensidade de cada uma destas fontes de onda eletromagnética depende da frequência? Depende do que? (d) A intensidade dos diferentes tipos de fonte, no eletromagnetismo de Maxwell, varia com a distância à fonte? Como? Por que? Justifique todas as 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 vista 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 a mesma potência de 150W:

- Uma estação de rádio de 11.000Hz;
- Um feixe de raios X de 8nm de comprimento de onda;
- Um feixe de raios gama com fótons de 4MeV.

Justifique.

22. Se lhe informam que o olho humano é sensível a um pulso de luz que contenha no mínimo da ordem de 100 fótons, determine a energia eletromagnética mínima de um pulso de luz amarela (comprimento de onda de  $5.800\text{Å}$ ) para sensibilizar o olho humano. 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 evidenciam o caráter corpuscular da radiação eletromagnética: efeito fotoelétrico, efeito Compton, produção de pares partícula-anti-partícula e produção de raios-X por interação de elétrons com a matéria sólida.**

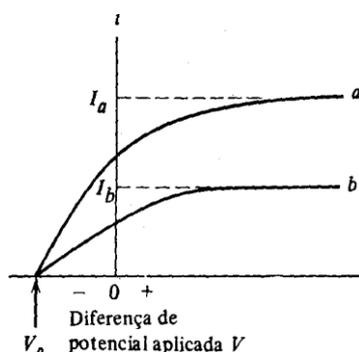
24. Qual é o fato experimental que permite saber se todos os elétrons emitidos por incidência de radiação eletromagnética monocromática na matéria condutora têm a mesma velocidade ou velocidades diferentes? Justifique.

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. Explique.

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 apresentar 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 expliquem 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

fotosensível. A energia mínima para haver a dissociação das referidas moléculas é 0,68eV. 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 do efeito fotoelétrico, na qual se usa luz monocromática e um fotocátodo de sódio, encontra-se um potencial de corte de 1,85V para o comprimento de onda incidente de  $\lambda=3000\text{Å}$ , e de 0,82V 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  $5000\text{Å}$  emite isotropicamente  $125\text{Js}^{-1}$ . 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 2,0eV.

- 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.
- Determine a energia média que a placa de potássio recebe da fonte por unidade de tempo.
- 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  $\lambda=4910\text{Å}$  é 0,71V. Quando se muda o comprimento de onda da radiação incidente, encontra-se para este potencial um valor de 1,43V. Qual é o novo comprimento de onda? Justifique.

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

$\lambda(\text{Å})$	3.600	4.050	4360	4.920	5.460	5.790
$V_0(\text{V})$	1,48	1,15	0,93	0,62	0,36	0,24

- 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);
- Determine **diretamente do gráfico** a frequência limite para ocorrer a emissão fotoelétrica. Explique as razões físicas para a existência deste limite;
- 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;
- Determine diretamente do gráfico o valor da constante de Planck (h) em eVxs;
- Esboce em um mesmo gráfico a corrente fotoelétrica versus o potencial aplicado entre o coletor e o emissor do equipamento para o menor e para o maior comprimento de onda da tabela. Justifique.

(f) Faça um esboço da placa emissora com a distribuição da energia eletromagnética sobre ela quando o feixe a atinge, em duas situações: quando o feixe tem o menor e quando tem o maior comprimento de onda da tabela. Justifique.

**32.** Quando em órbita, o ônibus espacial girava em torno da Terra muito acima da altitude de 99 por cento da atmosfera, mas mesmo assim acumulava uma carga elétrica no casco devido, em parte, à perda de elétrons causada pelo efeito fotoelétrico da luz solar. Se o casco da nave for revestido com Níquel, que possui uma função trabalho relativamente elevada ( $\phi=4,87\text{eV}$ ) nas temperaturas encontradas no espaço: (a) qual é o maior comprimento de onda do espectro solar capaz de fazer com que o casco do ônibus espacial emita 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? Justifique com clareza e concisão.

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

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

**36.** (a) Mostre que um “elétron livre” da matéria não pode absorver um fóton e durante esse processo conservar simultaneamente a energia e o momento linear. (b) No cálculo do efeito Compton que descreve o resultado experimental considera-se que os raios-X arrancaram os elétrons livres do material (não se leva em conta a energia de ligação destes elétrons). Há alguma inconsistência nestes dois cálculos? Explique.

**37.** No espalhamento de um feixe de raios X por um dado material o espectro (intensidade de radiação versus frequência) observado em um dado ângulo mostra dois picos. Um dos picos tem a mesma frequência que o feixe incidente, e o outro tem frequência diferente.

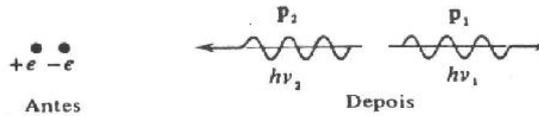
- Cada um dos dois picos pode ser descrito pela idéia fotônica? Justifique.
- Cada um dos dois picos pode ser descrito pela física clássica? Justifique.

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

**39.** Descreva o que ocorre com um 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 processos.

**40.** (a) Relate dois resultados experimentais que são conflitantes com a adoção de caráter ondulatório à radiação eletromagnética (concepção de Maxwell). Deixe claro o resultado experimental em si e porque o resultado conflita com o previsto pela onda eletromagnética. (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.

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

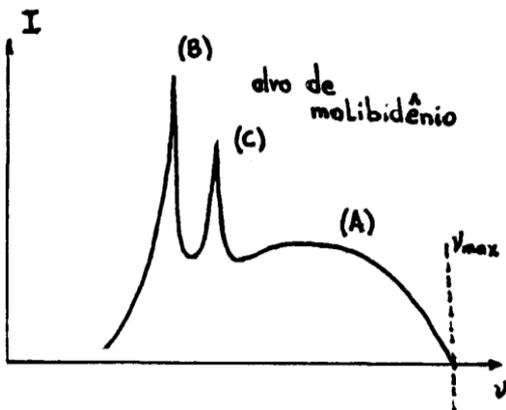


Aniquilação de pares produzindo dois fótons.

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. Justifique.

42. 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?

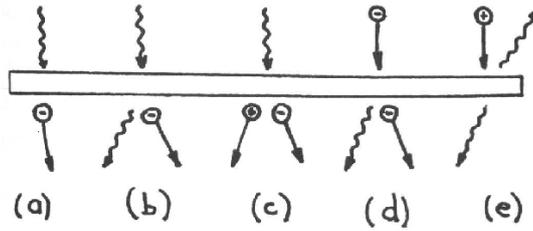
c) O que acontece com o espectro contínuo (A) quando a tensão de aceleração V é dobrada para 2V, mantendo-se o mesmo alvo? Justifique.

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  $\nu_{\max}$  nos casos das situações descritas nos itens (a), (b) e (d).

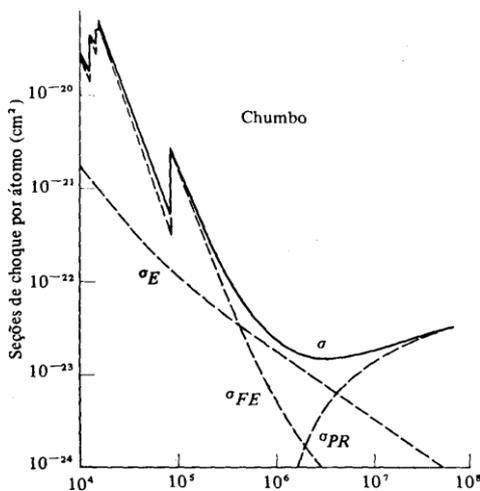
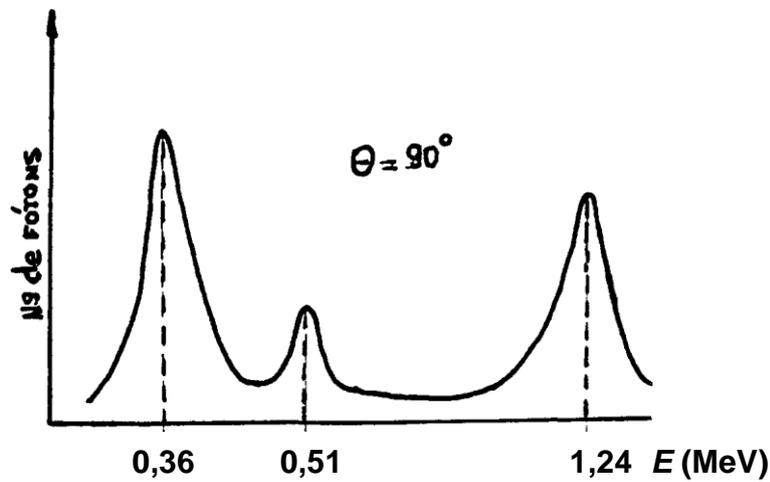
43. Um tubo antigo de televisão opera a 20.000V. Determine o comprimento de onda mínimo do espectro contínuo de raios-X produzido quando os elétrons batem na tela. Justifique.

44. Na figura abaixo estão representados processos de interação de feixe de partículas ou de radiação eletromagnética com a matéria. As partículas representadas são elétrons ou pósitros e com o sinal de sua carga, e as setinhas indicam o sentido da velocidade da partícula. As “cobrinhas” com são a representação de um fóton, e o sinal da seta a direção de sua velocidade. Identifique e descreva, de forma sucinta, cada um dos cinco processos representados. Explícite as leis de conservação de energia e de momento linear em cada um dos processos. Explícite se houver algum termo desprezado de energia ou momento lineares nessas equações, dando as razões físicas que validam tal aproximação.



45. Um feixe monocromático de fótons incide em um bloco metálico. Um detetor registra os fótons espalhados pelo alvo metálico num ângulo de  $90^\circ$  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 é a energia dos fótons do feixe incidente? Justifique.
- Descreva o processo que gerou cada um dos três picos observados.



46. Na figura ao lado, extraída do livro do Eisberg e Resnick, o  $\sigma_{EF}$  é a seção de choque para o efeito fotoelétrico,  $\sigma_E$  a para o espalhamento Compton,  $\sigma_{PR}$  para a produção de pares elétron-positron e  $\sigma$  é a seção de choque total. **O eixo horizontal é a energia de um fóton em eV.**

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

⇒ Respostas a algumas das questões quantitativas.

4. (a)  $3,7 \times 10^{26} \text{W}$  (b)  $5084 \text{ \AA}$  (d)  $4,1 \times 10^3 \text{W}$  e  $2,05 \times 10^3 \text{W}$

6. (a)  $9,4 \mu\text{m}$ ; (b)  $516,9 \text{W/m}^2$  – independentemente da forma do corpo ; (c)  $500 \text{W}$

11. (c)  $4,02 \times 10^{17} \text{ ondas/m}^3$  (d) i)  $1,456 \times 10^6 \text{ J/(m}^2\text{s)}$  II)  $3,21 \times 10^3 \text{ J/(m}^2\text{s)}$   
(e):  $8280 \text{ angstrom}$

12. (a)  $1,07 \text{mm}$  (microonda) (b)  $3,0 \times 10^{-6} \text{W/m}^2$

14. (a)  $8781,8 \text{ \AA}$  (b)  $4,3 \times 10^{14} \text{ Hz}$  (c)  $5 \times 10^{12} \text{W/m}^3$   $6,7 \times 10^6 \text{W/m}^2$  (d) Nada muda nas respostas (a) e (b). Os valores numéricos do item (c) serão menores proporcionalmente ao coeficiente de emissão que é menor do que 1 (porém maior do que zero).

15.  $2,898 \text{ \AA}$

20.  $7 \times 10^{29} \text{ fótons/s}$

21. (a)  $2,1 \times 10^{31} \text{ fótons/s}$ ; (b)  $2,0 \times 10^{18} \text{ fótons/s}$ ; (c)  $2,3 \times 10^{14} \text{ fótons/s}$ ;

22.  $213,9 \text{eV/s}$ .

23.  $4,3 \times 10^{14} \text{ Hz} \leq \nu \leq 7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ;  $1,78 \text{eV} \leq \varepsilon_f \leq 3,10 \text{eV}$

27.  $18247 \text{ \AA}$

28. (a)  $4,12 \times 10^{-15} \text{eVs}$ ; (b)  $2,27 \text{eV}$ ; (c)  $5440 \text{ \AA}$ .

29.  $0 \leq \varepsilon_c \leq 0,48 \text{eV}$ ; (b)  $-0,48 \text{V}$ ; (c)  $2,49 \times 10^{-2} \text{J/s}$ ; (d)  $6,3 \times 10^{16} \text{ fótons/s}$ .

30.  $3818 \text{ \AA}$

32.  $2548 \text{ \AA}$

34.  $\varepsilon_f \gg \left| \mathcal{E}_e^{lig} \right|$

41.  $0,0243 \text{ \AA}$

43.  $4,8 \times 10^{18} \text{ Hz}$

45.  $1,24 \text{MeV}$

46. (a)  $4,3 \times 10^{-3} \text{cm}$