

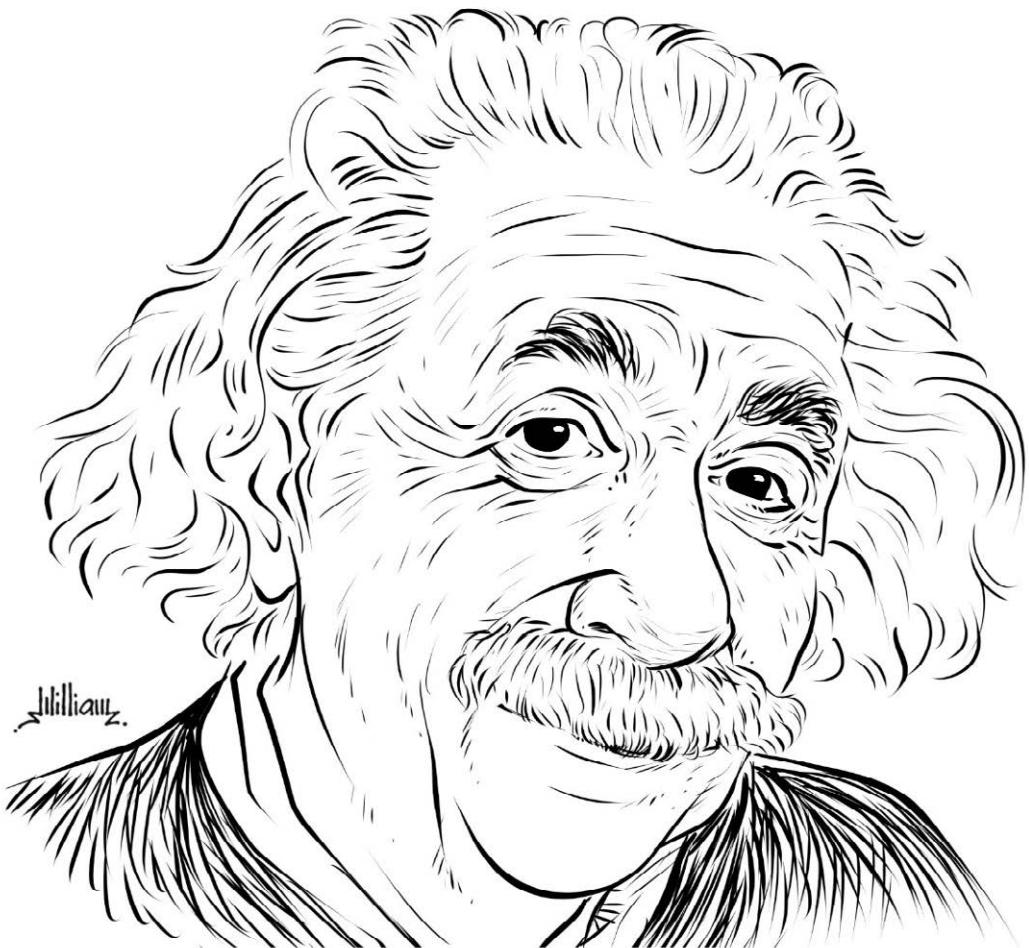
Física Moderna

para o Ensino Médio

GUSTAVO ELIA ASSAD

Física Moderna

para o Ensino Médio



Física Moderna para o Ensino Médio

GUSTAVO ELIA ASSAD



JOÃO PESSOA, 2015

Copyright © 2013 por Gustavo Elia Assad

PRESIDENTE DA REPÚBLICA

Dilma Rousseff

MINISTRO DA EDUCAÇÃO

Cid Gomes

SECRETÁRIO DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA

Marcelo Machado Feres

REITOR DO INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

Cícero Nicácio do Nascimento Lopes

PRÓ-REITOR DE ENSINO

Mary Roberta Meira Marinho

PRÓ-REITORA DE PESQUISA, INOVAÇÃO E PÓS-GRADUAÇÃO

Francilda Araújo Inácio

PRÓ-REITORA DE EXTENSÃO

Vânia Maria de Medeiros

PRÓ-REITOR DE ADMINISTRAÇÃO E PLANEJAMENTO

Antônio Carlos Gomes Varela

PRÓ-REITOR DE DESENVOLVIMENTO INSTITUCIONAL E INTERIORIZAÇÃO

Ricardo Lima e Silva

PROJETO GRÁFICO / DIAGRAMAÇÃO

Adino Saraiva Bandeira

ILUSTRAÇÃO DA CAPA

William Medeiros

IMPRESSÃO

F&A Gráfica

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Biblioteca Nílo Peçanha – IFPB, campus João Pessoa

A844f Assad, Gustavo Elia.

 Física moderna para o ensino médio / Gustavo Elia Assad. – João Pessoa: IFPB,
 2015.

 180 p. : il.

 Inclui referências bibliográficas.

 Inclui exercícios e gabarito.

 ISBN 978-85-63406-54-5

 1. Física moderna. 2. Relatividade especial. 3. Mecânica quântica. 4. Efeito
 fotoelétrico. I. Título.

*Dedico estes belos retalhos de uma
física, nem tão moderna, aos jovens que
ainda estão por descobri-la e àqueles que
apreciam a graciosa ciência. Aproveito o
ensejo e agradeço às constantes inspirações
cosmológicas de um eterno companheiro:
meu amado pai.*

As informações contidas neste livro são
de inteira responsabilidade do autor.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
------------------	---

RELATIVIDADE ESPECIAL OU RESTRITA

1. Introdução à Relatividade	15
2. Os postulados de Einstein	16
3. Simultaneidade	18
4. A dilatação do tempo	21
5. A contração do comprimento	26
6. Aumento da massa	31
7. Velocidade relativa relativística	33
8. Equivalência entre massa e energia	36
9. Relação entre energia e quantidade de movimento	39
10. Um modelo para demonstração da equação de Einstein: $E=m.c^2$	43
11. Leitura: Einstein e sua primeira mulher – casamento conturbado	46

NOÇÕES DE MECÂNICA QUÂNTICA

1. Introdução – quantização: da matéria, da carga, da luz e da energia ..	51
2. Radiação de corpo negro	52
2.1. Lei de Stefan-Boltzmann	53
2.2. Lei de Wien	55
2.3. Catástrofe ultravioleta – lei de Rayleigh-Jeans	56
2.4. Quantização da energia. Teoria de Planck	60
3. Efeito fotoelétrico	64
3.1. Explicando o efeito fotoelétrico. Teoria de Einstein	65
3.1.1. Função trabalho de um metal (W)	66

3.1.2. Energia cinética máxima de emissão de um fotoelétron	67
3.1.3. Potencial de corte ou de frenamento	69
4. Efeito Compton	76
4.1. Demonstração do espalhamento Compton	79
4.2. Aplicação do efeito Compton	82
5. Dualidade e complementaridade	85
6. Princípio da incerteza	91
7. O átomo de Bohr	96
7.1. Postulados de Bohr	96
7.2. A matemática do átomo de Bohr	98
7.3. O átomo de Hidrogênio	102
7.4. LEITURA: Luminescência-Fluorescência e Fosforescência	107
 EXERCÍCIOS	109
Gabarito	175
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	179

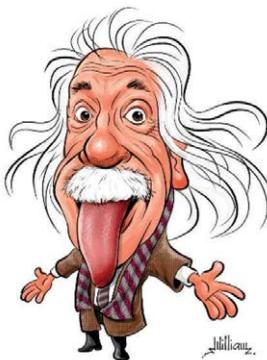
INTRODUÇÃO

A física moderna surge com a necessidade de se criar novos conceitos para explicar fenômenos que a chamada física clássica não conseguia. O tempo deixa de ser absoluto, a luz, embora uma onda, pode se comportar como partícula, as partículas geram ondas de matéria, os elétrons nos átomos não emitem radiação continuamente, enfim, a física necessitava de uma reformulação, um novo olhar.

O que hoje denominamos por física moderna, surge com algumas experiências cujos resultados não puderam ser explicados nem pela mecânica newtoniana, nem pela teoria eletromagnética de Maxwell. Muitas experiências que causaram a ruptura com a física clássica tiveram origem nos estudos que Faraday realizou por volta de 1830, referentes a descargas elétricas em gases rarefeitos. Entretanto, fenômenos estranhos e até então inexplicados, só foram observados depois de 1870. O efeito fotoelétrico foi descoberto ao acaso por Heinrich Hertz em 1887; as raias espectrais do átomo de hidrogênio começaram a ser observadas pelo professor secundarista, Johann Balmer, em 1885; os raios X foram descobertos por Wilhelm Conrad Röntgen em 1895; Henri Becquerel observa, em 1896, fenômenos que resultaram na descoberta da radioatividade; em 1897 Pierre e Marie Curie, descobre o elemento radioativo rádio. Ao lado desses resultados absolutamente inusitados, deve-se salientar a importância dos estudos referentes às radiações emitidas pelos materiais aquecidos, uma linha de pesquisa que girava em torno do problema da radiação de corpo negro, cujo enigma desafiou a inteligência humana durante muito tempo, particularmente na segunda metade do século passado. A ruptura com o conhecimento clássico e o surgimento da física moderna se dá inicialmente com a realização dessas experiências nas duas últimas décadas do século passado.

Por volta de 1900, o professor da Universidade de Berlim, Max Planck, propõe, na sequência de uma série de trabalhos, o modelo de absorção e emissão discreta de radiação, introduzindo uma constante universal que hoje é denominada constante de Planck. Cinco anos depois Albert Einstein utiliza a teoria de Planck e explica o efeito

fotoelétrico. Neste mesmo ano de 1905, ele publica mais quatro artigos que, definitivamente, sacramentam a fama de Einstein. Entre 1911 e 1913, Niels Bohr, um jovem dinamarquês em estágio de pós-doutorado nas Universidades de Cambridge e Manchester, desenvolve o primeiro modelo atômico da era moderna, obtendo enorme sucesso na expliação do espectro discreto do átomo de hidrogênio; era o início da teoria quântica. Assim, sob um ângulo personalista podemos dizer que a revolução em curso é sustentada pelo *triplé* Planck-Einstein-Bohr.

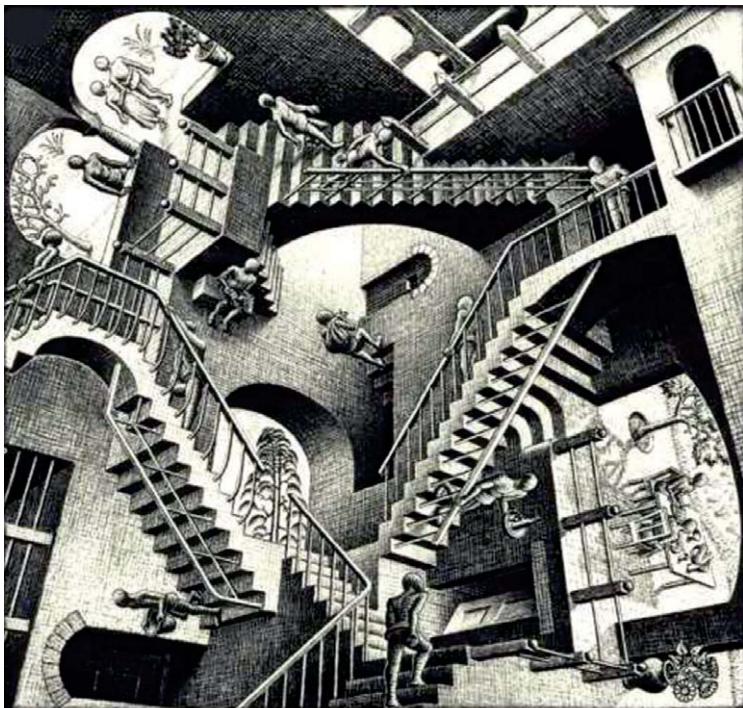


Fonte: site oficial de William Medeiros.

“ O ser humano vivencia a si mesmo, seus pensamentos, como algo separado do resto do universo - numa espécie de ilusão de ótica de sua consciência. E essa ilusão é um tipo de prisão que nos restringe a nossos desejos pessoais, conceitos e ao afeto apenas pelas pessoas mais próximas. Nossa principal tarefa é a de nos livrarmos dessa prisão, ampliando o nosso círculo de compaixão, para que ele abranja todos os seres vivos e toda a natureza em sua beleza. Ninguém conseguirá atingir completamente este objetivo, mas lutar pela sua realização já é por si só parte de nossa liberação e o alicerce de nossa segurança interior. ”

Albert Einstein

RELATIVIDADE ESPECIAL OU RESTRITA



M.C. Escher, *Relativity*, 1953, litogravura. Fonte: site oficial de Andrew Lipson.

1. Introdução à Relatividade

O magnetismo, como demonstrou a experiência de Oersted, está intimamente relacionado com a eletricidade. As equações de Maxwell descreveram, com absoluta precisão, o relacionamento entre campo elétrico e campo magnético; um dos fatores que aparecem nessas equações é a velocidade de propagação de todas as ondas eletromagnéticas: a velocidade da luz (c).

A velocidade da luz aparecia como grandeza, independente do referencial adotado; então ou a velocidade da luz seria uma constante universal ou seria necessário considerar outras hipóteses, como, por exemplo, aceitar a existência de um referencial absoluto para o eletromagnetismo, e que consistiria no próprio meio de propagação da luz, denominado éter.

Entre final do século XIX e princípio do século XX, vários fatos importantes não estavam explicados.

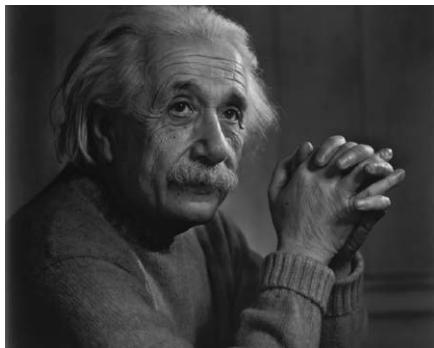
Como vimos, alguns foram esclarecidos pela Física Quântica. Entretanto, outras questões continuavam sem respostas. Estas só foram esclarecidas pela por outra teoria: a teoria da relatividade de Einstein.

Esta teoria, que introduziu profundas transformações em conceitos básicos é composta de duas partes.

Uma delas é a Teoria da Relatividade Restrita (ou Especial), publicada por Einstein em 1905, quando ele tinha 26 anos de idade. Nessa parte, todos os fenômenos são analisados em relação a referenciais necessariamente inerciais.

A outra parte é a Teoria da Relatividade Geral, publicada em 1915, que aborda fenômenos do ponto de vista de referenciais não inerciais.

Só trataremos de alguns pontos da Teoria da Relatividade Restrita.



Albert Einstein. Fonte: site da Editora Moderna.

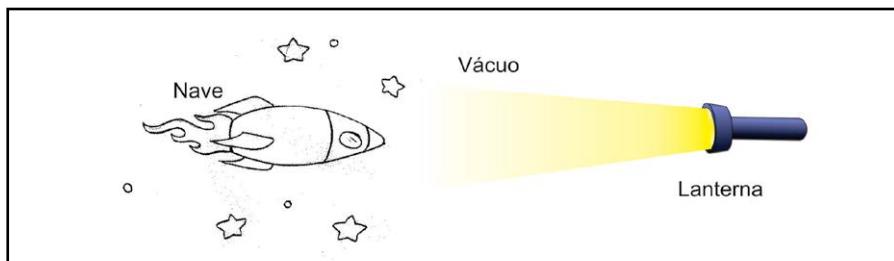
É importante destacar que a Teoria da Relatividade não destruiu a Mecânica newtoniana que continua válida para velocidades desprezíveis em comparação com a velocidade da luz no vácuo.

2. Os Postulados de Einstein

Em 1905, Albert Einstein propôs a teoria da relatividade restrita, com base em dois postulados:

- 1º. As leis da Física são as mesmas para todos os referenciais inerciais, não existindo nenhum referencial privilegiado.*
- 2º. A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor em todas as direções e em todos os referenciais inerciais e é independente do movimento da fonte.*

Note que o segundo postulado contraria radicalmente a maneira newtoniana de compor velocidades. Para confirmar isso, considere uma nave em repouso em relação às estrelas e recebendo a luz emitida por uma lanterna, como ilustra a figura a seguir.



A velocidade da citada luz em relação à nave é de aproximadamente 300 000km/s.

Imagine, agora, que a nave entre em movimento retilíneo e uniforme para a direita, a 100 000 km/s.

Se a composição de velocidades da Mecânica Clássica continuasse valendo, a velocidade da luz emitida pela lanterna seria, em relação à nave, de 400 000 km/s!

Entretanto, por mais absurdo que pareça, essa velocidade continua igual a 300 000km/s!

Vale dizer que, na Teoria da Relatividade, nenhuma composição de velocidades poderá resultar num valor superior a $c \approx 300\ 000$ km/s, que é, pelos conhecimentos atuais, a maior velocidade possível no Universo.

A teoria da relatividade de Einstein estabelece que:

- a duração (intervalo de tempo) de um evento não é um conceito absoluto, mas depende do referencial usado para a observação;
- a massa de um corpo não é invariável, dependendo também do referencial usado para a observação; Como consequência, não podemos pensar em massa como quantidade de matéria, mas sim como uma medida de inércia do corpo. Para evitar possíveis confusões, o Sistema Internacional estabeleceu, como medida de quantidade de matéria, o mol e, como medida de inércia (massa) de um corpo, o quilograma;
- as dimensões de um corpo, da mesma forma, não são grandezas absolutas, dependendo também do referencial usado para a sua observação.

OBSERVAÇÃO IMPORTANTE

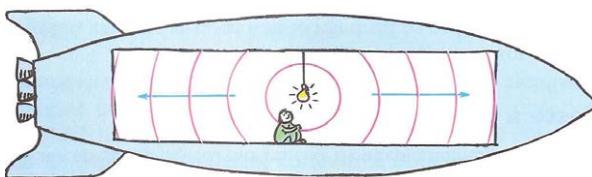
Nos problemas de relatividade é importante saber discernir entre os conceitos de medida própria e relativa.

Medida própria: é a medida feita por alguém em repouso relativamente ao objeto medido. Em relação a um intervalo de tempo, é a medida efetuada com um relógio que esteja em repouso em relação ao fenômeno observado, em repouso em relação ao local dos eventos.

Medida relativa: é a medida feita por alguém que esteja se movimentando em relação ao objeto medido; ou, de modo equivalente, é a medida de um objeto que esteja em movimento em relação ao observador. Em relação a um intervalo de tempo, é a medida efetuada com um relógio que esteja em movimento em relação ao fenômeno observado ou ao local dos eventos.

3. Simultaneidade

Como consequência interessante do segundo postulado de Einstein ocorre com o conceito de simultaneidade. Dizemos que dois eventos são simultâneos se eles ocorrem no mesmo instante de tempo. Por exemplo, considere uma fonte luminosa bem no meio do compartimento de uma nave espacial. Quando a fonte é ligada, a luz se espalha em todas as direções com rapidez igual a c . Como ela se encontra equidistante das extremidades frontal e traseira do compartimento, um observador que esteja dentro dele constata que a luz alcança a extremidade frontal no mesmo instante em que chega à extremidade oposta.



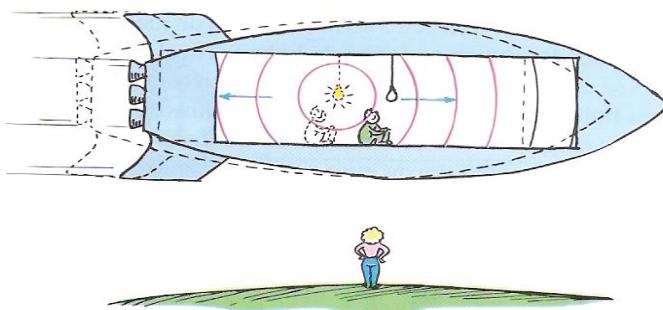
Fonte: HEWITT, 2002, p.630

Do ponto de vista do observador que viaja com o compartimento, a luz da fonte viaja distâncias iguais até as duas extremidades do compartimento e, portanto, chega nelas simultaneamente.

Isso ocorre se a nave espacial se encontra em repouso ou se movendo com uma velocidade constante. Os eventos definidos pela

chegada da luz a cada uma das extremidades opostas ocorrem *simultaneamente* para este observador no interior da nave espacial.

Mas e quanto a um observador que se encontra fora da nave e que vê os dois eventos em outro sistema de referência, um planeta, digamos, que não se move junto com a nave! Para este observador, esses mesmos eventos não são simultâneos. Quando a luz se propaga a partir da fonte, este observador vê a nave mover-se para frente, de modo que a traseira do compartimento se move em direção ao feixe luminoso, enquanto a frente se move em sentido oposto. O feixe direcionado para trás do compartimento, portanto, tem uma distância mais curta a percorrer do que o feixe que segue para frente.



Fonte:: HEWITT, 2002. P.630

A chegada da luz às extremidades frontal e traseira do compartimento não constituem dois eventos simultâneos do ponto de vista de um observador em um outro sistema de referência. Por causa do movimento da nave, a luz que se dirige para a traseira do compartimento não precisa se deslocar tanto e acaba chegando à extremidade antes do que a luz que se dirige para a extremidade frontal.

Uma vez que os valores das velocidades da luz em ambos os sentidos são os mesmos, este observador externo vê o evento da luz chegando à traseira acontecer antes do evento em que a luz chega à frente do compartimento. (É claro, estamos considerando que o observador é capaz de perceber essas pequenas diferenças de tempo.) Um

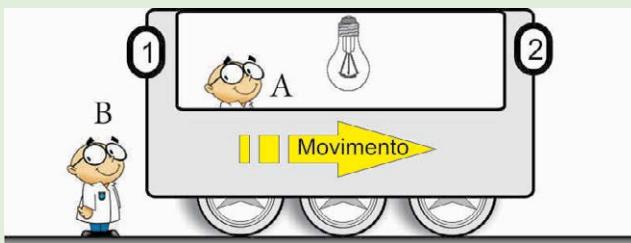
pouco mais de raciocínio mostrará que um observador em outra nave espacial que se move em sentido oposto registrará que a luz chega primeiro à frente do compartimento.

“ Dois eventos que são simultâneos em um sistema de referência não necessariamente devem ser simultâneos em um sistema que se move em relação ao primeiro! ”

Essa não simultaneidade de eventos num sistema de referência quando eles são simultâneos em outro sistema é um resultado puramente relativístico – uma consequência de que a luz se propaga com a mesma rapidez para todos os observadores.

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM

Um carro viajando com velocidade constante comparável à da luz possui uma fonte de luz no seu interior a igual distância dos detectores 1 e 2 localizados em suas extremidades como mostra a figura.



Num dado instante a fonte emite um pulso de luz. Os observadores inerciais A e B, encontram-se no carro e na superfície da Terra, respectivamente. De acordo com a Teoria Especial da Relatividade, pode-se afirmar, EXCETO, que:

- a) para o observador A, a luz chega simultaneamente aos detectores.
- b) para o observador B, a luz não chega simultaneamente aos detectores.
- c) para o observador B, a luz chega primeiro ao detector 1.

- d) a simultaneidade é um conceito relativo, depende do observador.
- e) tanto para o observador A quanto para o observador B, a luz sempre chegará simultaneamente aos detectores.

ANOTAÇÕES / COMENTÁRIOS

4. A dilatação do Tempo

Considere a seguinte situação.

Maria está num trem que se move com velocidade uniforme v em relação à estação. Ela tem um relógio eletrônico para medir o intervalo de tempo Δt_0 entre dois eventos:

Evento 1. A emissão de um clarão pela lâmpada B ;

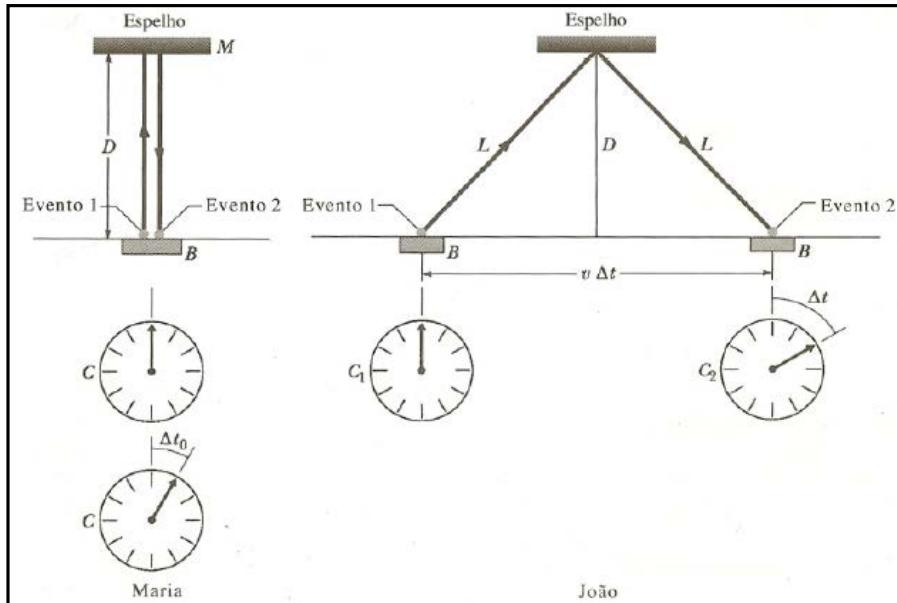
Evento 2. A chegada da luz, de volta à fonte, depois de refletir-se num espelho fixo no teto do vagão.

Para o intervalo de tempo entre os dois eventos, Maria encontra

$$\Delta t_0 = \frac{2D}{c} \quad (\text{Maria})$$

, onde D é a distância entre a fonte e o espelho. Para Maria, estes dois eventos ocorrem no mesmo local ela pode medir o intervalo de tempo entre eles com um único relógio C localizado naquele local.

Veja o esquema a seguir:



Fonte: HALLIDAY; RESNICK; KRANE, 2004. Vol. 4, p. 152.

Consideremos agora como esses mesmos dois eventos aparecem para João, que está parado na plataforma da estação, enquanto o trem passa por ele. Em virtude do postulado da velocidade da luz, a luz se propaga com a mesma velocidade c para João e para Maria. No entanto, para João, a distância percorrida pela luz é maior, valendo $2L$. O intervalo de tempo entre os dois eventos, medido por João, é

$$\Delta t = \frac{2L}{c} \text{ (João)}$$

Observe pela figura que

$$L^2 = \left(\frac{1}{2} v \cdot \Delta t \right)^2 + (D)^2 \text{ e, por Maria, } D = \frac{1}{2} c \cdot \Delta t_0$$

Assim,

$$\begin{aligned}
 L^2 &= \left(\frac{1}{2}v \cdot \Delta t \right)^2 + \left(\frac{1}{2}c \cdot \Delta t_0 \right)^2 \quad \text{e, por João,} \quad L = \frac{1}{2}c \cdot \Delta t \\
 &\Rightarrow \left(\frac{1}{2}c \cdot \Delta t \right)^2 = \left(\frac{1}{2}v \cdot \Delta t \right)^2 + \left(\frac{1}{2}c \cdot \Delta t_0 \right)^2 \\
 &\Rightarrow \left(\frac{1}{2} \Delta t \right)^2 \cdot \left(c^2 - v^2 \right) = \left(\frac{1}{2}c \cdot \Delta t_0 \right)^2 \\
 &\Rightarrow \left(\frac{1}{2} \right)^2 (\Delta t)^2 \cdot c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = \left(\frac{1}{2} \right)^2 c^2 (\Delta t_0)^2 \\
 &\Rightarrow (\Delta t)^2 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = (\Delta t_0)^2
 \end{aligned}$$

Finalmente, conclui-se que a dilatação do tempo é dada por:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

CONCLUSÕES:

- I.** Para João, os dois eventos ocorrem em locais *diferentes* no seu referencial. Então, para medir Δt ele precisa usar *dois* relógios sincronizados, C_1 e C_2 , um em cada local. Então, o intervalo de tempo que ele mede *não* é um tempo próprio. Por isso, as situações para João e Maria *não* são simétricas.

Podemos reescrever a da dilatação temporal como

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

, onde substituímos a razão adimensional v/c pelo símbolo β , que denominamos de **parâmetro de velocidade**.

Em virtude de $\beta < 1$, para qualquer velocidade (não nula) do trem, sempre teremos $\Delta t > \Delta t_0$. Então, João, parado na plataforma da estação, poderia dizer:

JOÃO: “Maria e eu temos relógios idênticos e cada um de nós mede o intervalo de tempo entre os mesmos eventos. O referencial de Maria é especial, pois, para ela, os eventos ocorrem no mesmo local, de modo que ela pode usar um único relógio para medir o intervalo de tempo. Para mim, os eventos ocorrem em locais diferentes, sendo assim, preciso usar *dois* relógios sincronizados, cada um no local de cada evento. Eu concluo que, qualquer que seja o valor da velocidade (independentemente do sentido do movimento) do trem, o intervalo de tempo que meço é sempre maior do que o intervalo de tempo medido por Maria.”

II. A expressão $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$ é conhecida como fator de Lorentz e sempre maior que 1 ($\gamma > 1$). Assim, podemos escrever que:

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0.$$

III. De fato o intervalo de tempo medido por João deveria ser maior que o de Maria que estava dentro do trem, uma vez que a velocidade da luz é a mesma para todos os referenciais, o espaço que ela percorre para João é maior que o que ela percorre para Maria.

$$V_{\text{João}} = V_{\text{Maria}} = c = \frac{\uparrow \Delta s_{\text{João}}}{\uparrow \Delta t_{\text{João}}} = \frac{\downarrow \Delta s_{\text{Maria}}}{\downarrow \Delta t_{\text{Maria}}} \Rightarrow \Delta t_{\text{João}} > \Delta t_{\text{Maria}}$$

EXERCÍCIO RESOLVIDO

Um aluno chega na prova que começa as 8:00h. O relógio dele marca 8:00h e o do professor 9:00h. O aluno jura que a culpa não é dele, ele saiu cedo de casa as 6:00h, o atraso é um efeito relativístico e ele pede para entrar. O professor diz - “isto é um despautério!” - pois

o aluno, nem com o móvel mais rápido da Terra, conseguiria tal feito. Pois bem, qual deveria ser a velocidade do aluno em relação à Terra para conseguir convencer o professor? (Supor todos os relógios sincronizados, até o início da viagem do aluno e desprezar a rotação da Terra).

SOLUÇÃO

O aluno faz medida de tempo próprio, para a saída de casa e chegada à sala de aula, pois está em repouso em relação ao seu relógio. Para o aluno o translado durou 2h e para o professor 3h (medida relativa, dilatação temporal).

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow 3 = \frac{2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow 1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{4}{9} \Rightarrow \frac{v^2}{c^2} = \frac{5}{9}$$

Assim, $v = \frac{\sqrt{5}}{3}c$

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM

Raul e Renato são dois irmãos gêmeos que têm 10 anos de idade e são idênticos. Certo dia Raul partiu de casa numa nave espacial viajando a uma velocidade $0,8c$ e fez uma viagem que durou 12 anos, ida e volta, medido no relógio da nave. Assim quando Raul retorna a casa, entra na sala, senta ao lado de seu irmão Renato na sala e percebe que ele está:

- a) 8 anos mais novo
- b) 8 anos mais velho
- c) 6 anos mais novo
- d) 6 anos mais velho
- e) tão jovem quanto ele

SOLUÇÃO

5. A Contração do Comprimento

Para medirmos o comprimento de uma barra em repouso em relação a nós, podemos, comodamente, anotar as posições das extremidades da barra, usando uma escala longa e estacionária, e fazer a subtração das duas leituras. Contudo, quando a barra está em movimento, é preciso anotar as duas posições *simultaneamente* (no nosso referencial), caso contrário nossa medição não poderá ser chamada de comprimento.

A contração do comprimento é consequência direta da dilatação do tempo. Consideremos novamente nossos dois observadores. Maria sentada num trem que passa por uma estação e João parado na plataforma da estação. Ambos querem medir o comprimento da plataforma. João, usando uma trena, determina que ela mede L_0 ; é um comprimento próprio, pois a plataforma está em repouso em relação a ele. João observa também que uma marca fixa no trem percorre este comprimento num tempo dado por $\Delta t = L_0/v$, onde v é a velocidade escalar do trem. Isto é,

$$L_0 = v \cdot \Delta t \quad (\text{João})$$

Este intervalo de tempo Δt não é um intervalo de tempo próprio, pois os dois eventos que o definem (a passagem da marca fixa no trem pelas duas extremidades da plataforma) ocorrem em locais

diferentes e João tem que usar dois relógios sincronizados para medir este intervalo de tempo.

Para Maria, porém, é a plataforma que está em movimento. Ela vê a plataforma se aproximar e depois de afastar (com a velocidade escalar v) e verifica que os dois eventos observados por João ocorrem *no mesmo local* do seu referencial. Ela pode cronometrá-los com um único relógio em repouso, de modo que o intervalo Δt_0 que ela mede é um intervalo de tempo próprio. Para ela, o comprimento da plataforma é dado por

$$L = v \cdot \Delta t_0 \quad (\text{Maria})$$

Assim, dividindo a equação de Maria pela de João, teremos:

$$\begin{aligned} \frac{L}{L_0} &= \frac{v \cdot \Delta t_0}{v \cdot \Delta t} && \begin{matrix} (\text{Maria}) \\ (\text{João}) \end{matrix} \\ \Rightarrow \frac{L}{L_0} &= \frac{\Delta t_0}{\Delta t} \quad \text{mas} \quad \frac{\Delta t_0}{\Delta t} = \sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)} \end{aligned}$$

Finalmente conclui-se que a contração do comprimento é:

$$L = L_0 \sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)} \quad \text{ou} \quad L = L_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

Obs.: A contração se dá, única e exclusivamente na direção do movimento!!



EXERCÍCIO RESOLVIDO

Uma régua move-se com a velocidade $v=0,6c$ na direção do observador e paralelamente ao seu comprimento.

a) Calcular o comprimento da régua, medida pelo observador, se ela possui um metro no seu próprio referencial.

b) Qual o intervalo de tempo necessário para a régua passar pelo observador?

SOLUÇÃO

$$a) L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow L = 1 \sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}} \Rightarrow L = 0,8m$$

$$b) \Delta t = \frac{L}{v} = \frac{0,8}{0,6 \cdot 3 \cdot 10^8} \Rightarrow \Delta t \approx 4,4 \text{ ns}$$

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM

Uma nave dirige-se verticalmente de encontro ao solo com uma velocidade igual a $0,6c$ em relação a ele. Em certo instante ela está começando a passar por um pico de 1000m de altura, medido por um observador fixo no solo. Qual a altura em que a nave se encontra, medida por um de seus tripulantes?

- a) 800m
- b) 1800m
- c) 600m
- d) 1600m
- e) 1000m

SOLUÇÃO

Evidências da dilatação temporal e da contração do comprimento

Uma das primeiras evidências da dilatação temporal foi obtida por meio de experimentos com uma partícula chamada *muon*. Quando fazemos experimentos no laboratório com *muons* em repouso, observamos que eles se desintegram com uma vida média de $2,2\mu\text{s}$. Muitos *muons* são criados na alta atmosfera, como resultado do bombardeio dos raios cósmicos. Esses *muons* movem-se com velocidade próxima da luz:

$$v = 2,994 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cong 0,998c$$

Portanto, entre o momento em que são criados e o momento em que se desintegram, deveriam percorrer, em média, uma distância de:

$$\begin{aligned}d &= v \cdot (\Delta t) \\d &= (2,994 \cdot 10^8 \text{ m/s}) \cdot (2,2 \cdot 10^{-6}\text{s}) \\d &= 650 \text{ m}\end{aligned}$$

No entanto, a experiência mostra que *muons* criados a quase 10km de altitude são detectados na superfície da Terra. Isso acontece por causa da dilatação temporal. Para um referencial fixo no *muon*, o tempo de desintegração é:

$$\Delta t_0 = 2,2 \cdot 10^{-6}\text{s}$$

Para um referencial fixo na Terra, temos:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}}$$

Assim:

$$\Delta t = \frac{2,2\mu s}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,998^2 c^2}{c^2}\right)}}$$

Portanto: $\Delta t \cong 35\mu s$

Logo, para um observador na Terra, a distância percorrida pelo *muon* antes de desintegrar-se é:

$$D = v \cdot (\Delta t)$$

$$D = (2,994 \cdot 10^8 \text{ m/s}) \cdot (35 \cdot 10^{-6} \text{ s})$$

$$D \cong 10.000 \text{ m}$$

Isto explica como é possível se detectar *muons* na superfície da Terra!!

Este fato também pode ser explicado pela contração do comprimento da atmosfera terrestre para o referencial do *muon*. Veja os cálculos a seguir.

$$\begin{aligned} L_{\text{Muon}} &= L_{\text{Terra}} / \gamma \\ L_{\text{Muon}} &\cong 10 \text{ km} \cdot 0,0632 \\ L_{\text{Muon}} &\cong 632 \text{ m} \end{aligned}$$

Para o *muon* a atmosfera teria 632m de extensão e seria possível chegar à superfície, uma vez que só se desintegram após 650m aproximadamente.

Outro tipo de teste consistiu em comparar relógios atômicos, que marcam intervalos de tempo muito pequenos. Um foi mantido no solo, enquanto outro foi colocado em um avião que percorreu uma grande distância a uma grande velocidade em relação à Terra. Terminado o voo, os relógios foram comparados e constatou-se que o relógio do avião estava ligeiramente atrasado em relação ao relógio que foi mantido no solo.

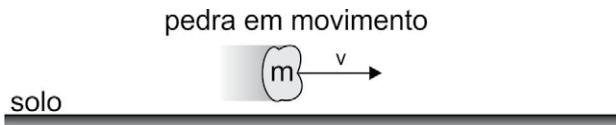
6. Aumento da Massa

Considere, por exemplo, uma pedra em repouso em relação ao solo:



Vamos simbolizar por m_0 massa da pedra medida nessa situação (m_0 chama-se massa de repouso).

Suponha, agora, que essa mesma pedra esteja em movimento em relação ao solo, com velocidade v :



Pode-se demonstrar que nessa nova situação a massa da pedra passa a ser m , dada pela expressão:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}} \quad \text{ou} \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

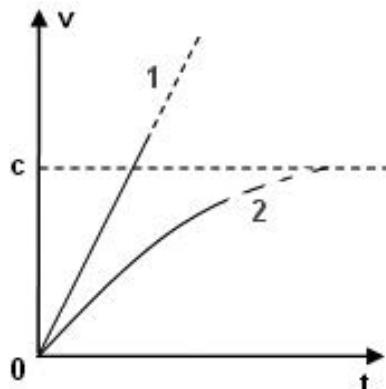
, em que m chama-se massa relativística.

Note que, sendo $\sqrt{1 - \beta^2}$ menor que 1, m é maior que m_0 , ou seja, a massa da pedra em movimento é maior que sua massa de repouso. Note também que, quanto maior for v , maior será a massa m .

Evidentemente, esse aumento de massa não significa um aumento da quantidade de partículas que constituem a pedra, mas um aumento da sua inércia. Por exemplo, se a pedra estiver em movimento retilíneo acelerado, sob ação de uma força resultante constante, sua aceleração não será constante, mas diminuirá à medida que sua velocidade aumentar, como ilustra a figura seguinte.

- O gráfico 1 representa a previsão da mecânica clássica: a aceleração da pedra é constante e sua velocidade cresce indefinidamente.

- O gráfico 2 representa a previsão relativística: a aceleração da pedra diminui com o tempo em virtude do aumento de sua inércia e sua velocidade é limitada pelo valor c .



EXERCÍCIO RESOLVIDO

Um jovem que come numa pizzaria, o equivalente a 840g de massa, se entrasse numa nave que se desloca a uma fração de $\frac{4\sqrt{2}}{9}$ da velocidade da luz, que massa ele pareceria ter comido? Este resultado representa um real aumento da massa das pizzas? As moléculas se multiplicaram?

SOLUÇÃO

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow m = \frac{840}{\sqrt{1 - \left(\frac{4\sqrt{2}}{9}c\right)^2}} \Rightarrow m = \frac{840}{\sqrt{1 - \frac{32}{81}}} = \frac{840}{\sqrt{\frac{49}{81}}} = \frac{840}{\frac{7}{9}} = \frac{840}{1} \cdot \frac{9}{7} = 1080$$

Logo,

$$m = 1080g = 1,08kg$$

Esse aumento de massa não significa um aumento da quantidade de partículas que constituem a pizza, mas um aumento da sua inércia. Esta massa de 840g, nessa velocidade, resiste à mudança no estado de seu movimento como se fosse 1080g.

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM

Qual massa teria uma pessoa de 60kg, em repouso, se ela estivesse a uma velocidade de 0,8c?

SOLUÇÃO

7. Velocidade Relativa Relativística

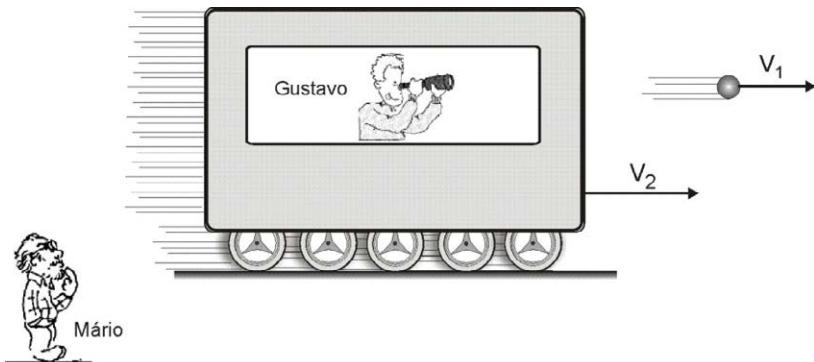
A maioria das pessoas sabe que se você caminha a 1 km/h ao longo do corredor de um trem que se move a 60km/h, sua rapidez em relação ao solo é de 61km/h se você estiver caminhando no mesmo sentido do movimento do trem, e de 59km/h se você caminhar em sentido contrário. O que a maioria das pessoas sabe está *quase* correto. Levando em conta a relatividade especial, os valores de sua rapidez são aproximadamente iguais a 61km/h e 59km/h, respectivamente. Para objetos do cotidiano em movimento uniforme (não acelerado), nós normalmente combinamos velocidades de acordo com a fórmula simples:

$$V = v_1 + v_2$$

Mas esta regra não se aplica à luz, que sempre se propaga com a mesma rapidez c . Estritamente falando, a fórmula acima é uma aproximação da fórmula relativística para combinar velocidades. Não abordaremos aqui a longa derivação para este caso, mas tão somente apresentaremos a fórmula relativística:

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

Para compreendermos melhor os termos desta equação considere a figura ilustrativa abaixo e verifique o que representa v_1 , v_2 , c e V .



V_1 : velocidade da bala em relação ao trem (Gustavo)

V_2 : velocidade do trem em relação à Terra (Mário)

V : velocidade da bala em relação à Terra (Mário)

O numerador desta fórmula faz parte do senso comum. Mas esta soma simples de duas velocidades é alterada pelo segundo termo do denominador, o qual é significativo somente quando ambos os valores de v_1 e de v_2 são próximos de c .

Como exemplo, considere uma espaçonave que está se afastando de você a uma rapidez igual a $0,5c$. Ela dispara um foguete que é impulsionado no mesmo sentido do movimento da nave, afastando-se de você, com uma rapidez de $0,5c$ com relação à própria nave. Qual a rapidez deste foguete com relação a você? A fórmula não relativística diria que o foguete se move com rapidez igual à da luz ($V_{REL} = 0,5c + 0,5c$) no sistema de referência utilizado por você. Mas, de fato,

$$V = \frac{0,5c + 0,5c}{1 + \frac{(0,5c)^2}{c^2}} = \frac{c}{1,25}$$

o que ilustra outra consequência da relatividade: nenhum objeto material pode se mover mais rapidamente que a luz.

Suponha que a espaçonave, em vez de um foguete, dispara um pulso de luz *laser* no mesmo sentido em que está viajando. Quão rápido este pulso se moverá em relação ao sistema de referência usado por você?

$$V = \frac{0,5c + c}{1 + \frac{0,5c^2}{c^2}} = \frac{1,5c}{1,5} = c$$

Ou seja, não importando qual seja a velocidade relativa entre os dois sistemas de referência, a luz se propaga com a mesma velocidade para qualquer referencial. Se você tentar perseguir a luz, jamais a alcançará!

EXERCÍCIO RESOLVIDO

Vamos supor que duas naves espaciais, X e Y, viajam em sentido contrário, com velocidades de 60% e 80% da velocidade da luz medidas em relação à Terra. Calcule a velocidade de uma nave em relação à outra.

SOLUÇÃO

Admitindo o sentido do movimento de X como positivo e o de Y como negativo, temos:

$$v_x = \frac{v_y + v_{rel}}{1 + \frac{v_y v_{rel}}{c^2}} \Rightarrow 0,6c = \frac{-0,8c + v_{rel}}{1 + \frac{(-0,8c)v_{rel}}{c^2}}$$

$$0,6c - 0,48v_{rel} = -0,8c + v_{rel} \Rightarrow 1,48v_{rel} = 1,4c$$

Assim,

$$v_{rel} \approx 0,95c \text{ (de aproximação entre eles).}$$

Observe que a velocidade relativa obtida na física clássica seria de $1,4c$ (absurdo!)

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM

Um trem se move com velocidade $0,8c$ e um observador no interior de um trem (Gustavo na fig. anterior) viu um projétil passar pela janela com uma velocidade de $0,5c$ em relação ao trem e em sentido oposto a ele. Qual a velocidade do projétil em relação a um referencial fixo na Terra (Mário na fig. anterior)?

SOLUÇÃO

8. Equivalência entre massa e energia

Considere, novamente, uma pedra em repouso em relação ao solo. Sendo m_0 sua massa de repouso, pode-se demonstrar que essa massa equivale a uma energia intrínseca E_0 , dada por:

$$E_0 = m_0 c^2$$

Por exemplo, se fosse possível aniquilar uma pedra de massa de repouso igual a $1g$, transformando-a totalmente em energia, obteríamos:

$$E_0 = m_0 \cdot c^2 = (1 \cdot 10^{-3}) \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Essa energia seria suficiente para manter acesas 1000 lâmpadas de 100W por quase 30 anos! Portanto, uma pequeníssima massa equivalente é a uma enorme quantidade de energia.

Todas as reações que liberam energia, inclusive as reações químicas exotérmicas, o fazem devido a uma perda de massa, que se transforma em energia.

A energia solar, por exemplo, provém de uma reação nuclear denominada fusão nuclear. Nessa reação, isótopos de hidrogênio se fundem produzindo um núcleo de hélio. A massa do núcleo de hélio, porém, é ligeiramente menor que a soma das massas dos quatro núcleos de hidrogênio, essa perda de massa corresponde à energia liberada. Nesse processo, o Sol perde de 4 milhões de toneladas de massa a cada segundo!

ATENÇÃO

Do exposto concluímos que a massa é uma forma de energia;

- Não podemos encarar a equação $E_0=m_0c^2$ dizendo que a matéria se transforma em pura energia quando está viajando com “a velocidade da luz ao quadrado”. Não, não e não! Não se pode fazer a matéria se mover com a velocidade da luz, quanto mais com o quadrado dela (que não é uma velocidade!). Esta equação significa simplesmente que energia e massa são “os dois lados da mesma moeda”.
- É comum, quando trabalhamos com pequenas energias, usarmos a unidade **MeV (mega elétron-volt)**. Sua relação com o joule (S.I.) é dada por:

$$1\text{MeV}=1,6 \cdot 10^{-13}\text{J}$$

- Quando um corpo está em movimento, sua energia total E (relativística) é a soma da energia de repouso com sua energia cinética. Essa energia total também pode ser expressa por $E=m \cdot c^2$, em que m é a massa relativística. Este resultado será mais bem discutido a seguir.

ATENÇÃO (CONTINUAÇÃO)

$$\boxed{\text{ENERGIA TOTAL}} = \boxed{\text{ENERGIA DE REPOUSO}} + \boxed{\text{ENERGIA CINÉTICA}}$$

Ou ainda, teremos que:

$$mc^2 = m_0c^2 + Ec \quad \text{com} \quad m = \frac{m_0}{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}$$

EXERCÍCIO RESOLVIDO

Até o início do século XX, matéria e energia eram consideradas entidades distintas. A primeira caracterizaria uma das propriedades intrínsecas dos corpos e a segunda, o estado dinâmico dos corpos em relação a um determinado meio. A partir dos trabalhos de A. Einstein, ficou claro que tal separação não deveria existir; matéria e energia poderiam transformar-se uma na outra. Essa nova visão dos conceitos de massa e energia celebrou-se pela relação $E=m.c^2$, em que E é a energia, m é a massa e c é o módulo da velocidade da luz no vácuo (300000 km/s). Assim, ao gerar energia, observa-se um equivalente desaparecimento de massa. Considerando que a queima de 1 litro de gasolina que libera $5 \cdot 10^7$ joules de energia qual a massa desaparecida (transformada em energia) nesse processo?

SOLUÇÃO

Considerando uma transformação de Δm em massa em energia durante o processo, temos: $E = \Delta m \cdot c^2 \Rightarrow 5 \cdot 10^7 = \Delta m \cdot (3 \cdot 10^8)^2$

$$\text{Logo,} \quad \Delta m = \frac{5}{9} \cdot 10^{-9} \text{ kg}$$

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM

Um elétron foi acelerado por um campo elétrico até atingir a velocidade $v=0,6c$. Se a energia em repouso do elétron vale 0,5MeV, então a sua energia relativística e a sua energia cinética, ao atingir aquela velocidade, valem, respectivamente:

- a) 0,625 MeV , 0,125 MeV
- b) 0,525 MeV , 0,125 MeV
- c) 0,625 MeV , 0,225 MeV
- d) 0,475 MeV , 0,325 MeV
- e) 0,725 MeV , 0,525 MeV

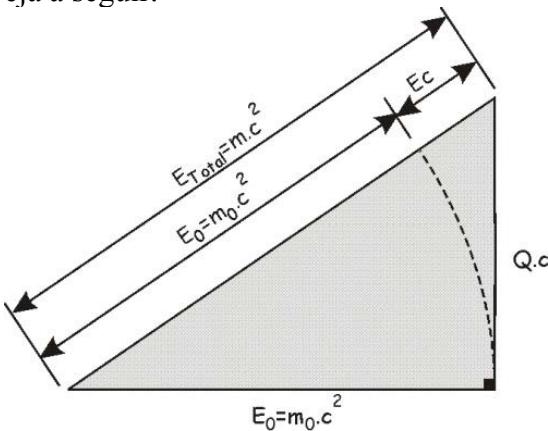
SOLUÇÃO

9. Relação entre energia e quantidade de movimento

Considere um corpo que se move com velocidade v em relação a um determinado referencial. O que faremos agora é uma manipulação algébrica das equações anteriores a fim de demonstrar que:

$$E^2 = Q^2 c^2 + (m_0 \cdot c^2)^2$$

Antes de começarmos nossa longa demonstração, para aqueles de maior interesse, vale a pena ressaltar um interessante dispositivo mnemônico para lembrar-se das relações entre $E_0 = m_0 c^2$, Q , E_c e $E_{\text{Total}} = m.c^2$. Veja a seguir:



ATENÇÃO

A expressão indicada acima permite concluir que os fôtons, apesar de terem massa de repouso nula ($m_0 = 0$), possuem quantidade de movimento não nula. Fazendo $m_0 = 0$ na expressão de E^2 , encontramos

$$E^2 = Q^2 c^2 \Rightarrow E = Q.c$$

Veja a demonstração que se segue:

A energia total relativística é dada por:

$$E = mc^2 \quad \text{com} \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Elevando esta expressão ao quadrado, teremos: $E^2 = \frac{(m_0.c^2)^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

Isolando $(1-v^2/c^2)$ e chamando este resultado de equação (I)

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{(m_0 \cdot c^2)^2}{E^2} \quad \text{EQUAÇÃO (I)}$$

Vamos isolar (v^2) e chamar este resultado de equação (II)

$$v^2 = c^2 \left[1 - \frac{(m_0 \cdot c^2)^2}{E^2} \right] \quad \text{EQUAÇÃO (II)}$$

A quantidade de movimento relativística é dada por:

$$Q = m \cdot v \quad \text{com} \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow Q = \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Elevando esta expressão ao quadrado, teremos: $Q^2 = \underbrace{\frac{m_0^2 \cdot \overbrace{(v^2)}^{(II)}}{1 - \left(\frac{v^2}{c^2} \right)}}$

Substituindo as equações (I) e (II) nesta última e realizando certa ginástica algébrica, demonstraremos o resultado esperado acima. Veja.

$$Q^2 = \frac{m_0^2 c^2 \left[1 - \frac{(m_0 \cdot c^2)^2}{E^2} \right]}{\frac{(m_0 \cdot c^2)^2}{E^2}} = \frac{m_0^2 c^2 \left[\frac{E^2 - (m_0 \cdot c^2)^2}{E^2} \right]}{\frac{m_0^2 \cdot c^4}{E^2}} = \frac{E^2 - (m_0 \cdot c^2)^2}{c^2}$$

Assim,

$$Q^2 = \frac{E^2 - (m_0 \cdot c^2)^2}{c^2} \Rightarrow Q^2 c^2 = E^2 - (m_0 \cdot c^2)^2$$

Finalmente,

$$E = Q^2 c^2 + (m_0 \cdot c^2)^2 \quad (\text{C.Q.D.})$$

UFA!

EXERCÍCIO RESOLVIDO

Considerando o movimento relativístico de um próton, em que sua energia total é três vezes maior do que a de repouso determine:

- a) a energia de repouso do próton em MeV;
- b) com que velocidade o próton está se movendo;
- c) a energia cinética do próton;
- d) o módulo da quantidade de movimento do próton.

Dados: $m_{\text{PRÓTON}} \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ e $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

SOLUÇÃO

a) $E_0 = m_0 c^2 = 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 1,50 \cdot 10^{-10} \text{ J}$

Como $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, temos: $E_0 = 938 \text{ MeV}$

b) $E_{\text{Total}} = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow 3E_0 = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow 1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{9}$

Assim, $v = \frac{\sqrt{8}}{3}c \approx 2,38 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

c) $E_{\text{Total}} = E_0 + E_c$, com $E_{\text{Total}} = 3E_0$.

$$E_c = 2E_0 = 2 \times 938 \text{ MeV} \Rightarrow E_c = 1,88 \text{ GeV}$$

d) $E_{\text{Total}}^2 = Q^2 c^2 + E_0^2$, com $E_{\text{Total}} = 3E_0$. Logo,

$$(3E_0)^2 = Q^2 c^2 + E_0^2 \Rightarrow Q = \sqrt{8} \frac{E_0}{c} = \sqrt{8} \frac{1,50 \cdot 10^{-10} \text{ J}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}$$

Assim, $Q \approx 1,41 \cdot 10^{-18} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM

A energia cinética de um elétron relativístico é N vezes sua energia de repouso. Determine o valor de N , sabendo que V e c obedecem a seguinte razão: $\frac{v}{c} = \sqrt{\frac{15}{16}}$

SOLUÇÃO

10. Um Modelo para Demonstração da Equação de Einstein: $E=m.c^2$

Em 1906, Einstein realizou uma demonstração, entre várias, para a sua elegante equação $E=m.c^2$, imaginando um cilindro oco que emite um pulso numa extremidade e absorve na outra, conforme a figura a seguir.

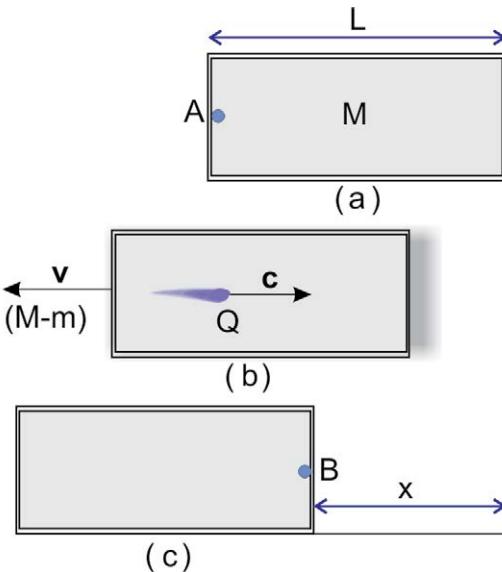


Figura: (a) Um cilindro de massa M e comprimento L num referencial inercial. (b) Um pulso de radiação é emitido da esquerda do ponto A e o cilindro recua para esquerda com velocidade v . (c) O pulso é absorvido na extremidade direita, em B , e o cilindro volta ao repouso depois de recuar uma distância X .

Pela relação entre energia e quantidade de movimento de uma radiação, o pulso transporta uma quantidade de movimento dada por $\mathbf{Q} = E/c$ e, devido à conservação da quantidade de movimento, o cilindro recua com uma velocidade v . Se a massa original do cilindro é M e a massa, hipoteticamente perdida pela emissão da radiação for m , aplicando a conservação do momento linear, teremos:

$$\vec{Q}_{\text{Antes}} = \vec{Q}_{\text{Depois}} \quad \text{com} \quad \vec{Q}_{\text{Antes}} = \vec{0}$$

$$-(M-m) \cdot v + Q_{\text{Pulso}} = 0$$

$$Q_{\text{Pulso}} = (M-m) \cdot v$$

$$(M-m)v = \frac{E}{c} \quad (\text{I})$$

Como o intervalo de tempo em que o cilindro recua “x” com velocidade “v” é igual ao intervalo de tempo que o pulso gasta para chegar à outra extremidade, percorrendo distância “L-x” com velocidade “c”, temos:

$$\Delta t_{\text{Pulso}} = \Delta t_{\text{Cilindro}}$$

$$\frac{x}{v} = \frac{L - x}{c}$$

$$(L - x) = x \cdot \frac{c}{v} \quad (\text{II})$$

O cilindro e a radiação constituem um sistema isolado, livre da ação de forças externas, logo a posição do centro de massa deve permanecer inalterada, o que vamos ver através da conservação do momento linear do centro de massa. Observe que para que esta condição seja atendida, a radiação deve transportar certa massa (m) do aponto A ao ponto B. Assim,

$$Q_{\text{C.M. Antes}} = Q_{\text{C.M. Depois}}$$

$$0 = -(M - m)v + m.c$$

$$(M - m)v = mc$$

Como $v=x/\Delta t$ e $c=(L-x)/\Delta t$, temos

$$(M - m) \frac{x}{\Delta t} = m \frac{(L - x)}{\Delta t}$$

Logo,

$$(M - m)x = m(L - x) \quad (\text{III})$$

Substituindo II em III, temos:

$$(M - m)x = m \cdot x \cdot \frac{c}{v}$$

$$(M - m) = m \cdot \frac{c}{v} \quad (\text{IV})$$

Substituindo IV em I, concluirímos: $m \cdot \frac{c}{v} v = \frac{E}{c}$

$$E=mc^2 \quad (\text{C.Q.D.})$$

NOTA

Esta é um modelo esteticamente simples para a demonstração da equação de Einstein e peca em alguns aspectos como o de imaginar que o cilindro é rígido, não contrai. Isto por si só já viola os princípios básicos da própria relatividade especial e requer um pulso com velocidade infinita para garantir simultaneidade na recepção do sinal de emissão do mesmo. Mas, com certeza não tira do leitor, nem tirou de Einstein a alegria de chegar a um resultado tão magnífico de forma tão acessível.

11. Leitura: Einstein e sua primeira mulher – casamento conturbado

Einstein casou-se pela primeira vez em 1903, sob veemente oposição da mãe, com a sérvia *Mileva Maric*, uma colega da Politécnica que ele conheceu aos 17 anos de idade. O casamento gerou três filhos: uma menina, *Lieserl*, e dois meninos, *Hans Albert* e *Eduard*, revelando uma face pouco divulgada e embarracosa de um candidato a mito.



Einstein e Mileva. Fonte: Tesla Memorial Society of NY⁴.

Várias cartas foram escritas por ele durante esta época. Elas revelam a decadência do relacionamento do casal até sua separação. Inicialmente Einstein se refere à Mileva como “*uma criatura igual a ele: forte e independente*” - ou como em outra carta, onde ele se refere à Mileva como “*bonequinha*” e declara: “*sem a sua lembrança, eu não conseguia viver no meio desse miserável bando de humanos*”.

À medida em que o relacionamento foi se deteriorando, o teor das cartas foi mudando. Em uma delas Einstein escreve para sua prima *Elsa*, com quem casaria mais tarde: “*Trato Mileva como uma empregada que não posso demitir: tenho meu próprio quarto e evito ficar sozinho com ela. Somente dessa forma posso suportar nosso convívio.*”

Einstein chegou ao extremo de impor regras escritas à Mileva.

A) “*Você se encarregará de: (1) que minhas roupas sejam mantidas em ordem; (2) me servir três refeições ao dia no meu quarto; (3) que meu quarto e minhas coisas sejam mantidas em ordem sobre a minha mesa, e que não sejam tocadas por ninguém além de mim.*”

B) “*Você renunciará a qualquer relacionamento pessoal comigo, exceto quando necessário, de modo que as aparências sociais sejam mantidas. Em particular, você não: (1) sentará ao meu lado em casa; (2) sairá ou viajará comigo.*”

C) “*Você terá que prometer as seguintes coisas: (1) não esperar afeição de minha parte, e não se aproximar de mim; (2) responder imediatamente quando eu falar com você; (3) sair do meu quarto imediatamente, sem protestar, quando eu pedir.*”

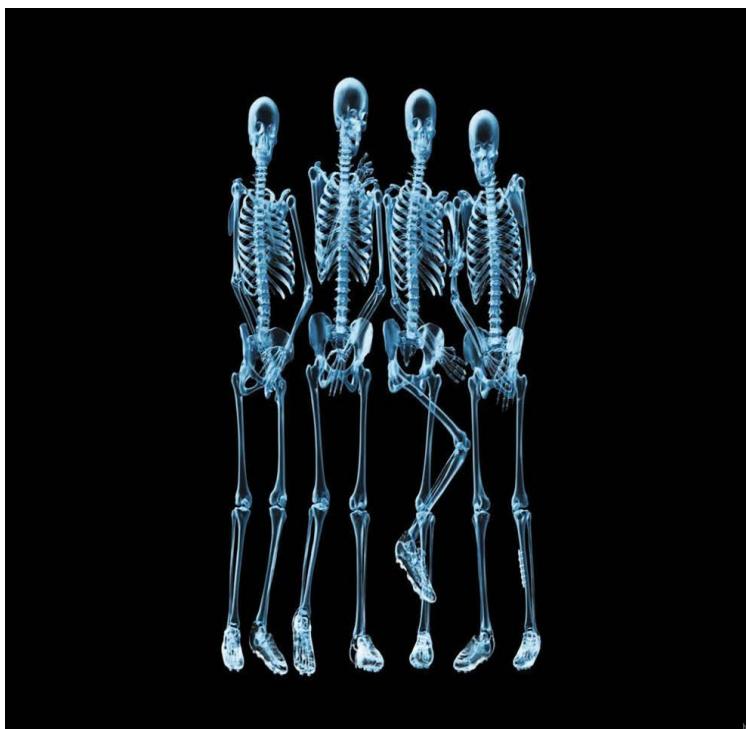
D) “*Você prometerá não manchar a minha imagem aos olhos das crianças.*”

Einstein e Mileva viveram quase uma década de grande paixão, com um final tão trágico quanto comum. Nesse contexto é mais do que natural que atitudes extremadas tenham sido tomadas em momentos de insuportável tensão.

Em setembro de 1917 Einstein muda-se para a casa da sua prima, *Elsa Löwenthal*, com quem vive até sua morte, em 20 de dezembro de 1936. Viúvo aos 57 anos, Einstein permanece nesta condição o resto da sua vida, i.e., até 18 de abril de 1955.

Sua vida conjugal foi conturbada não apenas pelo fracasso do primeiro casamento, mas também pela saúde debilitada de *Mileva* e do filho caçula, *Eduard*. *Mileva*, em constante crise de melancolia, morreu em Zurique, em 1948. *Eduard*, que herdou do pai os traços faciais e os talentos musicais, herdou da mãe a tendência para a melancolia, escreveu poesias, estudou medicina e queria ser psiquiatra. Muito cedo Einstein reconheceu indícios de demência no filho, que veio a falecer no Hospital Psiquiátrico *Burgholz*, Zurique, em 1965.

NOÇÕES DE MECÂNICA QUÂNTICA



Radiografia de Jogadores de Futebol formando a “Barreira”. Fonte: site de downloads⁶

1. Introdução – quantização: da matéria, da carga, da luz e da energia.

Uma grandeza é dita quantizada ou discreta quando não podemos atribuir qualquer valor para ela, quando ela varia de quantidades em quantidades bem definidas, enfim, uma grandeza é quantizada quando não é contínua! As grandezas físicas são ditas **quantizadas** quando, entre um valor que ela pode assumir e outro, existem **valores proibidos!**

- Como exemplo de uma grandeza contínua, tome o aquecimento de um punhado de água, no interior de uma panela, de 20°C até 80°C. Durante o aquecimento a temperatura da panela assume todos os valores entre 20 e 80 graus. Não há um valor sequer nesse intervalo pelo qual o punhado de água não tenha passado. Quando isso acontece, dizemos que a água foi aquecida **continuamente**.
- Como exemplo análogo de uma grandeza discreta, quantizada, tome a compra de certa cerveja que só é vendida em caixa de 12 unidades. Você pode comprar uma caixa, duas caixas, três caixas,..., ou seja, 12 cervejas, 24 cervejas, 36 cervejas, etc.. A compra varia de 12 em 12 cervejas, não é permitido comprar 17, 13, 45, etc. ou 2,78 caixas, existem valores proibidos!

No início do século XX e final do XIX, Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro (1776-1856), propõe a teoria molecular da matéria que dizia que a matéria não é contínua como se mostra no todo, mas é quantizada (discreta) em uma escala microscópica.

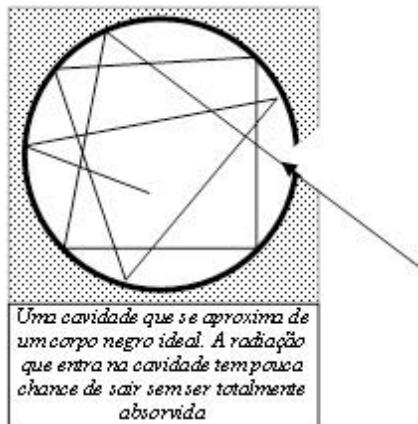
Michael Faraday (1791-1867), filho de ferreiro e autodidata, tem história fascinante e vale a pena ser lida. Ele, por volta de 1833, em seu trabalho sobre eletricidade em líquidos e escrevendo a lei da eletrólise, afirma que quantidades iguais de eletricidade, chamada de faraday(F), onde $1F \approx 96500C$, sempre decompõem um peso grama iônico de íons monovalentes, ou seja, a eletricidade também se quantiza!

A carga elétrica também é quantizada. Estudiosos como Joseph John Thomson (1856-1940), e seu aluno J. S. Townsend (1868-1957) e Robert Andrews Millikan (1868-1953) chegaram à conclusão de que a carga do elétron era com boa aproximação $-1,601 \cdot 10^{-19} C$ e que carga de um corpo só poderia variar em valores múltiplos desta, chegando à relação que conhecemos muito bem nos dias de hoje: $Q=n \cdot e$ com $n=1,2,3,4,\dots$ (quantização).

Concluindo, estamos vendo que existem muitas grandezas, incluindo a energia, podem ser quantizadas e este processo é de suma importância para a interpretação de fenômenos na física moderna.

2. Radiação de Corpo Negro

Quando uma radiação incide sobre um corpo parte dela é refletida e parte dela é absorvida. Corpos mais claros refletem bem a radiação e corpos mais escuros são mais absorvedores das mesmas. Um elemento que se aproxima de um corpo negro ideal (100% de absorção) é uma cavidade com pequena abertura para entrada de radiação. Veja a figura ao lado.



Uma cavidade que se aproxima de um corpo negro ideal. A radiação que entra na cavidade tem pouca chance de sair sem ser totalmente absorvida

Quando cargas elétricas existentes nas moléculas vibram elas emitam ondas eletromagnéticas, radiação. Assim, todo corpo acima do zero absoluto emite radiação e se ele estiver superaquecido, pode emitir radiação na faixa do visível. No equilíbrio térmico, os corpos emitem radiação na mesma taxa em que absorvem.

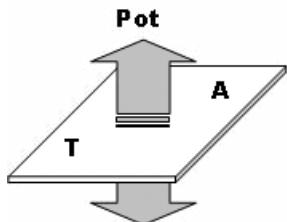
2.1. Lei de Stefan-Boltzmann (1879-1884)

A lei de **Stefan-Boltzmann**, como o próprio nome indica, foi descoberta pelo físico austríaco Joseph Stefan (1835-1893) e deduzida teoricamente pelo físico austríaco Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906).



Joseph Stefan e Ludwig E. Boltzmann. Fonte: Purdue University.

A intensidade total de radiação térmica (I) emitida por um corpo é dada pela **POTÊNCIA** da radiação emitida por unidade de **ÁREA**.



$$I = \frac{Pot}{A} \quad \text{com} \quad [I] = \frac{W}{m^2}$$

A lei de Stefan-Boltzmann nos diz que a intensidade de radiação para um corpo qualquer é proporcional à quarta potência da temperatura:

$$I \propto T^4$$

Assim,

$$I = e \cdot \sigma \cdot T^4$$

- e : emissividade ou percentual de emissão ($0 < e < 1$)
- σ : constante de Stefan-Boltzmann.

OBSERVAÇÕES

- A unidade de σ

$$\frac{P}{A} = e\sigma T^4 \Rightarrow \sigma = \frac{P}{A.e.T^4}$$

Assim,

$$[\sigma] = \frac{[P]}{[A][T]^4} \quad (\text{sabendo que } "e" \text{ é adimensional})$$
$$\Rightarrow [\sigma] = \frac{W}{m^2 K^4}$$

Valor de σ : $s \approx 5,7 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$

- Para um corpo negro ideal: $e = 1 = 100\%$

$$I_{\text{Negro}} = \sigma \cdot T^4$$

NOTA HISTÓRICA

A lei foi descoberta de jeito experimental por Josef Stefan (1835-1893) no ano 1879 e derivada de jeito teórico no marco da termodinâmica por Ludwig Boltzmann (1844-1906) em 1884. Boltzmann supôs uma máquina térmica ideal com luz como substância de trabalho semelhante a um gás. Esta lei é a única lei da natureza que leva o nome de um físico Esloveno.

2.2. Lei de Wien (1893)

Em 1893 o físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928) descobriu uma relação simples entre a temperatura de um corpo negro e o comprimento de onda máximo da energia que ele emite. Essa relação ficou conhecida como “lei de Wien”.

Verifica-se experimentalmente que, quanto maior é a temperatura de um objeto, mais energia ele emite. Também se observa que, à medida que a temperatura do objeto aumenta, ele passa a emitir a maior parte desta radiação em energias cada vez maiores. Energia mais alta significa radiação de comprimento de onda mais curto. Todos os objetos emitem radiação em um amplo intervalo de comprimentos de onda. No entanto, existe sempre um comprimento de onda característico, representado por λ_{max} , no qual a emissão de energia é o mais forte possível.

A lei de Wien estabelece que o comprimento de onda no qual um determinado corpo irradia mais fortemente é inversamente proporcional à temperatura do corpo. Desse modo ficamos sabendo que corpos mais quentes irradiam mais fortemente em comprimentos de onda mais curtos.

O comprimento de onda do máximo da curva é dado pela equação:

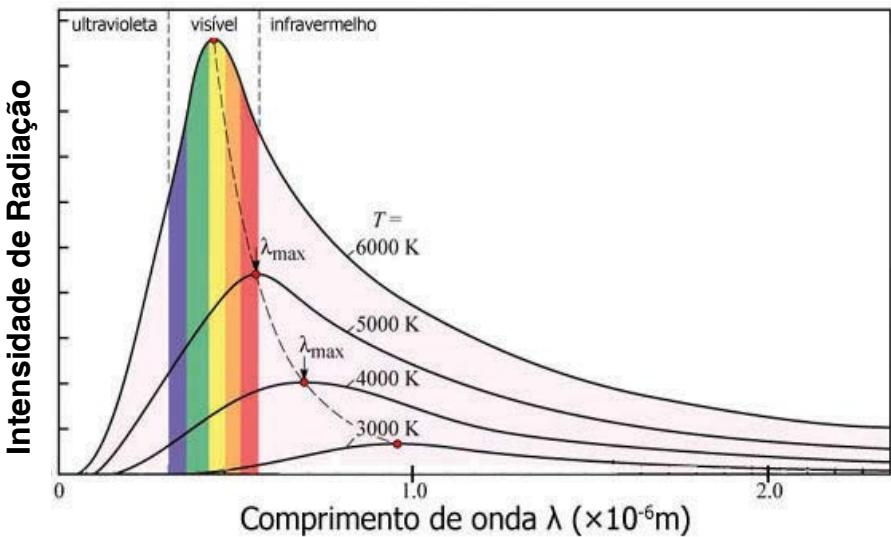
$$\lambda_{\text{Máx}} \cdot T = \text{constante} \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{m} \cdot K$$

ou

$$\lambda_{\text{Máx}} \propto \frac{1}{T}$$



Wilhelm Wien. Fonte: observatório Moonmentum.



Pela lei de Wien encontramos que um objeto muito frio, com uma temperatura de somente alguns Kelvin, emite principalmente na região de micro-ondas do espectro eletromagnético. Um objeto a temperatura ambiente, que é cerca de 295 Kelvin, emite a maior parte de sua radiação na parte infravermelha do espectro eletromagnético. Um objeto com uma temperatura de alguns milhares de Kelvin emite a maior parte de sua radiação como luz visível, ou seja, radiação eletromagnética situada na região visível do espectro eletromagnético. Por sua vez, um corpo com uma temperatura de alguns milhões de Kelvin emite a maior parte de sua radiação com comprimentos de onda de raios X.

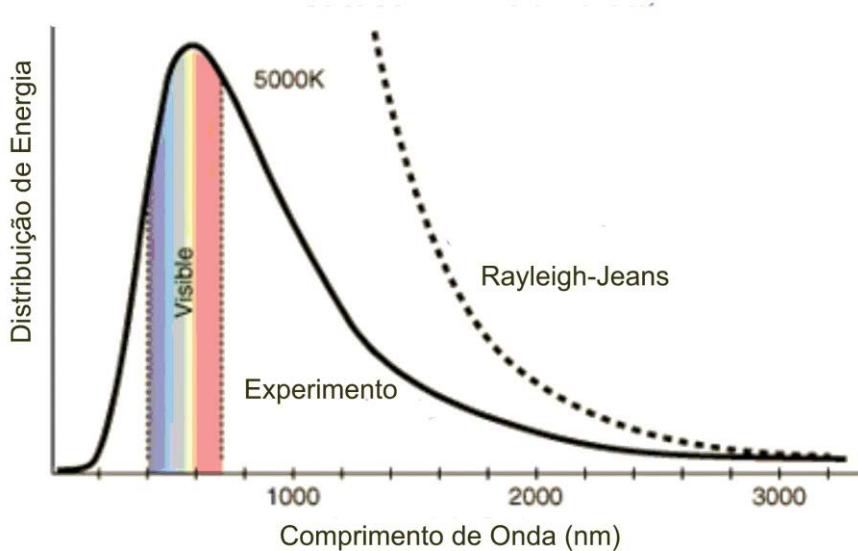
2.3. Catástrofe Ultravioleta – lei de Rayleigh-Jeans

A catástrofe, assim chamada quando ocorre uma grande desgraça ou calamidade, vem com a teoria clássica e aparentemente plausível, de que a intensidade de energia das radiações emitidas por corpos negros cresce ao passo que a frequência cresce e ao passo que o comprimento de onda diminui. Pois bem, a lei de Rayleigh-Jeans,

colocada aqui por razões ilustrativas, estabelece que, para uma temperatura(T) constante, a intensidade da radiação emitida é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda da radiação emitida.

$$I = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$

Observa-se que para comprimentos de onda maiores a teoria clássica concorda com a observação experimental, mas para comprimentos de ondas menores, tendendo à comprimentos do ultravioleta, a intensidade da radiação emitida tende para o infinito, o que não concorda com os experimentos, com os resultados bem fundamentados de Wien. Está aqui a origem do nome: **catástrofe do ultravioleta**. Veja a tradução gráfica abaixo.



Fonte: Georgia State University

EXERCÍCIO RESOLVIDO

Para medir temperaturas de corpos negros, os físicos usam uma fórmula simplificada da chamada **Lei do deslocamento de Wien**, que é dada por:

$$\lambda_{\text{máx}} \cdot T = 0,2898 \text{ cm} \cdot \text{K}$$

, onde $\lambda_{\text{máx}}$ é o valor do comprimento de onda no qual a intensidade da radiação é máxima e T é a temperatura absoluta.

Em 1965, radiação de micro-ondas, com $\lambda_{\text{máx}} = 0,1070 \text{ cm}$, vinha de todas as direções do espaço, foram detectadas. Essa radiação, batizada pelo nome de radiação de fundo, é interpretada como um resíduo da grande explosão do universo (teoria do Big-Bang), que teria acontecido a cerca de 15 bilhões de anos, quando o universo começou rapidamente a se expandir e ao mesmo tempo esfriar. Qual o valor da temperatura correspondente a este comprimento de onda? Se calculares corretamente esta temperatura, estarás a calcular a temperatura atual do universo quando se admite que esta radiação seja do mesmo tipo da emitida por uma cavidade (corpo negro).

SOLUÇÃO

$$\lambda_{\text{máx}} \cdot T = 0,2898 \text{ cm} \cdot \text{K}$$

$$0,1070 \text{ cm} \cdot T = 0,2898 \text{ cm} \cdot \text{K}$$

$$\Rightarrow T \approx 2,71 \text{ K} \quad (\text{muito baixa!})$$

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM

Usando a lei de Stefan-Boltzmann, encontre o raio de uma estrela comparando-a com o Sol, uma vez que os dados referentes ao Sol são bem conhecidos:

I) Temperatura do Sol: $T_s = 5.800\text{K}$

II) Raio do Sol: $R_s = 7.10^8\text{m}$.

Suponha que medimos a potência irradiada por uma estrela e obtemos experimentalmente a seguinte relação entre as potências $P_{\text{Estrela}} = 9P_{\text{Sol}}$. Para estimar o tamanho da estrela use a seguinte temperatura da mesma: 2.900K. Esta temperatura foi obtida analisando o espectro de radiação da estrela e interpretando-o como o de um corpo negro.

SOLUÇÃO

2.4. Quantização da energia. Teoria de Planck. (1900)

O físico alemão Max Planck (1858-1947) anunciou, em 1900, que, fazendo algumas suposições estranhas, podia deduzir uma distribuição de energia que concordava com os experimentos, uma distribuição de energia emitida por corpos negros sem catástrofe. Entretanto era uma forma quase que mediúnica de traduzir a verdade tão esperada: a quantização da energia das radiações eletromagnéticas emitidas por corpos negros.

Max Planck postulou que a energia contida nas radiações eletromagnéticas provenientes de um átomo vibrante não é emitida de modo contínuo, mas em pequenos “pacotes” que ele denominou de ***quantum*** de energia. Estes pequenos pacotes serão chamados de **fótons**.

A energia de um *quantum*/fóton só depende da frequência da radiação:

$$E_{\text{Quantum}} = h \cdot f$$

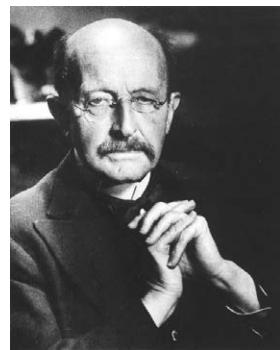
h: constante de Planck

A radiação transportava um conjunto de *quantuns* cujo plural é *quanta*. Assim, a energia total da radiação era dada por **n** pacotes de *quantum*, logo dada por:

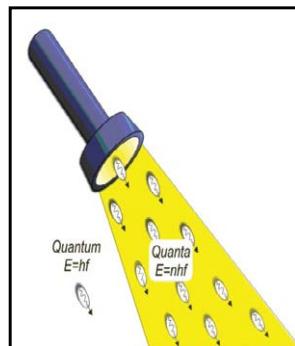
$$E_{\text{Total(QUANTA)}} = n \cdot (h \cdot f)$$

A quantização está no fato de que a energia total deve ser múltipla da energia de um *quantum*, daí: **n=1,2,3,4,5,6,...**

Obs: No S.I. a constante de Planck é dada por **$h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$** .



Max Planck. Fonte: Infoescola.



ATENÇÃO

O elétron-volt (eV)

Como a energia de um fóton é pequena em relação às unidades de energia usuais é comum utilizarmos o elétron-volt como unidade de energia neste caso. Sua relação com o joule é dada por:

$$1 \text{ e.V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

NOTA

Quando Planck propôs sua teoria, nem ele acreditava que o quantum fosse algo real, chegando a confessar que concebeu esta ideia em um “ato de desespero”.

Referindo-se à radiação de um corpo negro, escreveu:

“ [...] era uma hipótese puramente formal, e não lhe dei muita atenção, adotando-a porque era preciso, a qualquer preço, encontrar uma explicação teórica. ”

O brilhantismo de Planck nunca foi ofuscado e mesmo Albert Einstein que, a posteriori, comprova de fato suas ideias e diz sobre ele:

“ Um homem a quem foi dada a oportunidade de abençoar o mundo com uma grande ideia criativa não precisa do louvor da posteridade. Sua própria façanha já lhe conferiu uma dádiva maior! ”

EXERCÍCIO RESOLVIDO

Uma gota de água de volume igual a 0,20 mL é aquecida, no ar, por radiação de comprimento de onda igual a 7500 Å, absorvendo $1,0 \cdot 10^{18}$ fótons por segundo. Calcule o intervalo de tempo necessário para que a temperatura dessa gota sofra uma elevação de 1,0 K.

- calor específico da água = $4,2 \cdot 10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$;
- densidade da água = $1,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$;
- constante de Planck = $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$;
- $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

SOLUÇÃO

A potência de aquecimento da gota é igual à potência da radiação incidente. Assim,

$$\text{Pot} = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{\text{ERADIAÇÃO}}{\Delta t'} \Rightarrow \frac{mc\Delta T}{\Delta t} = \frac{nhf}{\Delta t'}$$

Como $m=d \cdot V$ e $f=c/\lambda$, temos:

$$\frac{d \cdot V_{OL} \cdot c \cdot \Delta t}{\Delta t} = \frac{n}{\Delta t'} \cdot h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

O intervalo de tempo (Δt) necessário para que a temperatura dessa gota sofra uma elevação de 1,0 K é:

$$\Delta t = \frac{d \cdot V_{OL} \cdot c \cdot \Delta T}{\frac{n}{\Delta t'} \cdot h \cdot \frac{c}{\lambda}}$$

Com os valores indicados a seguir em unidades compatíveis,

- | | |
|---|--|
| - $d = 10^3 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ kg/L}$ | - $V_{OL} = 0,2 \text{ mL} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ L}$ |
| - $c = 4,2 \cdot 10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ | - $\Delta T = 1 \text{ K} = 1^\circ\text{C}$ |
| - $n/\Delta t' = 10^{18} \text{ s}^{-1}$ | - $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ |
| - $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ | - $\lambda = 7500 \text{ \AA} = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ |

Teremos:

$$\Delta t = \frac{1 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 4,2 \cdot 10^3 \cdot 1}{10^{18} \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{0,75 \cdot 10^{-6}}} \Rightarrow \Delta t \approx 3,2 \text{ s}$$

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM

Quanto ao número de fótons existentes em 1 joule de luz verde, 1 joule de luz vermelha e 1 joule de luz azul, podemos afirmar, corretamente, que:

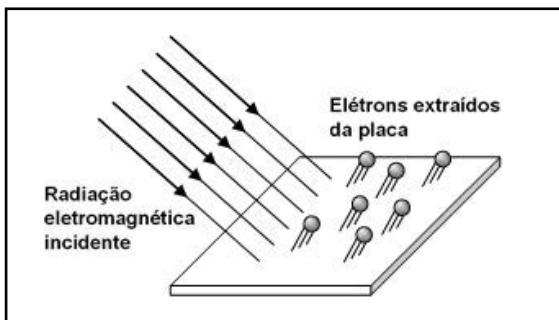
- a)** Existem mais fótons em 1 joule de luz verde que em 1 joule de luz vermelha e existem mais fótons em 1 joule de luz verde que em 1 joule de luz azul.
- b)** Existem mais fótons em 1 joule de luz vermelha que em 1 joule de luz verde e existem mais fótons em 1 joule de luz verde que em 1 joule de luz azul.
- c)** Existem mais fótons em 1 joule de luz azul que em 1 joule de luz verde e existem mais fótons em 1 joule de luz vermelha que em 1 joule de luz azul.
- d)** Existem mais fótons em 1 joule de luz verde que em 1 joule de luz azul e existem mais fótons em 1 joule de luz verde que em 1 joule de luz vermelha.
- e)** Existem mais fótons em um joule de luz vermelha que em 1 joule de luz azul e existem mais fótons em 1 joule de luz azul que em 1 joule de luz verde.

SOLUÇÃO

3. Efeito fotoelétrico

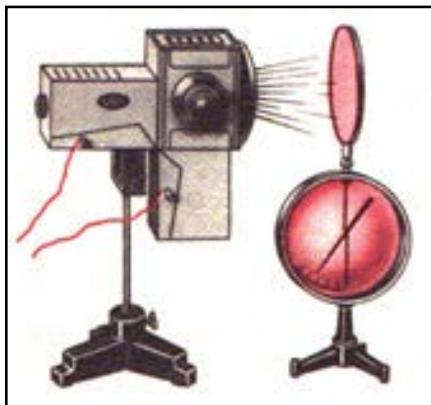
Um importante passo no desenvolvimento das concepções sobre a natureza da luz foi dado no estudo de um fenômeno muito interessante, descoberto por Heinrich Hertz em 1887. Este fenômeno recebeu o nome de efeito fotoelétrico.

O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons pela matéria sob a ação da luz.



Obs.: os elétrons extraídos da placa devido à incidência de luz são chamados de fotoelétrons.

Para se observar o efeito fotoelétrico, é conveniente utilizar um eletroscópio de folhas (figura ao lado). No eletroscópio monta-se uma lâmina de zinco. Se a lâmina estiver carregada positivamente, a sua iluminação, por exemplo, com a ajuda de um arco voltaico, não influi na velocidade de descarga do eletroscópio. No entanto, se a lâmina estiver carregada negativamente, o feixe de luz do arco descarrega o eletroscópio com grande rapidez.



Fonte: site fisica.net¹¹.

Este fato só pode ser explicado da seguinte maneira:

- I) A luz provoca a emissão de elétrons pela superfície da lâmina.
- II) Quando a lâmina está carregada negativamente, repele os elétrons e o eletroscópio descarrega-se.
- III) Quando está carregada positivamente, os elétrons emitidos sob a ação da luz são atraídos e voltam ao eletroscópio. É por esta razão que a carga do eletroscópio não varia.

Os resultados experimentais do efeito fotoelétrico não puderam ser explicados pela teoria eletromagnética de Maxwell, por exemplo:

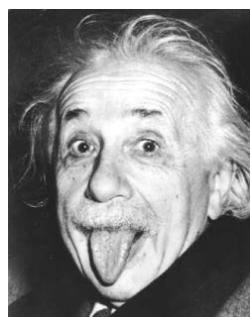
- As energias dos fotoelétrons não dependem da intensidade da radiação incidente, o fato é que, quanto maior for a intensidade da radiação incidente maior é o número de fotoelétrons emitidos.
- As energias dos fotoelétrons emitidos dependem da frequência da radiação incidente sobre o metal. Se a frequência não for suficientemente grande o efeito fotoelétrico não ocorre.

Os resultados acima são conhecidos como **leis de Lenard**.

3.1. Explicando o efeito fotoelétrico. Teoria de Einstein (1905)

O ano de 1905 é considerado o “*annus mirabilis*” da vida científica de Albert Einstein (1879-1955). Ao longo deste ano ele publicou cinco artigos, três dos quais revolucionaram a física. Entre estes se encontra sua abordagem ao problema do efeito fotoelétrico.

Einstein tem contribuições importantes em quase todas as áreas da física, mas, sem



Albert Einstein. Fonte: site Saturnália.

qualquer dúvida, suas contribuições mais impactantes foram aquelas relacionadas com a teoria da relatividade restrita e com a teoria da relatividade geral. No entanto, ao escolher o Prêmio Nobel de 1921, o Comitê Nobel para Física da Academia Real de Ciências da Suécia deu mais importância ao trabalho sobre o efeito fotoelétrico. Literalmente, o prêmio foi concedido a Albert Einstein com a seguinte justificativa: “*for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect*”. Isto é, pelas suas contribuições à Física Teórica, mas especialmente pela sua descoberta da lei do efeito fotoelétrico.

Einstein estendeu as ideias de Planck às radiações eletromagnéticas, considerando que a energia dessas radiações também é quantizada. Assim, uma radiação eletromagnética passou a ser tratada como um feixe de *fôtons* propagando-se no espaço. A explicação de Einstein será vista em etapas abaixo.

3.1.1. Função Trabalho de Um Metal (W)

Einstein percebeu que cada elétron é preso ao metal por uma energia de ligação W , denominada função trabalho e esta necessita ser vencida se quisermos arrancar o elétron do metal. Desse modo o elétron apenas é retirado se energia do fóton incidente for maior ou igual a função trabalho. Como a energia radiante depende da frequência, então existiria uma frequência mínima para que ocorresse o efeito fotoelétrico. Existir frequência mínima significa dizer que não é qualquer radiação que faz com que o fenômeno ocorra, pois a radiação é caracterizada pela sua frequência.

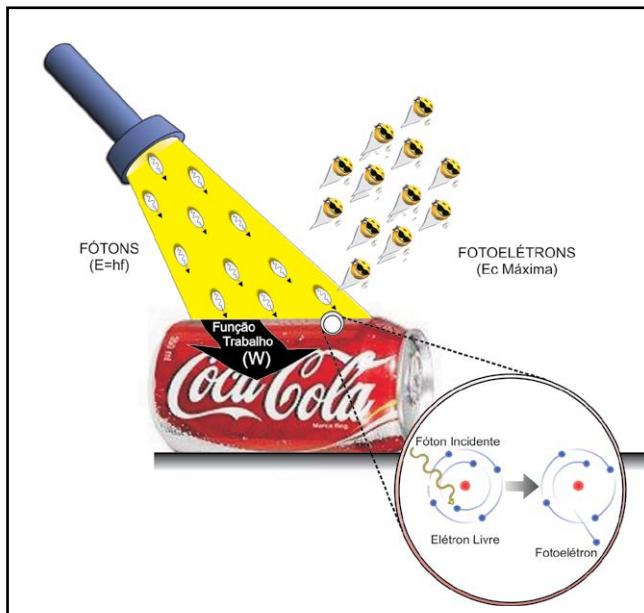
Para entender o efeito é necessário considerar a luz com caráter corpuscular, entendê-la como partícula, e não com caráter ondulatório como se afirmava no modelo clássico.

Veja uma tabela com alguns metais e suas respectivas funções trabalho.

Elemento	W (eV)	Elemento	W (eV)
Alumínio	4,08	Magnésio	3,68
Berílio	5	Mercúrio	4,5
Cádmio	4,07	Níquel	5,01
Cálcio	2,9	Nióbio	4,3
Carbono	4,81	Potássio	2,3
Césio	2,1	Platina	6,35
Cobalto	5	Selênio	5,11
Cobre	4,7	Prata	4,73
Ouro	5,1	Sódio	2,28
Ferro	4,5	Urânio	3,6
Tório	3,4	Zinco	4,3

3.1.2. Energia cinética máxima de emissão de um fotoelétron

É a maior energia com a qual um fotoelétron pode ser emitido a partir de um fóton incidente. Como uma parte, ou toda a energia do fóton é utilizada para arrancar um elétron livre do material, a diferença entre a energia do fóton incidente e da função trabalho resulta na energia cinética do fotoelétron. A energia cinética é máxima, pois a função trabalho é menor na superfície do que no interior do metal. Logo se o elétron advém da superfície, e as funções trabalho catalogadas são para superfície, a energia é maior do que se ele advém de camadas mais internas. Logo, a energia cinética máxima dos elétrons emitidos, é dada pela diferença entre a energia do fóton incidente e a função trabalho para elétrons da superfície. Veja a seguir.



$$E_{c_{Máx}} = E_{Fóton} - W$$

ou

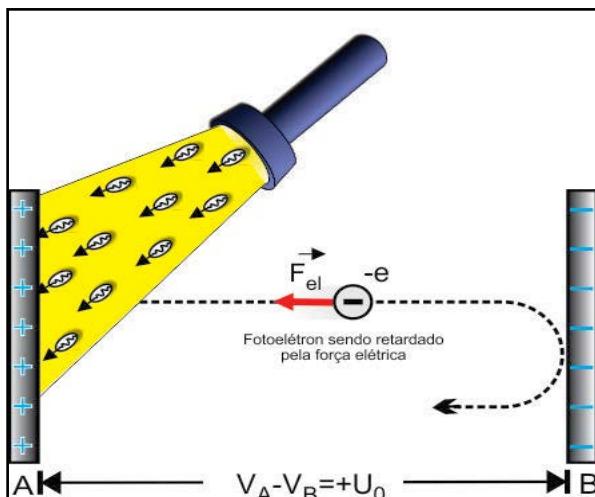
$$E_{c_{Máx}} = h.f - W$$

OBSERVAÇÕES

- O fóton transfere toda sua energia para o elétron;
- O elétron só será retirado se o fóton possuir energia superior ou igual a função trabalho;
- Se a energia do fóton for igual à função trabalho, o elétron é retirado, mas com energia cinética igual à zero.

3.1.3. Potencial de corte ou de frenamento

De maneira simplificada, considere dois eletrodos ligados a uma bateria que fornece tensão U_0 . Uma certa quantidade de luz é incidida sobre o eletrodo ligado ao polo positivo. Assim que os fotoelétrons saírem, serão freados pela ação da força elétrica, conforme ilustra o esquema indicado acima.



Para que os elétrons não cheguem à placa negativa é preciso que sua energia cinética seja nula na iminência de tocá-la. Assim, pelo teorema da energia cinética, teremos:

$$W_{FR} = Ec_F - Ec_0 \text{ com } \begin{cases} Ec_0 = Ec_{Máx} \\ Ec_F = 0 \\ W_{FR} = W_{F_{el}} = -eU_0 \end{cases}$$

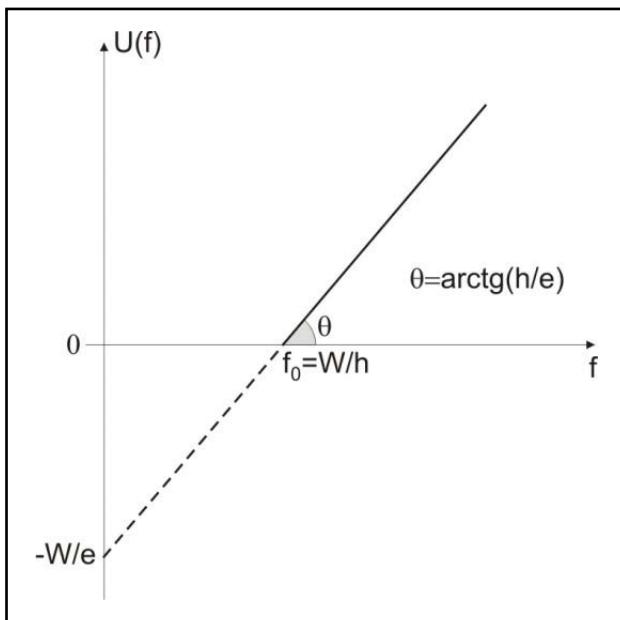
Assim

$$Ec_{Máx} = m \frac{V_{Máx}^2}{2} = eU_0$$

Ou ainda,

$$eU_0 = h \cdot f - W$$

Obs._i: Gráfico U_0 x f



Note que o potencial de corte só depende da frequência dos fótons incidentes e varia segundo a equação abaixo:

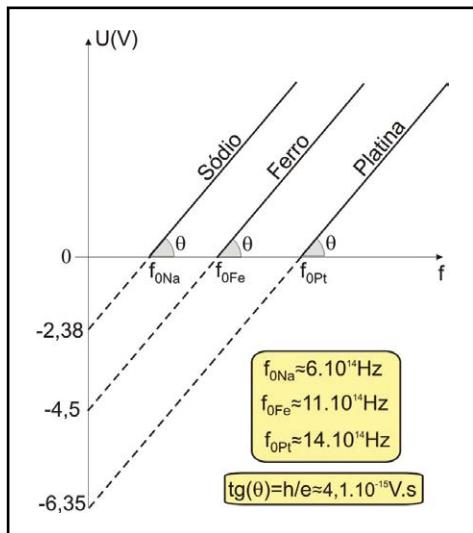
$$U_{(f)} = \frac{h}{e} \cdot f - \frac{W}{e}$$

Trata-se de uma função linear do tipo $f(x)=ax-b$ e tem declividade constante dada por h/e . Veja a figura a seguir.

Note que a declividade independe do tipo de radiação incidente ou da função trabalho do material em que ela incide.

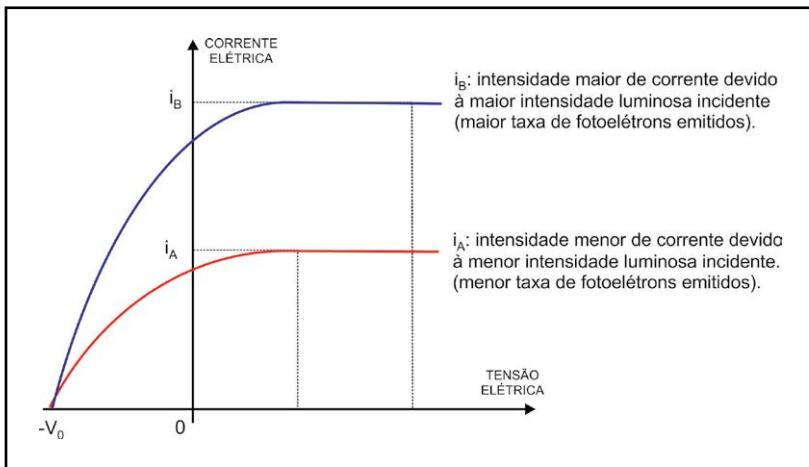
Outro detalhe importante é que o efeito fotoelétrico só ocorre se a frequência da radiação incidente for maior ou igual à frequência de corte (f_0) e, esta sim, depende da função trabalho do material em

que se incide a radiação. Como exemplo observe na tabela do tópico “3.1.1.” que as funções trabalho para o sódio, ferro e platina seguem a seguinte ordem: $W_{Na} < W_{Fe} < W_{Pt}$. Assim, independente da frequência da radiação incidente, podemos representar o gráfico $U \times f$ da seguinte forma para estes materiais:



Obs.₂: Gráfico $i \times U_0$

Considerando que $U_0=0$ na figura inicial da seção “3.1.3.”, todos os fotoelétrons chegariam à placa oposta e um pequeno aumento de tensão acima de zero geraria uma corrente constante (chamada de corrente de saturação). O potencial de corte representa uma tensão $U_0 < 0$ mínima que freia os elétrons de tal forma que a corrente se anula. Veja a figura abaixo que ilustra a situação descrita e sugere as principais características.



Nesta figura estamos considerando que quanto maior for a intensidade da radiação incidente, maior é a quantidade de fotoelétrons emitidos na unidade de tempo (taxa de emissão) e, consequentemente, maior é a corrente de saturação ($i_B > i_A$). Entretanto, o potencial de corte do material é permanece inalterado, uma vez que as frequências das fontes são iguais, as intensidades luminosas e que são diferentes.

Em resumo, as características do efeito fotoelétrico são as seguintes:

- O número de elétrons arrancados é diretamente proporcional à intensidade da radiação eletromagnética incidente.
- O potencial de corte é o mesmo qualquer que seja a intensidade da radiação eletromagnética incidente.
- A energia dos elétrons arrancados depende da frequência e não da intensidade da radiação eletromagnética incidente.
- Não existe retardos entre o instante em que a radiação eletromagnética atinge a superfície da placa e o instante em que aparecem os elétrons arrancados. Esse comportamento

se justifica pelo modelo corpuscular da luz, proposto por Einstein, segundo o qual a radiação é formada por pequenos pacotes de energia (fótons) que, ao colidirem diretamente com um dos elétrons da superfície, transmite toda sua energia para o elétron, arrancando-o, assim, da superfície.

- O efeito fotoelétrico só ocorre se a energia da radiação incidente for superior ou igual à função trabalho do material.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

Sobre um circuito de efeito fotoelétrico são incididos radiações de duas frequências diferentes, de comprimentos λ_1 e λ_2 (maiores que a frequência de corte do material). Os elétrons liberados por cada incidência têm velocidades máximas V_1 e V_2 tais que a razão entre V_1 e V_2 é dada por k . Determine o valor da função trabalho do material usado em função de k , h , c (velocidade da luz), λ_1 e λ_2 .

SOLUÇÃO

Observando que $k = V_1/V_2$ e que a energia cinética máxima dos fotoelétrons é:

$$E_c = hf - W \Rightarrow m \frac{V^2}{2} = h \frac{c}{\lambda} - W$$

, fazendo a razão entre as energias cinéticas dos dois elétrons, teremos:

$$\frac{\frac{m V_1^2}{2}}{\frac{m V_2^2}{2}} = \frac{h \frac{c}{\lambda_1} - W}{h \frac{c}{\lambda_2} - W} \Rightarrow \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 = \frac{h \frac{c}{\lambda_1} - W}{h \frac{c}{\lambda_2} - W} \Rightarrow k^2 = \frac{h \frac{c}{\lambda_1} - W}{h \frac{c}{\lambda_2} - W}$$

(CONTINUA)

SOLUÇÃO (CONTINUAÇÃO)

Desenvolvendo,

$$k^2 \left(h \frac{c}{\lambda_2} - W \right) = h \frac{c}{\lambda_1} - W \Rightarrow \frac{k^2 hc}{\lambda_2} - k^2 W = h \frac{c}{\lambda_1} - W$$

$$hc \left(\frac{k^2}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) = W(k^2 - 1)$$

Concluindo,

$$W = \frac{hc}{(k^2 - 1)} \left(\frac{k^2}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)$$

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM 1

A frequência mínima necessária para produzir o efeito fotoelétrico numa superfície de sódio é de $f_c = 4,4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. Se a constante de Planck vale $h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$:

- qual a função trabalho do sódio?
- quantos elétrons são emitidos quando um feixe de $5 \cdot 10^6$ fótons com frequência de $3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ incide sobre a superfície do sódio?
- se incidir um fóton com frequência igual ao dobro da frequência de corte do metal, será possível arrancar dois elétrons? Explique.

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM 2

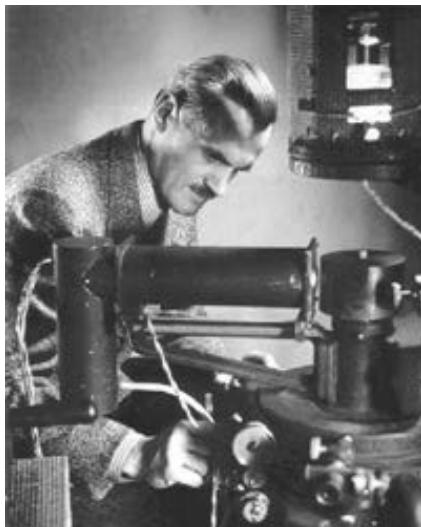
Um feixe de radiação ($f = 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$) de intensidade 150 mw/m^2 incide sobre a superfície polida de um metal que passa a emitir fotoelétrons com energia cinética $K = 0,6 \text{ eV}$. Duplicando-se apenas a frequência da radiação incidente, pode-se afirmar que ($h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$):

- a)** o metal passará a emitir fotoelétrons com energia cinética $K=1,2$ eV.
- b)** a energia cinética dos fotoelétrrons emitidos não se altera, pois energia cinética só depende da massa e da velocidade do elétron
- c)** o metal passará a emitir fotoelétrrons com energia cinética $K=2,4$ eV.
- d)** o metal passará a emitir fotoelétrrons com energia cinética $K=2,7$ eV.
- e)** a função trabalho desse metal vale 2,0eV.

SOLUÇÃO

4. Efeito Compton (1923)

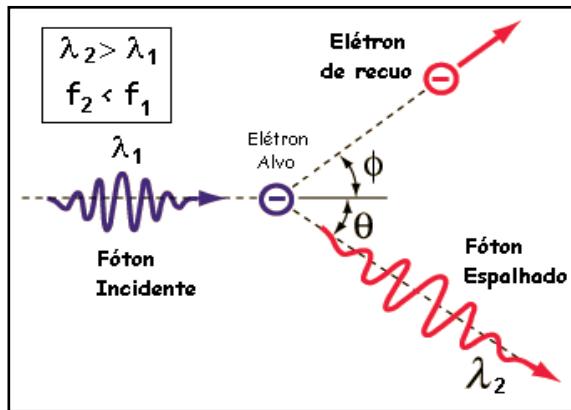
Seguido das descobertas de Planck e Einstein, foram feitos muitos outros experimentos, que só poderiam ser explicados usando o comportamento corpuscular (fótons) da luz. Um desses experimentos é o efeito Compton proposto por Arthur Holly Compton (1892-1962) em 1923 (Nobel em 1927). Compton estudou o espalhamento dos raios X por elétrons. Em seus experimentos ele mostrou que a luz espalhada tinha uma frequência mais baixa do que a incidente, indicando com isto uma perda de energia no processo de espalhamento. Este fenômeno não pôde ser explicado usando a luz como um fenômeno ondulatório senão a luz espalhada deveria ter a mesma frequência da incidente. Compton considerou essas ondas irradiadas, espalhadas como fótons espalhados e mostrou que se esse processo fosse dado por uma colisão entre um fóton e um elétron, o elétron recuaría, absorvendo energia. O fóton espalhado teria menos energia e, então, frequência mais baixa e comprimento de onda maior do que o fóton incidente ($E_{\text{fóton}} \propto f$ e $f \propto 1/\lambda$)



Arthur Holly Compton. Fonte: High Energy Astrophysics Science Archive Research Center.

Efeito Compton ou Espalhamento de Compton, é a diminuição de energia (aumento de comprimento de onda ou diminuição da frequência) de um fóton de alta energia (raio-X ou de raio gama), quando ele interage com a matéria.

Compton explicou este fenômeno ao estudar a colisão de elétrons com fótons, aplicando as leis de conservação de energia e momento. Veja a figura a seguir.



O resultado de Compton mostrou que a variação do comprimento de onda do fóton como função do ângulo de espalhamento (θ) é dada por:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_e \cdot c} (1 - \cos \theta)$$

ATENÇÃO

- A variação do comprimento de onda é independente do comprimento de onda original (vide explicação detalhada no exercício resolvido);
- a velocidade de propagação do fóton espalhado é igual à velocidade de propagação do fóton incidente;

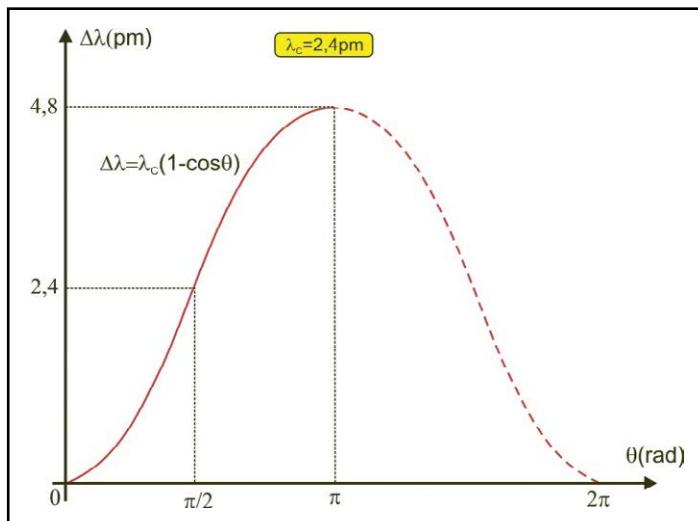
(CONTINUA)

ATENÇÃO (CONTINUAÇÃO)

- A grandeza (constante) $\frac{h}{m_E \cdot c}$ tem dimensão de comprimento, chamada *comprimento de onda Compton do elétron*. Seu valor é:

$$\lambda_{\text{Compton}} = \frac{h}{m_E \cdot c} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 2,43 \text{ pm}$$

- A variação do comprimento de onda é função do ângulo de espalhamento θ . O valor mínimo é para $\theta=0^\circ$ ($\cos\theta=1$ e $\Delta\lambda=0$) e o valor máximo é para $\theta=180^\circ$ ($\cos\theta=-1$ e $\Delta\lambda=2\lambda_{\text{Compton}}$). Vide gráfico abaixo.



- O efeito Compton só é observável com radiações de alta frequência e não com a luz visível.

NOTA

Para a demonstração que se segue é importante não esquecer que os fótons têm massa de repouso nula, mas apresentam quantidade de movimento. No capítulo de relatividade mostramos que a energia do fóton se relaciona com a quantidade de movimento da seguinte forma:

$$E_{\text{fóton}} = Q \cdot c$$

Já na parte que abrange o efeito fotoelétrico, tínhamos:

$$E_{\text{fóton}} = h \cdot f = h \cdot (c/\lambda)$$

Assim, podemos relacionar o momento do fóton e o seu comprimento de onda como se segue:

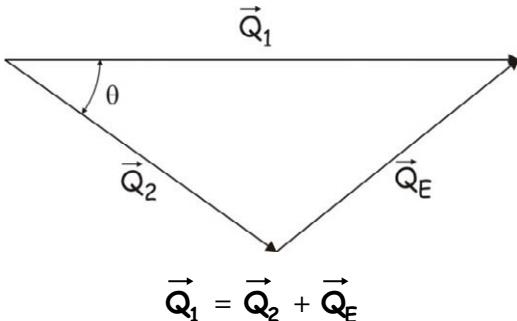
$$E_{\text{Fóton}} = h \frac{c}{\lambda} = Q \cdot c$$

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

4.1. Demonstração do Espalhamento Compton

- **Conservação da quantidade de movimento**

A quantidade de movimento antes da colisão entre o fóton e o elétron é igual à quantidade de movimento depois da mesma, ou seja, a soma vetorial da quantidade de movimento do fóton depois da colisão (\vec{Q}_2) com a quantidade de movimento de recuo do elétron (\vec{Q}_E) é igual à quantidade de movimento do fóton antes da colisão (\vec{Q}_1). Veja a seguir:



Pela lei dos cossenos:

$$Q_E^2 = Q_1^2 + Q_2^2 - 2Q_1 Q_2 \cos \theta \quad (\text{I})$$

- **Conservação da energia**

A energia total antes da colisão é dada pela energia do fóton incidente e pela energia total associada ao elétron alvo no átomo. Esta energia é a soma da energia de repouso com a energia cinética, entretanto, como o efeito só é observado com a incidência de fótons de alta energia (raio X, cuja energia é da ordem de $10\text{keV}=10^3\text{eV}$), a energia cinética dos elétrons (da ordem de eV) pode ser numericamente desprezada, considerando-o como um elétron em repouso.

A energia do elétron depois da colisão pode ser uma fração significativa de sua energia de repouso ($E_0=m_ec^2$) (relatividade!!!) assim a energia total do sistema depois da colisão, será dada pela energia total do elétron (sua energia cinética do elétron e sua energia de repouso) e a energia do fóton espalhado.

Vejamos a conservação lembrando-nos de conceitos de energia relativísticos. Considere a seguinte legenda:

- E_1 : energia do fóton incidente
- E_2 : energia do fóton espalhado
- E_0 : energia de repouso do elétron alvo
- $E_{\text{Elétron}}$: energia total do elétron após a colisão

$$\begin{aligned}E_{\text{Antes}} &= E_{\text{Depois}} \\E_1 + E_0 &= E_2 + E_{\text{Elétron}} \\E_1 - E_2 + E_0 &= E_{\text{Elétron}}\end{aligned}$$

Lembrando da energia de um fóton ($Q \cdot c$) e da energia total relativística ($\sqrt{E^2 + Q^2 \cdot c^2}$) do elétron, teremos:

$$Q_1 \cdot c - Q_2 \cdot c + E_0 = \sqrt{E_0^2 + Q_E^2 \cdot c^2}$$

Elevando ao quadrado a expressão acima e com “um pouco” de esforço algébrico, chegamos ao seguinte resultado:

$$Q_E^2 = Q_1^2 + Q_2^2 - 2Q_1Q_2 + \frac{2E_0}{c} (Q_1 - Q_2) \quad (\text{II})$$

Igualando as equações (I) e (II), obtidas das conservações da quantidade de movimento e da energia, teremos:

$$\begin{aligned}Q_1^2 + Q_2^2 - 2Q_1Q_2 + \frac{2E_0}{c} (Q_1 - Q_2) &= Q_1^2 + Q_2^2 - 2Q_1Q_2 \cos \theta \\ \frac{2E_0}{c} (Q_1 - Q_2) &= 2Q_1Q_2 - 2Q_1Q_2 \cos \theta \\ \frac{2E_0}{c} (Q_1 - Q_2) &= 2Q_1Q_2(1 - \cos \theta)\end{aligned}$$

Substituindo a quantidade de movimento do fóton \mathbf{Q} por \mathbf{h}/λ e a energia de repouso do elétron E_0 por $m_E c^2$, teremos:

$$\begin{aligned}\frac{2m_E c^2}{c} \left(\frac{\mathbf{h}}{\lambda_1} - \frac{\mathbf{h}}{\lambda_2} \right) &= 2 \left(\frac{\mathbf{h}}{\lambda_1} \cdot \frac{\mathbf{h}}{\lambda_2} \right) (1 - \cos \theta) \\ \frac{2m_E \cdot c \cdot h}{\lambda_1 \lambda_2} (\lambda_2 - \lambda_1) &= \frac{2 \cdot h^2}{\lambda_1 \lambda_2} (1 - \cos \theta)\end{aligned}$$

Finalmente,

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_E \cdot c} (1 - \cos \theta) \quad (\text{C.Q.D.})$$

4.2. Aplicação do Efeito Compton

O Efeito Compton é o responsável pelo chamado *pulso eletromagnético* (PEM) provocado pelas explosões termonucleares na alta atmosfera. Os raios X e os raios gama que são emitidos nessas explosões efetuam colisões Compton com os elétrons na atmosfera superior e os deslocam energeticamente para a frente. Esse súbito aparecimento de uma grande carga elétrica acelerada provoca o surgimento de campos eletromagnéticos intensos que podem causar grandes perturbações nos circuitos elétricos sem blindagem, na superfície da Terra. O efeito foi observado pela primeira vez quando os circuitos de potência e de comunicações no Havaí sofreram um colapso durante um teste de explosão nuclear na atmosfera realizado sobre o oceano Pacífico, a muitos quilômetros de distância.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

O espalhamento dos raios X provoca o aparecimento de radiações secundárias indesejáveis. Esses raios são menos energéticos e se propagam aleatoriamente. Quando atingem a película radiográfica, produz na chapa revelada um aspecto brumoso conhecido como véu ou fog.



- a)** Identifique o fenômeno responsável por esse espalhamento.
- b)** Esse fenômeno é explicado pelo caráter ondulatório ou corpuscular da luz?
- c)** O que ocorre com o comprimento de onda do fóton espalhado? A variação do comprimento de onda depende da frequência da radiação incidente?

- d) O efeito Compton é observado para radiações de pequenas frequências, como a luz visível? Justifique.
- e) Se o comprimento de onda Compton é de aproximadamente 2,4pm ($\frac{h}{m_e c} = \lambda_{\text{Compton}} \approx 2,4 \text{ pm}$), o fóton é espalhado sob ângulo θ , tal que $\theta = \arccos(-0,25)$ e o comprimento de onda do fóton/radiação incidente é de 5pm, determine o comprimento de onda do fóton espalhado.
- f) Determine, aproximadamente, a energia adquirida pelo elétron alvo em eV. Considere os valores anteriores, a constante de Planck $h \approx 4 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$ e a velocidade da luz $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

SOLUÇÃO

- a) Trata-se do efeito Compton, onde os fótons espalhados “revelam” o aspecto brumoso citado.
- b) Corpuscular, pois o fóton interage com os elétrons se comportando como uma partícula e colidindo com eles.
- c) O comprimento de onda aumenta, a frequência diminui e a velocidade não se altera pois o meio é o mesmo. Isto justifica uma diminuição da energia do fóton espalhado. A variação do comprimento de onda só depende do ângulo de espalhamento: $\Delta\lambda(\theta) = \lambda_c (1 - \cos\theta)$.
- d) Não! As razões são basicamente duas:
I) experimentalmente, o que torna o efeito observável, é que o desvio fracional, dado por $\Delta\lambda/\lambda_0$, onde λ_0 é o comprimento de onda associado ao fóton incidente, torna-se próximo de zero quando o comprimento λ_0 torna-se muito grande ($\Delta\lambda \ll \lambda_0$), ou seja quando o comprimento de onda desloca-se para o visível. Já para os raios X, de comprimento de onda muito pequeno ($\Delta\lambda/\lambda_0$ é apreciável) o efeito é observável;

(CONTINUA)

SOLUÇÃO (CONTINUAÇÃO)

II) quando a equação do efeito Compton foi demonstrada, foi desprezada a energia cinética do elétron alvo (admitindo somente a energia de repouso: m_0c^2) frente a energia do fóton incidente (raio X). Isto só ocorre pois estamos tratando de fótons de alta energia. Esta aproximação certamente não é válida quando usamos a luz visível, pois a energia dos fótons se reduz e se aproxima dessa energia cinética. Teríamos assim outro resultado mostrando que o efeito não ocorre para fótons associados a radiações de baixa energia, a luz visível!

$$\begin{aligned}\lambda_f - \lambda_0 &= \lambda_c (1 - \cos\theta) \\ e) \Rightarrow \lambda_f - 5 &= 2,4[1 - (-0,25)] \\ \Leftrightarrow \lambda_f &= 8 \text{ pm}\end{aligned}$$

f) Conservando a energia total do sistema, antes e depois da colisão, temos:

$$\begin{aligned}E_0 + E_{\text{Fóton 1}} &= (E_0 + E_c) + E_{\text{Fóton 2}} \\ E_c &= E_{\text{Fóton 1}} - E_{\text{Fóton 2}} \\ E_c &= hf_1 - hf_2 \\ Ec &= \frac{hc}{\lambda_1} - \frac{hc}{\lambda_2} \Rightarrow Ec = hc \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)\end{aligned}$$

Com os valores em unidades compatíveis, temos:

$$Ec = 4 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8 \left(\frac{1}{5 \cdot 10^{-12}} - \frac{1}{8 \cdot 10^{-12}} \right)$$

Assim,

$$Ec = 9.104 \text{ eV}$$

→ Este resultado nos mostra que a energia CINÉTICA do elétron de recuo é dada pela diferença entre as energias do fóton incidente e espalhado... e novamente fez-se a conservação!

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM

Fótoms com o comprimento de onda de 2,4pm incidem sobre um alvo que contém elétrons livres, (a) Achar o comprimento de onda de um fóton que for espalhado num ângulo de 60° em relação à direção de incidência, (b) Fazer o mesmo cálculo quando o ângulo de espalhamento for 120° . Considere o comprimento de onda Compton igual a 2,4pm.

SOLUÇÃO

5. Dualidade e Complementaridade (1924)

O passo seguinte foi dado por Louis de Broglie. Se a luz, que tinha sido considerada por décadas como uma onda podia também ser tratada como uma partícula (os fótoms de Einstein), de Broglie supôs que outras partículas também poderiam ser tratadas como ondas!

De Broglie propôs que todos os corpos, com momento linear (quantidade de movimento) \mathbf{Q} teria um comprimento de onda λ associado, dado pela fórmula:



Louis de Broglie. Fonte: site Nautilus.

$$\mathbf{Q} = \frac{\mathbf{h}}{\lambda}$$

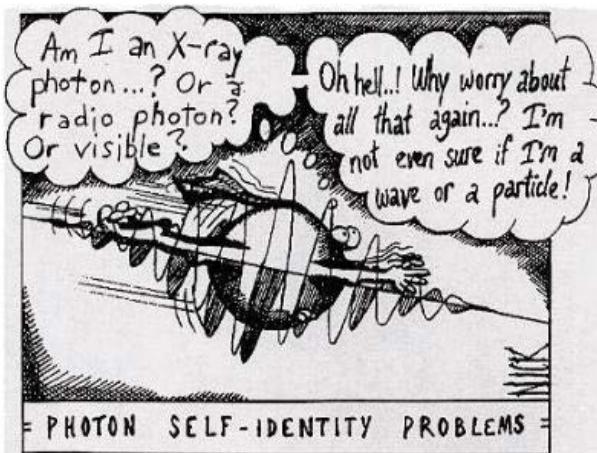
Este resultado pode ser encontrado lembrando que pelas equações da relatividade, na relação entre energia e quantidade de movimento, para um fóton teríamos que $E_{\text{Fóton}} = Q \cdot c$ e segundo a teoria da quantização de Planck, $E_{\text{Fóton}} = hf$. Assim, igualando estes resultados:

$$Q \cdot c = h \cdot f \quad \text{com} \quad c = \lambda \cdot f \\ \Rightarrow Q \cdot \lambda \cdot f = h \cdot f$$

Assim,

$$Q = \frac{h}{\lambda} \quad (\text{C.Q.D.})$$

A partir das ideias de Luis de Broglie, vários experimentos confirmaram fenômenos de interferência e difração com “ondas” de elétrons e outras partículas elementares.



Fóton com problemas de identidade. Fonte: site ulaulaman.wordpress.com

Dualidade Onda-Partícula

Comportamento da luz e outras radiações eletromagnéticas, como ondas e como partículas. A radiação eletromagnética, como a luz, produz efeitos causados apenas por ondas. A interferência, que colore bolhas de sabão, é um exemplo além da difração. A luz também

se comporta como um feixe de partículas chamadas fótons. Os fótons geram eletricidade em células fotoelétricas. Assim como a radiação eletromagnética comporta-se como partícula, partículas também se comportam como ondas.

Princípio da Complementaridade

Segundo o princípio da complementaridade, o modelo ondulatório e o modelo corpuscular são complementares: se uma medida prova o caráter ondulatório de uma partícula, a mesma medida não pode provar seu caráter corpuscular, e vice-versa. A escolha do modelo a usar é determinada pelo caráter da medida. Além disso, a compreensão de uma partícula está incompleta a menos que se leve em conta tanto o seu caráter ondulatório quanto o seu caráter corpuscular. A ligação entre os modelos ondulatório e corpuscular é realizada por meio de uma interpretação probabilística da dualidade onda-partícula.

NOTA

A **complementaridade** não é uma solução de compromisso e não significa que toda a verdade acerca da natureza da luz situa-se em algum lugar entre partículas e ondas. Ela se parece mais com olhar os lados de um cristal. O que você enxerga depende de para qual das facetas está olhando, razão pela qual luz, energia e matéria revelam-se como quanta em determinados experimentos, e como ondas em outros.

A ideia segundo a qual os opostos são componentes de todo não é nova. Antigas culturas orientais incorporaram-na como parte integral de sua visão de mundo. Isso é demonstrado no diagrama yin-yang de T'ai Chi Tu. Um lado do círculo é chamado de yin, e o outro de yang. Onde existe yin, existe também yang. Apenas a união dos dois forma um todo. Onde existe o baixo, existe também o alto.



(CONTINUA)

NOTA (CONTINUAÇÃO)

Onde existe a noite, existe também o dia. Onde existe o nascimento, existe também a morte. Uma pessoa integra em si o yin (emoção, intuição, feminilidade, lado direito do cérebro) com o yang (razão, lógica, masculinidade, lado esquerdo do cérebro). Cada um possui aspectos do outro. Para Niels Bohr, o diagrama yin-yang simboliza o princípio da complementaridade. Em idade avançada, Bohr escreveu vastamente sobre as implicações da complementaridade. Em 1947, quando foi condecorado cavaleiro por suas contribuições à física, ele escolheu o símbolo yin-yang para seu brasão.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

Um projétil de 40 g desloca-se a 1.000 m/s.

- Qual o comprimento de onda que podemos associar a ele?
- Por que a natureza ondulatória do projétil não se revela em efeitos de difração?

Considere $h=6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s.

SOLUÇÃO

- Pela hipótese de De Broglie:

$$\lambda_{\text{projétil}} = \frac{h}{Q} = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$\lambda_{\text{projétil}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{4 \cdot 10^{-2} \cdot 10^3} \text{ (S.I.)}$$

$$\Rightarrow \lambda_{\text{projétil}} \approx 1,66 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

(CONTINUA)

SOLUÇÃO (CONTINUAÇÃO)

b) Pois um corpo de massa grande e rapidez ordinária tem um comprimento de onda tão pequeno (bem menores que o átomo de Hidrogênio, por exemplo) que a interferência e a difração são desprezíveis: as balas de um rifle voam em linha reta e realmente não “salpicam” seus alvos distantes e largos com partes onde se detectam interferências resultantes de difração. Mas para partículas menores tais como elétrons, a difração pode ser considerável.

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM 1

A luz tem natureza dual. Em determinados fenômenos ondulatórios sua natureza dual é evidenciada, ao passo que em outros sua natureza corpuscular é percebida. Fenômenos que caracterizam, respectivamente, essas naturezas da luz são:

- a)** reflexão e efeito fotoelétrico
- b)** interferência e difração
- c)** interferência e efeito fotoelétrico
- d)** efeito fotoelétrico e interferência
- e)** refração e interferência

SOLUÇÃO

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM 2

Um elétron em movimento manifesta uma onda de matéria com comprimento de onda de De Broglie igual a 10^{-10} m. Sendo a massa do elétron igual a $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, sua carga é $1,6 \cdot 10^{-19}$ C e a constante de Planck igual a $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s, qual a velocidade de manifestação deste comprimento?

SOLUÇÃO

6. Princípio da Incerteza (1927)

O princípio da incerteza consiste num enunciado da mecânica quântica, formulado inicialmente em 1927 por Werner Karl Heisenberg (1901-1976), físico alemão, impondo restrições à precisão com que se podem efetuar medidas **simultâneas** de uma classe de pares de observáveis.

Após a dualidade Onda-Partícula proposta por de Broglie, surgiu o princípio da incerteza de Heisenberg

que dizia não ser possível determinar a posição e a velocidade de uma partícula simultaneamente. A dualidade onda-partícula dos quanta inspirou discussões interessantes acerca dos limites de nossa habilidade em medir com precisão as propriedades de pequenos objetos. As discussões centravam-se sobre a ideia de que o ato de medir algo afeta a própria quantidade que está sendo medida. Sabemos, por exemplo, que se colocamos um termômetro frio numa xícara de café quente, a temperatura do café será alterada ao ceder calor para o termômetro. O aparelho de medida altera a quantidade que está sendo medida. Mas podemos corrigir estes erros se conhecermos a temperatura inicial do termômetro, as massas e os calores específicos envolvidos e assim por diante. Essas correções se situam domínio da física clássica - essas **não são** as incertezas da física quântica. As incertezas quânticas têm origem na natureza ondulatória da matéria. Uma onda, por sua própria natureza, ocupa algum espaço e dura um certo tempo. Ela não pode ser comprimida a um ponto do espaço, ou limitada a um instante de tempo, pois neste modo ela não seria uma onda. Esta “indistinguibilidade” inerente de uma onda resulta em indistinbibilidade nas medidas realizadas ao nível quântico. Inumeráveis experimentos têm revelado que qualquer medição, que de alguma maneira sonde um sistema, necessariamente perturba o sistema em pelo menos um quantum de ação, h - a constante de Planck. Assim, qualquer medição que envolva



Werner Karl Heisenberg. Fonte: site greatminds of science¹⁶

interação entre o medidor e o que está sendo medido está sujeita a esta imprecisão mínima.

O princípio da Incerteza de Heisenberg afirma que, quanto maior a precisão na determinação da posição de uma partícula, menor a precisão obtida para a sua velocidade (ou quantidade de movimento). Dado pela fórmula:

$$\Delta Q \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$

, onde Δx indica a incerteza na posição, ΔQ a incerteza na quantidade de movimento e h a constante de Planck. Devemos ter cuidado com a interpretação física dessa equação. Ela não está tratando de limitações experimentais na determinação de posição e velocidade, o princípio da incerteza diz que é fisicamente incoerente se falar de posição e velocidade de partículas (quânticas) simultaneamente.

O princípio da incerteza funciona analogamente com a energia e o tempo. Não podemos medir a energia da partícula com total precisão durante um período de tempo infinitamente curto. A incerteza sobre o nosso conhecimento energia, ΔE , e a duração da medição da energia, Δt , estão relacionadas pela expressão,

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

A maior precisão que podemos esperar obter nas medidas correspondentes ao caso em que o produto das incertezas da energia e tempo é $\frac{h}{4\pi}$. Podemos ver que isso está consistente com a incerteza da quantidade de movimento e da posição. Veja:

$$\Delta Q \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi} \text{ e } \Delta Q = F \cdot \Delta t$$

Assim,

$$F \cdot \Delta t \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi} \text{ e } F \cdot \Delta x = \Delta E$$

Logo,

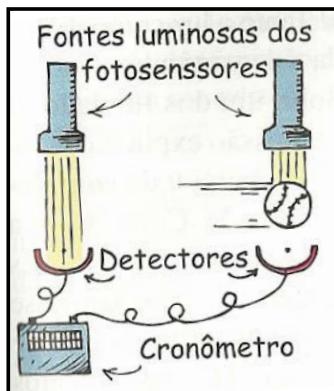
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Quanto mais precisamente determinamos a energia de um fóton, um elétron ou um próton, maior é a imprecisão acerca do tempo durante o qual a partícula possuiu aquela energia.

ATENÇÃO

O Princípio da Incerteza não se aplica a corpos macroscópicos. As incertezas quânticas de Heisenberg são relevantes apenas nos domínios atômico e subatômico.

Compare os atos de realizar medições com uma bola de beisebol arremessada e com um elétron. Podemos medir a rapidez da bola fazendo-a passar por dois fotossensores que se encontram afastados a uma distância conhecida (vide figura ao lado). O tempo de passagem da bola é medido entre os instantes em que ela interrompe os feixes luminosos que incidem normalmente nos fotossensores. A precisão da rapidez medida para a bola depende das incertezas existentes na distância medida entre os fotossensores e no mecanismo de medida do tempo. As interações entre a bola macroscópica e os fótons com os quais ela colide são insignificantes. Mas não no caso em que se mede a rapidez de coisas submicroscópicas tais como elétrons. Mesmo um único fóton que ricocheteie em um elétron altera apreciavelmente o movimento do elétron – e o faz de uma maneira imprevisível! Incerta!



Fonte: HEWITT, 2002. P.563

Um detalhe curioso é que Einstein nunca aceitou essa interpretação da mecânica quântica.

OBSERVAÇÃO

A constante de Planck dividida por 2π é também representada por h (pronunciada como “h cortado”).

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

Assim podemos escrever;

$$\Delta Q \cdot \Delta x \geq \frac{h}{2} \quad \text{e} \quad \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2}$$

EXERCÍCIO RESOLVIDO

A incerteza na medida da velocidade de uma bola de futebol é $\Delta V = 5,0 \cdot 10^{-1}$ m/s. Sendo $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s a constante de Planck, determine a incerteza mínima , na medida da posição x. Dado: massa da bola $m = 0,4$ kg.

SOLUÇÃO

$$\Delta Q \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi} \Rightarrow m \Delta v \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$

Com os valores sugeridos e em unidades compatíveis:

$$0,4 \cdot 5 \cdot 10^{-1} \cdot \Delta x \geq \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{4\pi}$$

Resolvendo,

$$\Delta x \geq 2,64 \cdot 10^{-34} \text{ m} \Rightarrow \Delta x_{\min} \approx 2,64 \cdot 10^{-34} \text{ m}$$

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM 1

Num experimento, foi de $5,0 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ a velocidade de um elétron, medida com incerteza de 0,003%. Calcule a incerteza na determinação da posição do elétron, sendo conhecidos: massa do elétron $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ e constante de Planck reduzida $\hbar = 1,1 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

SOLUÇÃO

7. O átomo de Bohr (1913)

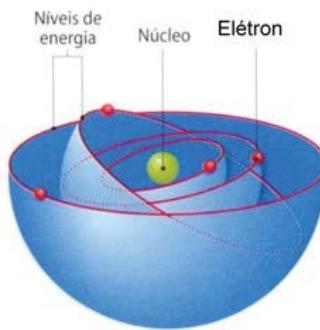
O físico dinamarquês **Niels Henrick David Bohr** (1885-1962), baseado em ideias quânticas, postulou que, para a eletrosfera de um átomo manter-se estável os elétrons desse átomo só podem ter determinados NÍVEIS DE ENERGIA, denominados ESTADOS ESTACIONÁRIOS ou ESTADOS QUÂNTICOS: a cada um desses estados corresponde um nível de energia.



Niels Henrick David Bohr.
Fonte: site nobelprize.org

7.1. Postulados de Bohr

1º - POSTULADO DA ESTABILIDADE



Modelo de Bohr para o átomo. Fonte: site brasilescola

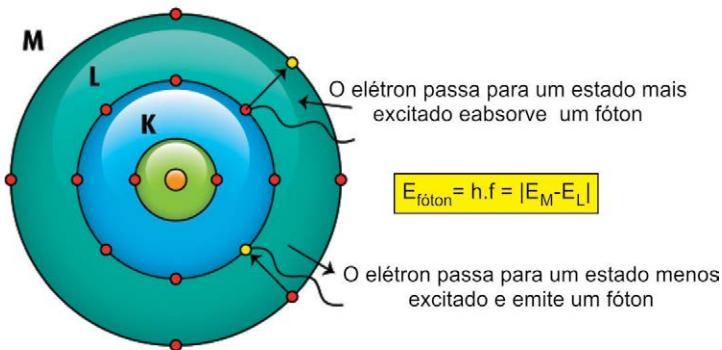
Um elétron pode girar ao redor do núcleo numa órbita estável sem emitir radiação. São os estados estacionários citados no início deste capítulo.

2º - POSTULADO PARA A DETERMINAÇÃO DA FREQUÊNCIA DO FÓTON EMITIDO

Ao passar de um estado quântico de energia maior (E_i) para um de menor energia (E_f), o elétron emite um fóton cuja energia é dada por:

$$h \cdot f = E_{\text{inicial}} - E_{\text{final}}$$

Obs.: o elétron também pode absorver energia de um fóton e passar para estados quânticos mais energéticos. Veja a seguir:



- o fóton é emitido pelo elétron quando ele perde energia, ou seja: $E_{\text{Incial}} > E_{\text{Final}}$
- o fóton é absorvido pelo elétron quando ele ganha energia, ou seja: $E_{\text{Incial}} < E_{\text{Final}}$

3º - POSTULADO PARA A DETERMINAÇÃO DOS ESTADOS ESTACIONÁRIOS

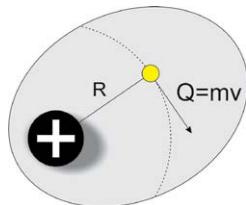
As órbitas dos elétrons são restritas. As órbitas permitidas são aquelas em que o **momento angular** * do elétron é múltiplo de $\frac{\hbar}{2\pi}$.

Assim,

$$mv \cdot R = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

n: nº inteiro chamado de número quântico principal
n=1, 2, 3, 4, ...

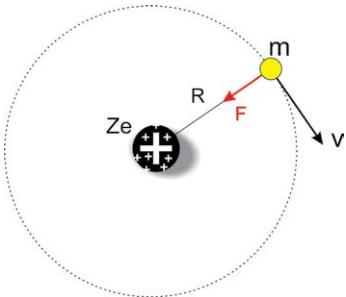
* O **momento angular (L)** é o momento da quantidade de movimento em relação a um ponto do espaço. No caso do átomo de Bohr é dado pelo produto entre a quantidade de movimento do elétron e o raio do átomo.



$$L = mv \cdot R$$

7.2. A matemática do átomo de Bohr

Os elétrons orbitam o núcleo em órbitas circulares sem emitir energia (MCU). Para um átomo qualquer, de número atômico Z, a interação elétrica entre o núcleo de carga $+Z \cdot e$ e o elétron de carga $-e$, faz o papel de força centrípeta e é dada por:



$$F_{\text{Elétrica}} = F_{\text{Centrípeta}}$$

$$k \frac{Z \cdot e^2}{R^2} = m \frac{v^2}{R}$$

$$k \frac{Z \cdot e^2}{R^2} = mv^2 \quad \text{com} \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

Assim,

$$mv^2 = \frac{Z \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 R} \quad (\text{I})$$

Ainda,

$$v^2 = \frac{Z \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 R \cdot m} \quad (\text{II})$$

A energia do elétron no átomo é dada pelo somo das contribuições potencial e cinética. Veja:

$$E = E_c + E_p$$

$$E = m \frac{v^2}{2} + k \frac{Z \cdot e \cdot (-e)}{R}$$

$$E = m \frac{v^2}{2} - k \frac{Ze^2}{R} \quad e \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

Concluindo que:

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \quad (\text{III})$$

Substituindo I em III, teremos:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 R} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 R}$$

$$E = - \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 R} \quad (\text{IV})$$

Este resultado nos mostra que a energia da órbita é função exclusiva de seu raio.

Do 3º postulado vemos que:

$$mv \cdot R = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

Elevando ambos os membros ao quadrado:

$$\begin{aligned} m^2 \cdot v^2 \cdot R^2 &= n \cdot \frac{h^2}{4\pi^2} \\ v^2 &= \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m^2 R^2} \quad (\text{V}) \end{aligned}$$

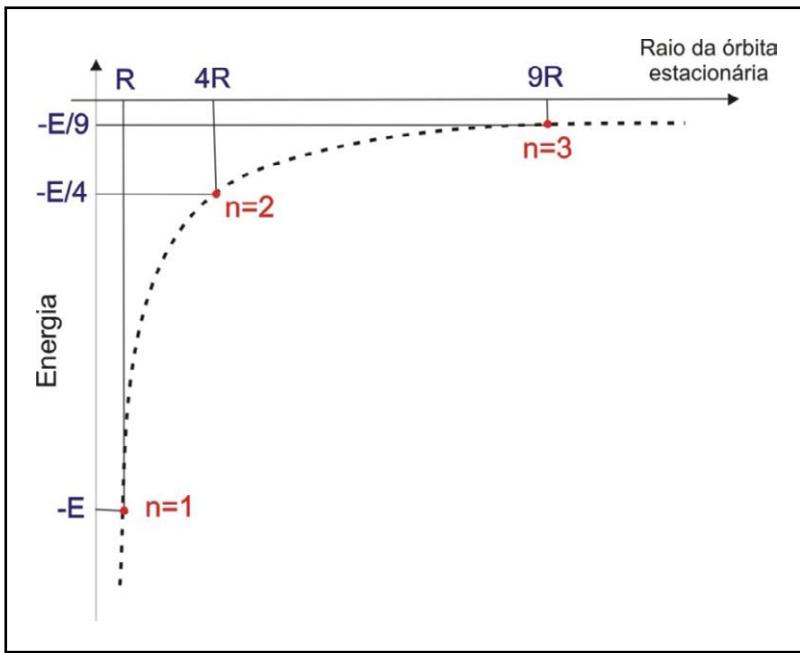
Igualando as equações II e V:

$$\frac{Z \cdot e^2}{4\pi \epsilon_0 R \cdot m} = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m^2 R^2}$$

Eliminando termos comuns e isolando R, teremos;

$$R = n^2 \cdot \frac{h^2 \epsilon_0}{Ze^2 \pi m} \quad (\text{VI})$$

O raio da órbita é proporcional ao quadrado do número quântico principal, ou seja, se o raio do 1º nível é \mathbf{R} , o raio do 2º é $4\mathbf{R}$, o do 3º é $9\mathbf{R}$ e assim por diante. Veja o gráfico na página ao lado que ilustra este resultado (VI) e o resultado IV.



Substituindo a equação VI na IV, temos:

$$E = - \frac{Ze^2}{8\pi\varepsilon_0 \left(n^2 \cdot \frac{h^2\varepsilon_0}{Ze^2\pi m} \right)}$$

Resolvendo,

$$E = - \left(\frac{Z^2 \cdot e^4 \cdot m}{8h^2 \cdot \varepsilon_0^2} \right) \cdot \frac{1}{n^2}$$

7.3. O átomo de Hidrogênio

Para o caso particular do átomo de hidrogênio, que só possui um único elétron e um único próton, o resultado acima com os devidos valores fica assim,

$$\left. \begin{array}{l} Z = 1 \\ e = 1,6 \cdot 10^{-19} C \\ \ddot{a}_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2} \\ h \approx 6,63 \cdot 10^{-34} J.s \\ m \approx 9,11 \cdot 10^{-31} kg \\ 1eV = 1,6 \cdot 10^{-19} J \end{array} \right\} E = -\frac{13,6}{n^2} eV$$

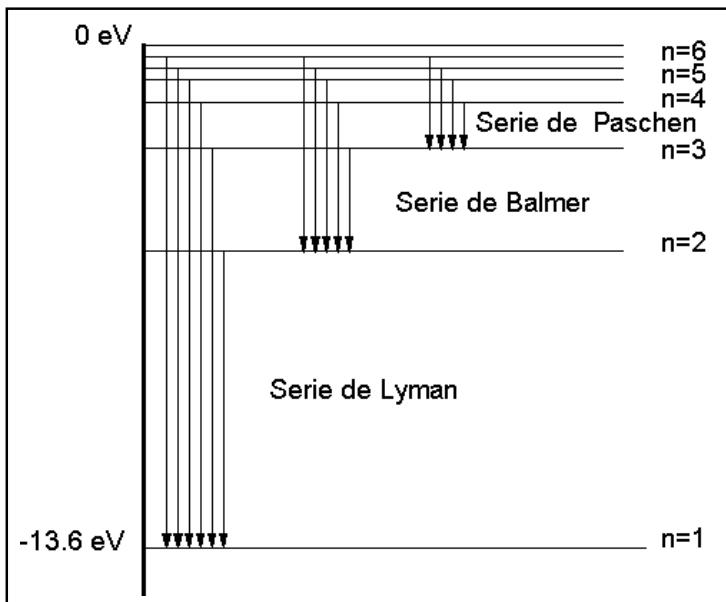
Logo, os níveis de energia são dados pela seguinte expressão, decorrente da teoria de Bohr:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \cdot (eV)$$

, em que $n=1,2,3,4,\dots$ é o **número quântico** ou **nível quântico** e E_n a energia correspondente a cada número quântico.

A representação das energias por estados **n** gera um diagrama de níveis de energia. Nesse diagrama são indicadas por flechas verticais entre os níveis várias séries de transições.

Na época do artigo de Bohr (1913) havia duas séries de transição do átomo de hidrogênio conhecidas: a série de Balmer ($n_f=2$ e $n_i=3,4,5,\dots$) e a série de Paschen ($n_f=3$ e $n_i=4,5,6,\dots$). Em 1916, Lyman encontrou a série correspondente a $n_f=1$ e, em 1922 e 1924, Brackett e Pfund, respectivamente, encontraram séries correspondentes a $n_f=4$ e $n_f=5$. Somente a série de Balmer corresponde à parte visível do espectro eletromagnético.



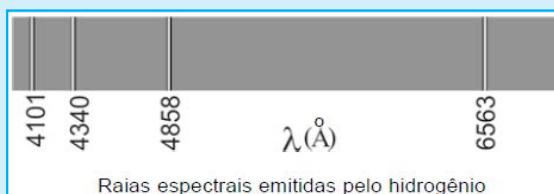
Fonte: <http://fisica.ufpr.br>.

OBSERVAÇÕES

- O estado fundamental corresponde a $n=1$ cuja energia mínima é **-13,6 eV**. Os demais estados excitados correspondem a $n=2,3,4\dots$
- Observe que os valores das energias dos níveis quânticos são negativas, ou seja, o elétron precisa receber energia (fotos) para chegar ao nível zero, que fisicamente significa se desvincular do átomo.
- A energia no estado fundamental é de -13,6eV.
- A energia requerida para remover o elétron do átomo, chegar ao nível de energia nula, se desvincular do átomo é de 13,6eV e é determinada de **energia de ionização**, ou **energia de ligação** do elétron.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

Um gás monoatômico rarefeito, contido em uma ampola de vidro, é submetido a uma descarga elétrica e produz uma luz que, ao passar através de um prisma, decompõe-se em um espectro de raias coloridas, cujo padrão é característico do gás. A primeira explicação teórica para esse espectro, com base na teoria atômica, foi dada, em 1913, por Niels Bohr que, partindo do modelo atômico de Rutherford, estabeleceu um conjunto de postulados a partir dos quais era possível explicar, dentre outras coisas, o espectro observado. Esses postulados estabelecem que os elétrons giram ao redor do núcleo, em órbitas circulares estáveis, nas quais eles podem permanecer sem perder energia, que as órbitas são quantizadas, possuindo, cada uma, um valor discreto de energia, e que o elétron, quando é迫使ido a mudar de uma órbita para outra, absorve ou libera uma determinada quantidade de energia. Com base nos postulados de Bohr e observando a produção das linhas espectrais observadas, determine o módulo da diferença de energia entre os níveis quânticos, em eV, na emissão ou absorção do fóton associado ao comprimento de onda de 4340 Å. Considere a constante de Planck $h \approx 4 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$ e a velocidade da luz $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.



SOLUÇÃO

$$|\Delta E| = h \cdot f = h \frac{c}{\lambda}$$

Assim, com os valores em unidades compatíveis, temos:

$$|\Delta E| \approx \frac{4 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8}{4,34 \cdot 10^{-7}} \Rightarrow |\Delta E| \approx 2,8 \text{ eV}$$

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM 1

Um átomo de hidrogênio tem níveis de energia discretos dados pela equação:

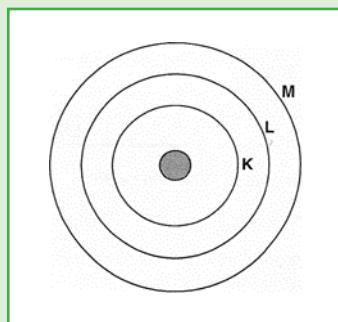
$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \cdot (eV)$$

, onde **n** é o número quântico principal ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$). Para um elétron transitar da camada **K** ($n = 2$) para a camada **L** ($n = 3$), o átomo precisa:

- a)** emitir um fóton energético de 1,89 eV
- b)** ser excitado por um fóton de 1,89 eV
- c)** emitir um fóton energético de 2,6 eV
- d)** ser excitado por um fóton de 2,6 eV
- e)** emitir um fóton energético de 3,4 eV

SOLUÇÃO

EXERCÍCIO DE APRENDIZAGEM 2



Quando um elétron passa do nível de energia M para o nível L de um certo átomo, emite um fóton energético de comprimento de onda $\lambda_1=600\text{nm}$. Quando o elétron transita do nível de energia L para o nível K, emite outro fóton energético de comprimento de onda $\lambda_2=300\text{nm}$. Se, nesse mesmo átomo, um elétron transitasse diretamente do nível de energia M ao nível K, emitiria um fóton energético de comprimento de onda λ :

- a) 900nm
- b) 450nm
- c) 200nm
- d) 180nm
- e) 120nm

SOLUÇÃO

7.4. Leitura: Luminescência-Fluorescência e Fosforescência

Alguns materiais, quando absorvem radiação ultravioleta ou outras formas de radiação, emitem de volta luz visível. Esse fenômeno é chamado genericamente de **luminescência**. Quando a emissão ocorre imediatamente após a incidência da radiação ultravioleta, o fenômeno é chamado fluorescência; se por outro lado, a emissão demorar alguns segundos ou até mesmo algumas horas, chamamos de fosforescência. Os interruptores de luz que brilham no escuro baseiam-se na fosforescência.



Fluorescência. Fonte: site da Viraplast.



Fosforescência. Fonte: site da Gecko adesivos.

Na Fluorescência, a emissão da radiação é direta, ou seja, passa direto do estado fundamental para o excitado e, deste, para o fundamental. Portanto, no caso da fluorescência, quando a emissão de luz eterna acaba, a radiação é finalizada. Um bom exemplo prático para contextualizar a fluorescência são as marcações de trânsito nas ruas, com faixas e placas, que dependem da luz externa para serem iluminadas. Depois que a fonte de emissão termina, ou seja, assim que os carros passam, apagam-se. Outro exemplo são os adesivos iluminados inseridos pelos atletas noturnos nas bicicletas, skates e patins, e também nos uniformes de pessoas que trabalham à noite nas estradas e rodovias com o intuito de evitar acidentes.

Na fosforescência, o elétron passa do estado excitado para um intermediário e só depois para o fundamental. Os adesivos que brilham no escuro geralmente são feitos com sulfeto de zinco.

Quando o sulfeto de zinco é exposto à luz, sem a necessidade de radiações ultravioletas, graças à sua configuração eletrônica, os elétrons das camadas mais externas absorvem a luz e são excitados para camadas eletrônicas ainda mais externas. Quando apagamos a luz deixamos de fornecer energia aos elétrons, que aos poucos vão retornando às suas camadas eletrônicas iniciais. Durante esse retorno (que pode durar horas), eles devolvem a energia que absorveram na forma de luz. Esse fenômeno se chama fosforescência.

EXERCÍCIOS

1) (UFRN-04) Abraão está sempre inovando sua maneira de lecionar. Ele conhece bem a força do desenho caricato e tenta fazer uma espécie de caricatura conceitual” para evidenciar sutilezas da Física Moderna. Abraão acredita que essa forma descontraída de discutir conceitos físicos favorece a apreensão do “novo” e auxilia a manutenção do senso de humor em suas aulas, nas quais ele costuma fazer algumas afirmações para serem discutidas. Uma afirmação correta feita por Abraão é:

- a)** é impossível esmagar um objeto (por exemplo, tirar suco de uma fruta) usando o efeito da contração de Lorentz, apresentado na Teoria da Relatividade Especial.
- b)** ondas de matéria não podem ser associadas a corpos macroscópicos, senão um carro ao passar por um túnel sofreria forte difração.
- c)** a massa relativística cresce com a velocidade do objeto, portanto um elétron fica com um tamanho enorme para velocidades próximas da velocidade da luz.
- d)** na Teoria da Relatividade de Einstein, tudo é relativo, até mesmo leis de conservação, cuja validade vai depender do observador inercial que analisa a situação.

2) (UFRN-04) Bárbara ficou encantada com a maneira de Natasha explicar a dualidade onda-partícula, apresentada nos textos de Física Moderna. Natasha fez uma analogia com o processo de percepção de imagens, apresentando uma explicação baseada numa figura muito utilizada pelos psicólogos da Gestalt. Seus esclarecimentos e a figura ilustrativa são reproduzidos abaixo.

“A minha imagem preferida sobre o comportamento dual da luz é o desenho de um cálice feito por dois perfis. Qual a realidade que percebemos na figura ao lado? Podemos ver um cálice ou dois perfis,

dependendo de quem consideramos como figura e qual consideraremos como fundo, mas não podemos ver ambos simultaneamente.

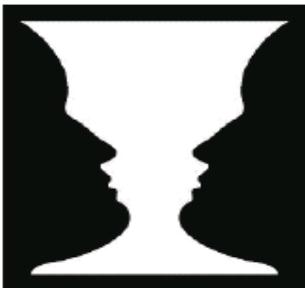


Figura citada por Natasha, na qual dois perfis formam um cálice, e vice-versa.

É um exemplo perfeito de realidade criada pelo observador, em que nós decidimos o que vamos observar. A luz se comporta de forma análoga, pois, dependendo do tipo de experiência (“fundo”), revela sua natureza de onda ou sua natureza de partícula, sempre escondendo uma quando a outra é mostrada.”

Diante das explicações acima, é correto afirmar que Natasha estava ilustrando, com o comportamento da luz, o que os físicos chamam de princípio da:

- a) incerteza de Heisenberg.
- b) complementaridade de Bohr.
- c) superposição.
- d) relatividade.

3) (UNIFOR-09) Uma partícula, cuja massa de repouso é M , é acelerada a partir do repouso até atingir 60% da velocidade de propagação da luz no vácuo. Na situação final, a massa da partícula será igual a:

- a) 0,60 M
- b) 1,0 M
- c) 1,25 M
- d) 1,4 M
- e) 1,5 M

4) (UFRN-04) Uma das aplicações do efeito fotoelétrico é o visor noturno, aparelho de visão sensível à radiação infravermelha, ilustrado na figura abaixo. Um aparelho desse tipo foi utilizado por membros das forças especiais norte-americanas para observar supostos integrantes da rede al-Qaeda. Nesse tipo de equipamento, a radiação infravermelha atinge suas lentes e é direcionada para uma placa de vidro revestida de material de baixa função de trabalho (w). Os elétrons arrancados desse material são “transformados”, eletronicamente, em imagens. A teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico estabelece que: $E_c = hf - W$, sendo:

- EC : a energia cinética máxima de um fotoelétron;
- $h=6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ a constante de Planck;
- f a frequência da radiação incidente.



Considere que um visor noturno recebe radiação de frequência $f=2,4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ e que os elétrons mais rápidos ejetados do material têm energia cinética $E_c=0,9 \text{ eV}$. Sabe-se que a carga do elétron é $q=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ e $1 \text{ eV}=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Baseando-se nessas informações, calcule:

- a função de trabalho (w) do material utilizado para revestir a placa de vidro desse visor noturno, em eV ;
- o potencial de corte (V_0) desse material para a frequência (f) da radiação incidente.

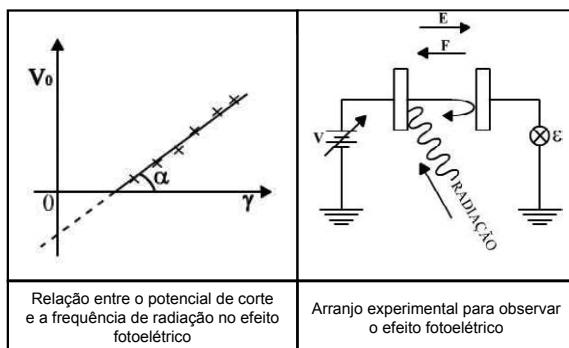
5) (UFRN-03) Em alguns programas de televisão apresentam-se pessoas que dizem se alimentar apenas de luz. Para muitos, a palavra alimento está associada a uma boa porção de massa e a palavra luz ao conceito de energia. Os conceitos de massa e energia dentro da

Física Moderna estão relacionados a duas constantes fundamentais: h , constante introduzida por Planck (em seu trabalho sobre radiação de corpo negro), e c , que é a velocidade da luz no vácuo. O quadro abaixo exemplifica, com duas equações, a presença dessas constantes, tanto na Teoria Quântica como na Teoria da Relatividade de Einstein.

Teoria Quântica (modelo corpuscular da luz)	Teoria da Relatividade
$E = hf$	$E = mc^2$
E: energia de um fóton associado a uma radiação de frequência f ; $h \approx 6 \cdot 10^{-34}$ (SI).	E: é o equivalente em energia da massa m de um objeto; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Tendo como referência as informações acima e considerando uma radiação de frequência $6 \cdot 10^{14}$ hertz, obtenha:

- a) a quantidade de fótons, N , que produziria um equivalente energético de uma massa igual a $0,4\text{kg}$;
 - b) a unidade para a constante de Planck, h , a partir de uma análise dimensional, representada em função das grandezas: massa (kg), comprimento (m) e tempo (s).
- 6) (IME) O gráfico abaixo resulta da investigação experimental do efeito fotoelétrico em um metal. Qual a expressão para o cálculo do ângulo α ?



7) O Sol, cuja temperatura na superfície é de aproximadamente 5.800K, pode ser considerado, com excelente aproximação, um corpo negro. Determine a potência total irradiada por unidade de área na superfície do Sol. (Cte de Stefan-Boltzmann= $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

8) Rodrigo consome 960 gramas de uma feijoada light em 24 minutos. Para experimentar os fundamentos da Relatividade, ele resolveu repetir esse feito viajando em altíssima velocidade. Para tanto, embarcou numa nave, de 10 metros de comprimento, capaz de desenvolver uma velocidade (v) correspondente a 80% da velocidade da luz (c), ou seja, $v = 0,8c$. Lucas, dispondendo de um eficiente telescópio, ficou na Terra para realizar as medidas (descontando o tempo de propagação da luz) do tempo que o Rodrigo levou para devorar a feijoada, da massa que ele consumiu e do comprimento da nave, nas circunstâncias de um deslocamento em altíssima velocidade. Quais foram os resultados?

9) (UFRGS) Complete as lacunas.

“De acordo com a teoria formulada em 1900 pelo físico alemão Max Planck, a matéria emite ou absorve energia eletromagnética de maneira _____ emitindo ou absorvendo _____, cuja energia é proporcional à _____ da radiação eletromagnética envolvida nessa troca de energia.”

Assinale a alternativa que, pela ordem, preenche corretamente as lacunas:

- a)** contínua - quanta - amplitude
- b)** descontínua - prótons - frequência
- c)** descontínua - fótons - frequência
- d)** contínua - elétrons - intensidade
- e)** contínua - nêutrons - amplitude

10) (UFPI-03) A frequência mínima de uma radiação, necessária para arrancar elétrons do potássio, é igual a $5,37 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. Sendo

$h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ a constante de Planck e $c=3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo, a função trabalho para o potássio é igual a:

(Dado: $1\text{eV}=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$)

- a) 2,22 eV.
- b) 3,56 eV.
- c) 4,6 eV.
- d) 5,4 eV.
- e) 6,63 eV

11) (UFPI-03) Sobre o modelo atômico de Bohr, indique com (V) a(s) verdadeira(s) e com (F) a(s) falsa(s).

1 () Uma vez que um elétron em um átomo descreve, por exemplo, uma circunferência em torno do núcleo, ele possui aceleração e portanto emite radiação continuamente.

2 () Ao passar de um estado estacionário para outro, o átomo emite ou absorve um quantum de energia igual à diferença entre as energias correspondentes aos dois estados.

3 () No átomo de hidrogênio, para passar do nível de energia $n=2$ para $n=3$, o elétron deve absorver um fóton com energia aproximadamente igual a 1,89 eV.

4 () O chamado estado fundamental do átomo de Hidrogênio é aquele no qual o elétron está no mais baixo nível de energia.

12) O que ocorre no efeito fotoelétrico quando se aumenta apenas a intensidade da luz incidente na superfície fotoelétrica?

- a) a energia cinética de cada elétron emitido aumenta;
- b) a energia de cada fóton aumenta;
- c) o comprimento de onda da luz aumenta;
- d) a frequência de corte aumenta;
- e) o número de elétrons emitidos por unidade de tempo aumenta;

13) (UFJF 2001) A presença de um elemento atômico em um gás pode ser determinada verificando-se as energias dos fótons que são emitidos pelo gás, quando este é aquecido.

No modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio, as energias dos dois níveis de menor energia são:

- $E_1 = -13,6 \text{ eV}$
- $E_2 = -3,40 \text{ eV}$.

Considerando-se essas informações, um valor possível para a energia dos fótons emitidos pelo hidrogênio aquecido é

- a) -17,0eV. b) -3,40eV c) 8,50eV d) 10,2eV

14) (UFRN-09) No final do século XIX, vários pesquisadores perceberam que a luz era capaz de ejetar elétrons quando incidia em superfícies metálicas. Esse fenômeno, que ocorre sob certas condições, foi chamado de efeito fotoelétrico. A Figura 1a mostra luz policromática de intensidade I_0 , cujos fótons possuem energia entre 2,0 eV e 6,0 eV incidindo sobre uma superfície metálica. Observa-se que, dessa superfície, são ejetados elétrons com energia cinética máxima, E_{cmax} . A Figura 1b mostra, também, luz policromática de intensidade $2I_0$, cujos fótons possuem energia entre 2,0 eV e 6,0 eV incidindo sobre a mesma superfície metálica. Observa-se, ainda, que também são ejetados elétrons com energia cinética máxima, E_{cmax} . A Figura 2a, por sua vez, mostra luz monocromática de intensidade I_0 , cujos fótons possuem energia de 3,0 eV incidindo sobre a mesma superfície metálica. Nesse caso, não se observam elétrons ejetados da superfície. Por outro lado, a Figura 2b mostra luz monocromática de intensidade I_0 , cujos fótons possuem energia de 6,0 eV incidindo sobre a mesma superfície metálica. Nesse caso, observam-se elétrons sendo ejetados da superfície.

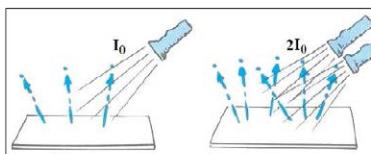


Figura 1a

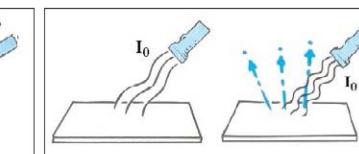


Figura 1b

Com base na teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico,

- a) explique por que a energia cinética máxima dos elétrons, E_{cmax} , independe da intensidade da luz policromática incidente;
- b) explique por que, para essa superfície metálica, o efeito fotoelétrico ocorre apenas quando incide luz cujos fótons possuem energia de 6,0 eV.

15)(UFBA-05) Em 1905, Albert Einstein explicou teoricamente o efeito fotoelétrico e, em carta a um amigo, reconheceu ser esse “um trabalho revolucionário”. Atualmente esse efeito é muito utilizado em alarmes de raios laser e no acendimento automático da iluminação pública, dentre outras aplicações.

A equação que, segundo Einstein, explica esse efeito é escrita como $E_{cinética} = hf - W$

- $E_{cinética}$ é a energia cinética máxima dos elétrons arrancados da superfície;
- f é a frequência da onda eletromagnética incidente;
- h é uma constante universal proposta, pela primeira vez, pelo físico alemão Max Planck;
- W é a função trabalho.

A função trabalho é a quantidade mínima de energia necessária para arrancar um elétron da superfície. A quantidade hf representa a energia de uma “partícula de luz” — um fóton. Estava, então, colocada a dualidade onda-partícula.

Um experimento, para determinar a constante de Planck, pode ser realizado, usando-se a equação de Einstein. Em um capacitor de placas paralelas, no vácuo, os elétrons são arrancados da placa positiva, fazendo-se incidir nela uma onda eletromagnética, luz ou radiação ultravioleta. O aparecimento de uma corrente elétrica indica o fluxo desses elétrons entre as placas do capacitor. Uma diferença de potencial V_0 aplicada entre as placas do capacitor é ajustada o suficiente

para fazer com que a corrente desapareça e, nesse caso, tem-se que $eV_0 = E_{\text{cinética}}$, em que e é a carga do elétron.

O resultado desse experimento realizado em uma superfície de cobre é expresso na tabela.

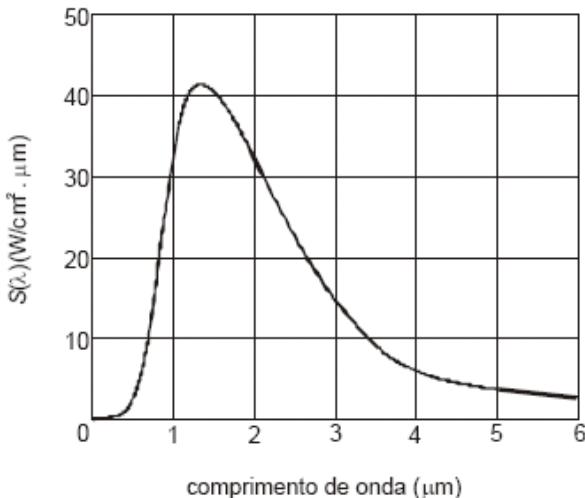
$f \times 10^{14} \text{ Hz}$	$V_0 \text{ (Volts)}$
5,5	0,4
6,8	1,0
9,6	2,0

Com base nessas informações e nos dados da tabela, determine a constante de Planck, \mathbf{h} , e a função trabalho, \mathbf{W} , do cobre, considerando $e=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

16)(UFPE-05) De acordo com o modelo de Bohr, os níveis de energia do átomo de hidrogênio são dados por $E_n = -13,6/n^2$, em eV. Qual a energia, em eV, de um fóton emitido quando o átomo efetua uma transição entre os estados com $n = 2$ e $n = 1$?

- a) 13,6
- b) 10,2
- c) 5,6
- d) 3,4
- e) 1,6

17)(UFRN-05) A radiação térmica proveniente de uma fornalha de altas temperaturas em equilíbrio térmico, usada para fusão de materiais, pode ser analisada por um espectrômetro. A intensidade da radiação emitida pela fornalha, a uma determinada temperatura, é registrada por esse aparato em função do comprimento de onda da radiação. Daí se obtém a curva espectral apresentada na figura abaixo.



A análise desse tipo de espectro levou o físico alemão Wilhelm Wien, em 1894, a propor que, quando a intensidade da radiação emitida é máxima, o comprimento de onda associado obedece à expressão: $\lambda_{\text{máx}} T \approx 3 \cdot 10^3 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$, em que $\lambda_{\text{máx}}$ é o comprimento de onda do máximo da curvapectral e T é a temperatura da fornalha para um determinado espectro. De acordo com essas informações, é correto afirmar que a temperatura da fornalha é, **aproximadamente**:

- a) 2000 K e que $\lambda_{\text{máx}}$ aumenta quando a temperatura aumenta.
- b) 1500 K e que $\lambda_{\text{máx}}$ diminui quando a temperatura diminui.
- c) 2000 K e que $\lambda_{\text{máx}}$ diminui quando a temperatura aumenta.
- d) 1500 K e que $\lambda_{\text{máx}}$ aumenta quando a temperatura diminui.

18) (UFRN-09) O conceito de *éter* surgiu na Grécia antiga, significando uma espécie de fluido sutil e rarefeito que preenchia o espaço e envolvia a Terra. Esse conceito evoluiu para representar um referencial privilegiado, a partir do qual se poderia descrever toda a Física, inclusive seria o meio material no qual se propagariam as ondas eletromagnéticas

(a luz). No entanto, as experiências de Michaelson-Morley, realizadas em 1887, mostraram a inconsistência desse conceito, uma vez que seus resultados implicavam que ou a Terra estava sempre estacionária em relação ao éter ou a noção de que o éter representava um sistema de referência absoluto era errônea, devendo, portanto, ser rejeitada. As inconsistências do conceito de éter levaram Einstein a elaborar a teoria de que a velocidade da luz

- a) é constante para qualquer observador e dependente de qualquer movimento da fonte ou do observador.
- b) é constante para qualquer observador e independente de qualquer movimento da fonte ou do observador.
- c) é constante e dependente do observador, porém independente de qualquer movimento relativo da fonte.
- d) é constante e independente do observador, porém dependente de qualquer movimento relativo da fonte.

19)(UFRN-05) Segundo a teoria cosmológica da grande explosão, nas fases iniciais de formação do universo, as condições físicas foram tais que seu tratamento teórico precisa ser de gravitação quântica. Mas tal tratamento só é necessário durante um certo intervalo de tempo, t_p , chamado tempo de Planck, ou era de Planck. De fato, conforme o universo se expande, os domínios das forças fundamentais vão se desacoplando um do outro, e chega um momento, quando o tempo de existência do universo for da ordem de t_p ou maior que t_p , em que efeitos quânticos e gravitacionais podem ser tratados separadamente. É possível estimar-se a ordem de grandeza de t_p a partir de considerações básicas envolvendo constantes fundamentais e análise dimensional. A grandeza t_p é uma escala de tempo típica de uma situação física em que não se pode desprezar a gravidade nem fenômenos quânticos. Portanto, a expressão que define t_p deve envolver explicitamente a constante gravitacional, G , e a constante de Planck, h . Além dessas duas constantes, espera-se ainda que a velocidade da luz, c , seja importante para estimar tal escala de tempo, pois essa velocidade é a constante associada aos fenômenos

relativísticos presentes na descrição da evolução do universo. Existe uma única maneira de combinar algebricamente essas três constantes de modo que a grandeza resultante tenha dimensão de tempo. Estime a ordem de grandeza do tempo de Planck.

Quadro com informações e sugestões de procedimentos para a solução desta questão:

- *Para obter a expressão literal para tP e depois calcular seu valor, comece fazendo uma análise dimensional envolvendo apenas as três constantes. Em outras palavras, combine as dimensões físicas das três constantes, de modo que o resultado seja uma expressão literal que representa uma grandeza com dimensão de tempo, isto é, tP . Depois de obter essa expressão, substitua os valores das constantes fundamentais que nela aparecem para obter uma estimativa da ordem de grandeza de tP . Pode ser que, para obter tal expressão, você precise manipular com potências inteiras e/ou fracionárias das constantes.*
- *Note que a dimensão de G é dada por $L^3M^{-1}T^{-2}$, a dimensão de h é dada por L^2MT^{-1} e a dimensão de c é dada por LT^{-1} , em que L representa a dimensão de comprimento, M a de massa e T a de tempo.*
- *São dados os valores das constantes no SI:
 $G \sim 7 \times 10^{-11} N \cdot m^2/kg^2$; $h \sim 7 \times 10^{-34} J \cdot s$; e $c \approx 3 \times 10^8 m/s$.*

20) (UFRN-02) Bastante envolvida com seus estudos para a prova do vestibular, Sílvia selecionou o seguinte texto sobre Teoria da Relatividade para mostrar à sua colega Tereza:

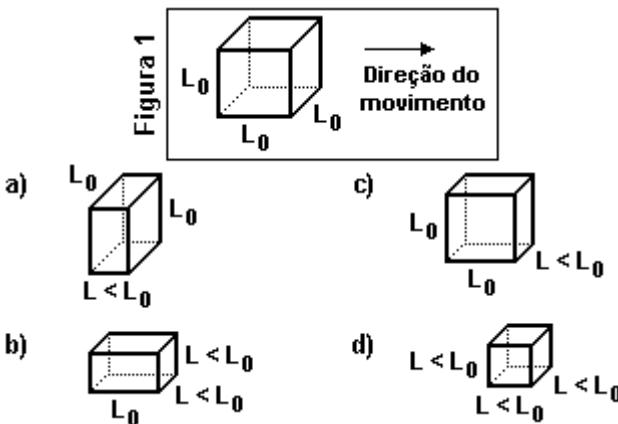
À luz da Teoria da Relatividade Especial, as medidas de comprimento, massa e tempo não são absolutas quando realizadas por observadores em referenciais inerciais diferentes. Conceitos inovadores como massa relativística, contração de Lorentz e dilatação

temporal desafiam o senso comum. Um resultado dessa teoria é que as dimensões de um objeto são máximas quando medidas em repouso em relação ao observador. Quando o objeto se move com velocidade V , em relação ao observador, o resultado da medida de sua dimensão paralela à direção do movimento é menor do que o valor obtido quando em repouso. As suas dimensões perpendiculares à direção do movimento, no entanto, não são afetadas.

Depois de ler esse texto para Tereza, Sílvia pegou um cubo de lado L_0 que estava sobre a mesa e fez a seguinte questão para ela:

Como seria a forma desse cubo se ele estivesse se movendo, com velocidade relativística constante, conforme direção indicada na figura 1?

A resposta correta de Tereza a essa pergunta foi:



21) (UEPB-05) Em 1905, Albert Einstein apresentou seu trabalho referente ao efeito fotoelétrico. Este explicou, com base na hipótese de Max Planck apresentada em 1900, na qual a radiação térmica emitida por um corpo negro é constituída por quantas de energia, que a energia dos elétrons emitidos, por uma placa metálica iluminada, depende apenas da frequência da luz incidente. Naquele período, constatou-se que para alguns fenômenos que ocorrem com a luz, ela se comporta como onda produzindo interferência (como no experimento da dupla fenda de Young), entretanto, em outros fenômenos ela apresenta

comportamento de partícula (como no efeito fotoelétrico). Diz-se então que a luz possui uma natureza dual: ora se comporta como uma onda e ora se comporta como partícula. A respeito da dualidade onda-partícula da luz, apresentam-se as seguintes proposições:

I. *O comportamento ondulatório e o comportamento corpuscular da luz são complementares.*

II. *O comportamento ondulatório da luz exclui seu comportamento corpuscular.*

III. *O comportamento ondulatório e o comportamento corpuscular da luz são equivalentes.*

Com relação às proposições apresentadas é correto afirmar que:

- a)** Apenas II é verdadeira.
- b)** II e III são verdadeiras.
- c)** Apenas I é verdadeira.
- d)** I e III São verdadeiras.
- e)** Apenas III é verdadeira.

22) (UFPI-09) Considere um *laser* de potência 10mW, emitindo luz vermelha de frequência $4,00 \times 10^{14} \text{ Hz}$. Pode-se afirmar que o número de fótons que são emitidos, durante o intervalo de tempo de 1 segundo, vale, aproximadamente: Dado: constante de Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

- a)** $2,50 \times 10^{16}$
- b)** $3,77 \times 10^{16}$
- c)** $5,50 \times 10^{16}$
- d)** $6,45 \times 10^{16}$
- e)** $8,56 \times 10^{16}$

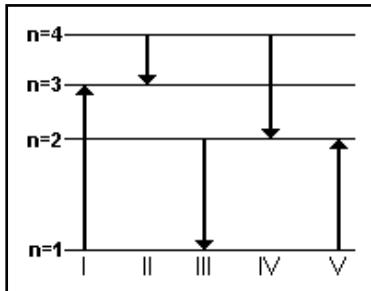
23) (UEPB-05) A Física Moderna rompeu com alguns conceitos da Física Clássica, como por exemplo, com o caráter absoluto das grandezas físicas: espaço e tempo na Física Newtoniana. Como consequência dos postulados da Teoria da Relatividade obtém-se uma nova concepção para conceitos anteriormente estabelecidos. Neste sentido, em relação ao comprimento de um objeto em repouso num referencial inercial, que se move com velocidade constante V , em relação ao referencial de um observador, para a Teoria da Relatividade Especial, é correto afirmar que para este observador:

- a)** O comprimento do objeto se dilata, na direção do movimento, com o aumento da velocidade.
- b)** O comprimento do objeto se contrai, na direção do movimento, com o aumento da velocidade.
- c)** O comprimento não se altera, na direção do movimento, com o aumento da velocidade.
- d)** O comprimento pode se contrair ou se dilatar, na direção do movimento, com o aumento da velocidade.
- e)** É impossível prever o que acontece com comprimento, na direção do movimento, quando a velocidade aumenta.

24) (ITA-02) Um átomo de hidrogênio tem níveis de energia discretos dados pela equação $E_n = -13,6/n^2 \text{ eV}$, em que $\{n \in \mathbb{Z} / n \geq 1\}$. Sabendo que um fóton de energia 10,19 eV excitou o átomo do estado fundamental ($n = 1$) até o estado p , qual deve ser o valor de p ? Justifique.

25) (ITA) O diagrama mostra os níveis de energia (n) de um elétron em um certo átomo. Qual das transições mostradas na figura representa a emissão de um fóton com o menor comprimento de onda?

- a) I
 b) II
 c) III
 d) IV
 e) V



26) (UFPE-09) O césio metálico tem uma função trabalho (potencial de superfície) de **1,8 eV**. Qual a energia cinética máxima dos elétrons, em **eV**, que escapam da superfície do metal quando ele é iluminado com luz ultravioleta de comprimento de onda igual a **327nm**? Considere **1 eV = $1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$** e **$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$**

27) (UFPE-06) Para liberar elétrons da superfície de um metal é necessário iluminá-lo com luz de comprimento de onda igual ou menor que $6,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Qual o inteiro que mais se aproxima da frequência óptica, em unidades de 10^{14} Hz , necessária para liberar elétrons com energia cinética igual a **3,0eV**?

28) (UFPE-06) Para liberar elétrons da superfície de um metal, é necessário iluminá-lo com luz de comprimento de onda igual ou menor que $6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Qual o potencial de superfície (também chamado “função trabalho”) deste metal, em **eV** (elétron-volts)?

29) (Ufg-06) Uma fonte luminosa puntiforme de 157 W emite luz de comprimento de onda 660nm. A luz é emitida em todas as direções, formando frentes de onda esféricas com centro na fonte. Calcule o número de fôtons que atravessam, em 1 segundo, uma superfície de área igual a 1 cm^2 , localizada a 1 metro da fonte.

Dados: $h=6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $\pi=3,14$

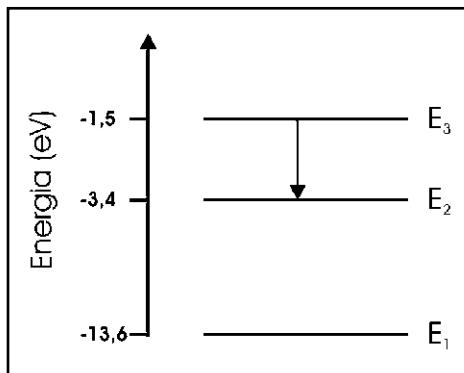
30) (ITA-06) Einstein propôs que a energia da luz é transportada por pacotes de energia hf , em que h é a constante de Planck e f é a

frequência da luz, num referencial na qual a fonte está em repouso. Explicou, assim, a existência de uma frequência **mínima** f_0 para arrancar elétrons de um material, no chamado efeito fotoelétrico. Suponha que a fonte emissora de luz está em movimento em relação ao material. Assinale a alternativa correta.

- a)** Se $f = f_0$, é possível que haja emissão de elétrons desde que a fonte esteja se afastando do material.
- b)** Se $f < f_0$, é possível que elétrons sejam emitidos, desde que a fonte esteja se afastando do material.
- c)** Se $f < f_0$, não há emissão de elétrons qualquer que seja a velocidade da fonte.
- d)** Se $f > f_0$, é sempre possível que elétrons sejam emitidos pelo material, desde que a fonte esteja se afastando do material.
- e)** Se $f < f_0$, é possível que elétrons sejam emitidos, desde que a fonte esteja se aproximando do material.

31) (Ufg-06) Transições eletrônicas, em que fótons são absorvidos ou emitidos, são responsáveis por muitas das cores que percebemos. Na figura a seguir, vê-se parte do diagrama de energias do átomo de hidrogênio. Na transição indicada ($E_3 \rightarrow E_2$), um fóton de energia

- a)** 1,9 eV é emitido.
- b)** 1,9 eV é absorvido.
- c)** 4,9 eV é emitido.
- d)** 4,9 eV é absorvido.
- e)** 3,4 eV é emitido.



32) (Ufc-06) Se a luz incide sobre hidrogênio gasoso, é possível que o átomo, no seu estado fundamental $E_1 = -13,6\text{ eV}$, absorva certa quantidade de energia, passando ao estado seguinte permitido (estado excitado). A energia necessária para esta transição é de:

a) 9,97 eV .

b) 10,06eV .

c) 10,20eV .

d) 10,59eV .

e) 10,75eV .

33) (Ueg-06) “Antes mesmo de ter uma idéia mais correta do que é a luz, o homem percebeu que ela era capaz de percorrer muito depressa enormes distâncias. Tão depressa que levou Aristóteles - famoso pensador grego que viveu no século IV a.C. e cujas obras influenciaram todo o mundo ocidental até a Renascença - a admitir que a velocidade da luz seria infinita.” (GUIMARÃES, L. A.; BOA, M. F. “Termologia e óptica”. São Paulo: Harbra, 1997. p. 177)

Hoje sabe-se que a luz tem velocidade de aproximadamente 300000 km/s, que é uma velocidade muito grande, porém finita. A teoria moderna que admite a velocidade da luz constante em qualquer referencial e, portanto, torna elásticas as dimensões do espaço e do tempo é:

a) a teoria da relatividade.

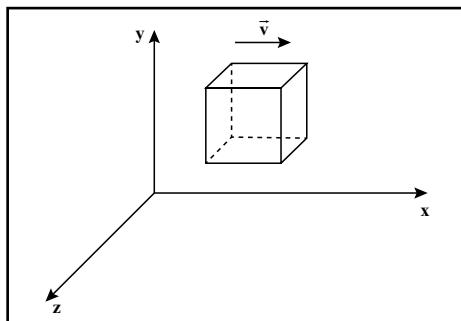
b) a teoria da dualidade onda - partícula.

c) a teoria atômica de Bohr.

d) o princípio de Heisenberg.

e) a lei da entropia.

34) (UFRN-06) Segundo a teoria da relatividade especial, as medidas de comprimento e de massa, por exemplo, dependem do estado de movimento relativo entre observadores que efetuam tais medidas a partir de referenciais inerciais diferentes. Considere um cubo sólido e homogêneo movendo-se com velocidade v , na direção x , paralelamente a uma de suas arestas, conforme representado na figura abaixo.



As grandezas L_0 , m_0 , V_0 e ρ_0 são, respectivamente, o comprimento da aresta, a massa, o volume e a densidade de massa desse cubo, medidos desde um referencial em relação ao qual ele está em repouso. Se esses valores forem medidos de um referencial inercial em relação ao qual esse cubo se move com velocidade v constante – segundo uma direção paralela a uma das arestas –, então o comprimento da aresta paralela à direção em que o cubo se move será dado por $L=L_0/\gamma$, e as outras três grandezas serão dadas, respectivamente, por $m=\gamma m_0$, V e ρ , em que γ é o fator relativístico de Lorentz.

São dados ainda: $\rho_0=m_0/V_0$ e $\rho=m/V$.

Segundo a teoria da relatividade especial, para a situação descrita, a relação entre as densidades de massa do cubo, conforme medidas nos dois referenciais, é expressa por:

- a) $\rho=\gamma \rho_0$
- b) $\rho=\gamma^2 \rho_0$
- c) $\rho=\rho_0$
- d) $\rho=\gamma^4 \rho_0$

35) (UFRN-06) Três físicos se destacaram no estabelecimento inicial dos fundamentos da Mecânica Quântica há cerca de cem anos. O primeiro físico propôs que a interação entre a radiação eletromagnética e a matéria só ocorria de modo quantizado. O segundo físico foi além e argumentou que não apenas a referida interação era quantizada, mas que a própria radiação eletromagnética era quantizada e se propagava em “pacotes” de energia, chamados fótons. O terceiro físico, na tentativa de explicar fenômenos observados envolvendo o átomo de hidrogênio, propôs que o momento angular orbital do elétron neste átomo era quantizado. Os três físicos que fizeram as propostas destacadas acima foram

- a)** Wien, Einstein e Rutherford.
- b)** Planck, De Broglie e Rutherford.
- c)** Wien, De Broglie e Bohr.
- d)** Planck, Einstein e Bohr.

36) (UEPB-06)

“*Quanta do latim
Plural de quantum
Quando quase não há
Quantidade que se medir
Qualidade que se expressar
Fragmento infinitésimo
Quase que apenas mental...*”
(Gilberto Gil)

O trecho acima é da música Quanta, que faz referência ao quanta, denominação atribuída aos pequenos pacotes de energia emitidos pela radiação eletromagnética, segundo o modelo desenvolvido por Max Plank, em 1900. Mais tarde Einstein admite que a luz e as demais radiações eletromagnéticas deveriam ser consideradas como um feixe desses pacotes de energia, aos quais chamou de fótons, que significa “partículas de luz”, cada um transportando uma quantidade de energia.

Adote, $\mathbf{h=6,63 \cdot 10^{-34} J \cdot s}$ e $\mathbf{1ev=1,6 \cdot 10^{-19} J}$. Com base nas informações do texto acima, pode-se afirmar que:

- a)** quando a frequência da luz incidente numa superfície metálica excede um certo valor mínimo de frequência, que depende do metal de que foi feita a superfície, esta libera elétrons;
- b)** as quantidades de energia emitidas por partículas oscilantes, independem da frequência da radiação emitida;
- c)** saltando de um nível de energia para outro, as partículas não emitem nem absorvem energia, uma vez que mudaram de estado quântico;
- d)** a energia de um fóton de frequência 100MHz é de $663 \cdot 10^{-28} ev$;
- e)** o efeito fotoelétrico consiste na emissão de fótons por uma superfície metálica, quando atingida por um feixe de elétrons.

37) (UFMS-06) Um importante passo no desenvolvimento das teorias sobre a natureza da luz foi dado por um fenômeno chamado de efeito fotoelétrico, descoberto por H. Hertz, em 1897. Esse efeito consiste na emissão de elétrons por uma placa metálica, quando a luz incide sobre ela. Assinale a(s) proposição(ões) correta(s) sobre o efeito fotoelétrico.

(01) Aumentando-se a intensidade luminosa da luz incidente sobre uma placa metálica, a energia dos elétrons ejetados também aumenta.

(02) Quanto maior for a função trabalho de um metal, para uma frequência fixa da luz incidente, maior será a energia cinética dos elétrons ejetados do metal.

(04) O efeito fotoelétrico pode ser explicado usando-se a teoria corpuscular da luz.

(08) Existe uma frequência limite da luz incidente abaixo da qual os elétrons não são ejetados da placa metálica.

(16) A energia da luz incidente sobre a placa metálica independe da frequência da luz.

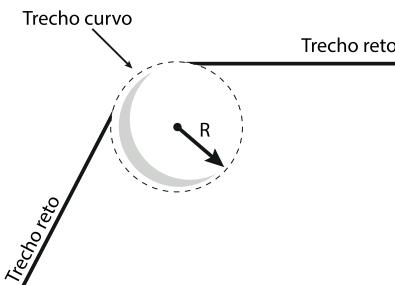
Dê como resposta a soma das proposições corretas.

38) (PUCMG-07) Responda a esta questão assinalando a opção **CORRETA**.

No efeito fotoelétrico:

- a)** elétrons são arrancados da superfície de um metal pela luz.
- b)** fótons são arrancados da superfície de um metal por um feixe de elétrons.
- c)** corrente elétrica é gerada em uma chapa metálica aquecida.
- d)** energia elétrica é gerada quando uma superfície metálica é iluminada.

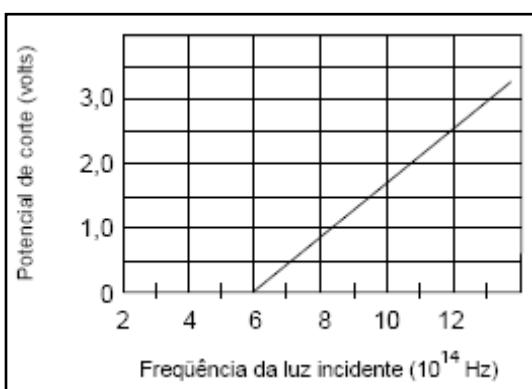
39) (Unicamp-07) Numa fonte de luz síncrotron, como aquela existente no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) de Campinas, elétrons circulam no interior de um tubo com velocidade de módulo v muito próximo ao da velocidade da luz no vácuo, que é $c=3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. A trajetória percorrida pelos elétrons é composta de trechos em linha reta e de trechos curvos (arcos de circunferência de raio R), como ilustrado na figura abaixo. Nas curvas os elétrons sofrem aceleração centrípeta e, em consequência disso, emitem luz.



- a)** Se $R=3,0\text{m}$, qual é o módulo da aceleração centrípeta do elétron nos trechos curvos da trajetória? Para simplificar o cálculo, considere **neste item** que o módulo da velocidade v dos elétrons é exatamente igual a c .
- b)** Segundo a teoria da relatividade, a energia de um elétron é dada por $E=\gamma mc^2$, onde $m=9 \cdot 10^{-31}\text{kg}$ é a massa do elétron, e γ é uma grandeza adimensional sempre maior do que 1, que depende da velocidade do elétron. No LNLS, a energia do elétron é igual a $2,1 \cdot 10^{-10}\text{J}$. Qual é o valor de γ ?
- c)** A diferença entre os módulos das velocidades da luz e dos elétrons, $\Delta v=(c-v)$, relaciona-se com γ por: $\Delta v \cong c/2\gamma^2$. Encontre Δv no caso do LNLS.
- 40) (UFRN-07)** Raios cósmicos são partículas que bombardeiam continuamente a Terra. Eles são compostos, principalmente, de partículas alfa, prótons e neutrinos. Um neutrino vindo do espaço se desloca em relação à Terra com velocidade da luz, igual a c . Para um foguete que se desloca com velocidade v em relação à Terra, em direção ao neutrino, esta partícula terá velocidade igual a:

- a)** $v-c$ **b)** $v+c$ **c)** c **d)** v

- 41) (UFPE-07)** Em uma experiência de efeito fotoelétrico com uma placa metálica, foram determinados os potenciais de corte em função da frequência da luz incidente como mostrado no gráfico ao lado. A partir do gráfico, determine, em aproximação, o **potencial de superfície** (também chamado de **função trabalho**) do metal, em unidades de 10^{-20} J . (dado $h=6,6 \cdot 10^{-34}\text{J.s}$)



42) (UFMS-07) O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons pela matéria sob a ação de fótons (luz). Os elétrons emitidos possuem variadas energias, sendo os mais energéticos aqueles que estavam menos ligados ao material. Considerando um feixe de luz coerente (única frequência), incidindo sobre a superfície de um material, e que esteja produzindo o efeito fotoelétrico, é correto afirmar:

- (01)** A energia máxima em que os elétrons são emitidos não depende da frequência do feixe de luz incidente.
- (02)** Quanto maior a intensidade do feixe da luz incidente, maior a taxa de emissão de elétrons.
- (04)** A energia de um feixe de luz não depende do comprimento de onda da luz.
- (08)** A emissão de elétrons é explicada pela teoria ondulatória da luz.
- (16)** Os elétrons são emitidos porque absorvem energia dos fótons durante a colisão.

Dê como resposta a soma das proposições corretas.

43) (UFC-07) O núcleo de um determinado elemento A, constituído por dois prótons e dois nêutrons, tem massa $m_A = 6,691 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Medidas experimentais mostram que a soma da massa dos dois prótons, $m_p = 3,345 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, com a massa dos dois nêutrons, $m_N = 3,350 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, não é igual à massa do núcleo. Isto significa que existe uma energia mínima necessária para separar os constituintes do núcleo do elemento A, denominada aqui de energia de ligação E_L .

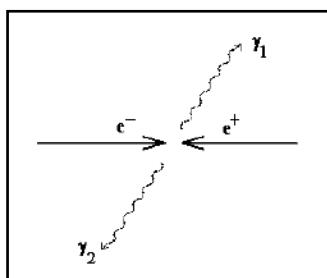
(Dados: velocidade da luz no vácuo $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; constante de Planck $h = 6 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$).

- a)** Determine a energia de ligação para separar prótons e nêutrons em um núcleo do elemento A.

- b)** No caso de ser possível separar os constituintes do núcleo do elemento A incidindo fótons de uma radiação eletromagnética de frequência $f=1,2 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$, determine o número de fótons necessários para que isso ocorra.
- 44) (UPE-07)** Quais são os cinco primeiros valores permitidos para a energia de um elétron no átomo de hidrogênio em elétronvolt, sabendo-se que o valor da energia do elétron, no estado fundamental do átomo de hidrogênio, é $-13,6 \text{ eV}$?
- a)** $-13,6; -13,6/4; -13,6/9; -13,6/16; -13,6/25$.
 - b)** $13,6; 13,6/4; 13,6/9; 13,6/16; 13,6/25$.
 - c)** $1; 4; 9; 16; 25$.
 - d)** $-1; -4; -9; -16; -25$.
 - e)** $0; 13,6; 13,6/2; 13,6/3; 13,6/4$.

45) (ITA-08) Um elétron e um pósitron, de massa $m=9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, cada qual com energia cinética de $1,20 \text{ MeV}$ e mesma quantidade de movimento, colidem entre si em sentidos opostos. Neste processo colisional as partículas aniquilam-se, produzindo dois fótons γ_1 e γ_2 . Sendo dados: constante de Planck $h=6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$; velocidade da luz $c=3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$; $1 \text{ eV}=1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$; $1 \text{ femtometro}=1 \text{ fm}=1 \times 10^{-15} \text{ m}$, indique os respectivos valores de energia E e do comprimento de onda dos fótons.

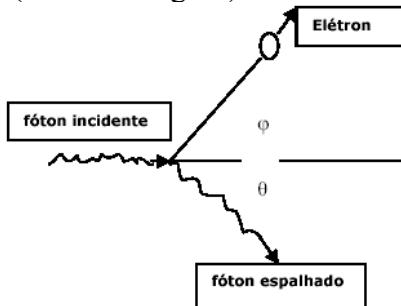
- a)** $E=1,20 \text{ MeV}; \lambda = 2435 \text{ fm}$
- b)** $E=1,20 \text{ MeV}; \lambda = 1035 \text{ fm}$
- c)** $E=1,71 \text{ MeV}; \lambda = 726 \text{ fm}$
- d)** $E=1,46 \text{ MeV}; \lambda = 0,28 \times 10^{-2} \text{ fm}$
- e)** $E=1,71 \text{ MeV}; \lambda = 559 \text{ fm}$



46) (UFC-08) O girotron é um gerador de microondas de alta potência em altas frequências. Um girotron, com frequência de 32GHz, funciona a 225kW.

- a) Qual o comprimento de onda da radiação e a energia do fóton emitida?
- b) Quantos fótons por segundo emite o gerador de microondas? Considere que a constante de Planck $6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$.

47) (UFCG-08) O Efeito Compton é uma bela manifestação da contribuição do modelo de De Broglie (um elétron, por exemplo, assim como a luz, comporta-se como onda e também como partícula). Neste experimento, um fóton de comprimento de onda λ choca-se com um elétron em repouso (observe a figura).



Após o choque, o fóton é espalhado segundo um ângulo θ e o elétron é espalhado segundo o ângulo φ . Considere que, numa determinada situação, um fóton de 10^{-13} J incida sobre um elétron. Em relação a esse fenômeno, pode-se afirmar, EXCETO, que:

- a) a frequência do fóton espalhado é igual à frequência do fóton incidente.
- b) a energia transferida ao elétron na colisão depende do ângulo θ .
- c) a energia do fóton espalhado é menor do que a energia do fóton incidente.

- d) o momento linear (quantidade de movimento) associado ao fóton incidente vale $3,3 \cdot 10^{-22}$ kg.m/s.
- e) a velocidade de propagação do fóton espalhado é igual à velocidade de propagação do fóton incidente.
- 48) (UFC-08)** A energia relativística do fóton é dada por $E=X.c$, onde c indica a velocidade da luz. Utilizando conhecimentos de física moderna e análise dimensional, assinale a alternativa correta no tocante à dimensão de X .
- a) Força.
 - b) Massa.
 - c) Velocidade.
 - d) Comprimento.
 - e) Quantidade de movimento.

TEXTO REFERENTE ÀS QUESTÕES 49 E 50

Em 1887 Heinrich Hertz realizou as experiências que confirmaram a existência de ondas eletromagnéticas e ainda observou que uma descarga elétrica entre dois eletrodos dentro de uma ampola de vidro, conforme a figura ao lado, é facilitada quando a radiação luminosa incide em um dos eletrodos, fazendo com que elétrons sejam emitidos dessa superfície. Esse fenômeno foi chamado efeito fotoelétrico.

A física clássica foi incapaz de explicar o efeito fotoelétrico. Em 1905, Einstein publicou um artigo explicando o efeito fotoelétrico, que desafiava os físicos da época, a partir da quantização da energia introduzida por Planck, marcando assim o início da física quântica. Em 1921, esse trabalho deu ao cientista alemão o prêmio Nobel de Física. O efeito fotoelétrico é um fenômeno historicamente importante no contexto da física moderna. O efeito fotoelétrico é a base de várias

aplicações tecnológicas. Como exemplo, podemos citar os sensores fotoelétricos e sua gama de utilização, como no cinema falado e leitura laser nos discos compactos. (*Adaptado de Cavalcante, M. A., Tavolaro, C. R.C., Souza, D. F. de. & Muzinatti, J. Uma Aula Sobre o Efeito Fotoelétrico no desenvolvimento de competências e habilidades. Física na Escola, v.3, n.1, 2002*)

49) (UEPB-08) Acerca do assunto tratado no texto II, para explicar o efeito fotoelétrico, Albert Einstein mostrou que a energia cinética máxima dos elétrons, emitidos por uma placa metálica iluminada, depende

- a)** da frequência e não do comprimento de onda da luz incidente.
- b)** exclusivamente da amplitude da onda luminosa incidente.
- c)** do comprimento de onda e não da frequência da onda luminosa incidente.
- d)** da frequência e não da amplitude da onda luminosa incidente.
- e)** da amplitude e não do comprimento de onda da luz incidente.

50) (UEPB-08) Com base nas informações do texto II, considere um circuito elétrico construído conforme a figura que o ilustra, em que uma placa metálica de césio é iluminada por uma onda luminosa, de comprimento $3 \times 10^{-7}\text{m}$, cuja função de trabalho do césio (W) é $2,1\text{eV}$, e considere, também, a velocidade da luz $c=3 \times 10^8\text{m/s}$ e a constante de Planck $h=4 \times 10^{-15}\text{eV.s}$. A energia cinética dos elétrons, emitidos por esta placa, em (eV), vale

- a)** 1,5
- b)** 1,9
- c)** 1,4
- d)** 2,0
- e)** 1,8

51) (UEL-08) Os *múons* são partículas da família dos *léptons*, originados pela desintegração de partículas *píons* em altitudes elevadas na atmosfera terrestre, usualmente a alguns milhares de metros acima do nível do mar. Um *múon* típico, movendo-se com velocidade de **0,998c**, realiza um percurso de aproximadamente **600m** durante seu tempo de vida média de **2×10^{-6} s**. Contudo, o tempo de vida média desse *múon*, medida por um observador localizado no sistema de referência da Terra, é de **30×10^{-6} s**. Com base nos conhecimentos sobre a Teoria da Relatividade, analise as seguintes afirmativas. Considere a velocidade da luz **$c=3 \times 10^8 m/s$** .

I. Essa discrepância de valores é explicada pelo aumento do tempo de vida média da partícula no sistema de referência da Terra, por um fator de Lorentz no valor aproximado de 15 para a velocidade dada.

II. No sistema de referência da Terra, um *múon* com essa velocidade percorre cerca de **9.000 m**.

III. No sistema de referência da Terra, um *múon* com essa velocidade percorre cerca de **3.000 m**.

IV. Observações e medidas desse tipo confirmam previsões relativísticas.

Com base nos conhecimentos em Física, assinale a alternativa que contém todas as afirmativas corretas.

- a)** I e IV.
- b)** II e III.
- c)** III e IV.
- d)** I, II e III.
- e)** I, II e IV.

52) (UFRN-08) Quando há incidência de radiação eletromagnética sobre uma superfície metálica, elétrons podem ser arrancados dessa superfície e eventualmente produzir uma corrente elétrica. Esse fenômeno pode ser aplicado na construção de dispositivos eletrônicos, tais como os que servem para abrir e fechar portas automáticas. Ao interagir com a superfície metálica, a radiação eletromagnética incidente se comporta como

- a) onda, e o fenômeno descrito é chamado de efeito fotoelétrico.
- b) partícula, e o fenômeno descrito é chamado de efeito fotoelétrico.
- c) partícula, e o fenômeno descrito é chamado de efeito termiônico.
- d) onda, e o fenômeno descrito é chamado de efeito termiônico.

53) (Unicamp-08) Com um pouco de capacidade de interpretação do enunciado, é possível entender um problema de Física moderna, como o exposto abaixo, com base nos conhecimentos de ensino médio. O Positrônio é um átomo formado por um elétron e sua anti-partícula, o pósitron, que possui carga oposta e massa igual à do elétron. Ele é semelhante ao átomo de Hidrogênio, que possui um elétron e um próton. A energia do nível fundamental desses átomos é dada por:

$$E_I = \frac{-13,6}{\left(1 + \frac{m_e}{m_p}\right)} \text{ eV}$$

, onde m_e é a massa do elétron e m_p é a massa do pósitron, no caso do Positrônio, ou a massa do próton, no caso do átomo de Hidrogênio. Para o átomo de Hidrogênio, como a massa do próton é muito maior que a massa do elétron, $E_I = -13,6 \text{ eV}$.

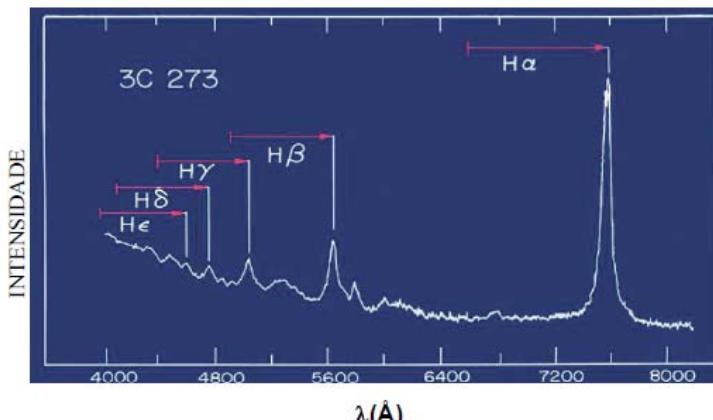
- a) Calcule a energia do nível fundamental do Positrônio.
- b) Ao contrário do átomo de Hidrogênio, o Positrônio é muito instável, pois o elétron pode se aniquilar rapidamente com a sua anti-partícula, produzindo fótons de alta energia, chamados raios gama.

Considerando que as massas do elétron e do positron são $m_e = m_p = 9 \times 10^{-31} \text{ kg}$, e que, ao se aniquilarem, toda a sua energia, dada pela relação de Einstein $E_p + E_e = m_e c^2 + m_p c^2$, é convertida na energia de dois fótons gama, calcule a energia de cada fóton produzido. A velocidade da luz é $c = 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$.

54) (UFT-08) Em um átomo, o primeiro nível, ocupado por um elétron, tem energia $E_1 = -2,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ e o segundo, desocupado, tem energia $E_2 = -1,3 \times 10^{-19} \text{ J}$. Ao ser iluminado com luz monocromática, de determinada frequência, esse átomo absorve um fóton e, com isso, o elétron passa do primeiro nível para o segundo. Sabe-se que o valor da constante de Planck é de $6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$. Considerando-se essas informações, é **CORRETO** afirmar que, na situação descrita, a frequência da luz incidente no átomo é de, **aproximadamente**,

- a) $1 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$.
- b) $2 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$.
- c) $3 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$.
- d) $4 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$.

55) (UFCG-09) Em 1963, Maarten Schmidt obteve linhas do espectro do átomo de Hidrogênio no espectro do objeto celeste QUASAR 3C 273 como se vê na figura.



A energia de um elétron para o nível n num átomo de Hidrogênio, em eV, é prevista pelo modelo de Bohr pela função: $E_n = -(13,6)/n^2$. Em relação à observação do espectro do QUASAR, pode-se afirmar, EXCETO, que:

- a) o comportamento do átomo de Hidrogênio no QUASAR é diferente do previsto pelo modelo de Bohr, pois $H\alpha$ (transição do elétron de $n=3$ para $n=2$) tem comprimento de onda diferente.
- b) o fóton de $H\alpha$ sofreu uma diminuição de sua frequência original.
- c) a posição da linha $H\alpha$ implica que o fóton teve seu comprimento de onda deslocado em sentido contrário à região do violeta.
- d) a velocidade do fóton da radiação da linha $H\alpha$ independe do movimento do QUASAR em relação à Terra.
- e) o espectro observado confirma que os níveis de energia para o átomo de Hidrogênio são discretos.

*Se necessário use $h=7 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

56) (UFCG-09) Em relação à Teoria da Relatividade Especial, pode-se afirmar que:

- a) as leis da física têm a mesma forma em todos os referenciais não inerciais.
- b) a duração de um evento só tem sentido se indicado o sistema de referência ao qual ela se refere.
- c) fontes luminosas em movimento apresentam diferentes valores da velocidade da luz para referenciais inerciais.
- d) duas naves espaciais estão viajando na mesma direção e sentido, uma com velocidade igual a $0,5c$ e outra com velocidade $0,8c$, o módulo da velocidade relativa entre elas é de $0,3c$.

e) no domínio relativístico, obtém-se a composição das velocidades v e v' de uma partícula, medidas em referenciais inerciais distintos, multiplicando-se o resultado segundo a relatividade de Galileu, pelo fator $(1 - vv'/c^2)$.

57) (UFCG-09) “Em um semicondutor, os elétrons encontram-se em duas bandas (níveis) de energia: uma denominada banda de valência, na qual eles estão ‘semi-livres’, e a outra chamada banda de condução, em que, como o nome diz, eles estão livres de seus átomos. Uma fonte externa de energia – corrente elétrica, por exemplo – pode bombar energia para o semicondutor e, assim, excitar os elétrons e os fazer passar da primeira para a segunda banda. Simplificando um processo que é complexo, podemos dizer que, na volta para a banda de valência, os elétrons devolvem ao meio a energia extra na forma de luz (fôtons), que acabam confinados ao próprio semicondutor, pois suas faces são bem polidas – em outras palavras, o semicondutor age como uma cavidade óptica. O aumento de corrente permite aumentar o número de elétrons excitados, aumentando, assim, a quantidade de luz emergente.” (*BAGNATO, Vanderlei Salvador. Laser. In: Física Hoje: uma aventura pela natureza: dos átomos ao universo. Rio de Janeiro: CiênciaHoje/CBPF, 2007, p.145-6.*)

Um laser violeta, utilizado na leitura dos *Blue Ray Discs* (BD), tem comprimento de onda igual a 405 nm. A energia mínima entre as bandas de valência e de condução do semicondutor que gera esse laser vale:

- a) 1,6 eV
- b) 3,2 eV.
- c) 4,1 eV
- d) 6,7 eV.
- e) 13,6 eV.

58) (UFC-09) Um avião militar “relativístico” voa com uma velocidade constante de $0,9 c$, onde c é a velocidade da luz no vácuo. Esse

avião dispara um míssil. O piloto observa que o míssil se afasta do avião com uma velocidade de $0,6 c$. No mesmo instante, um feixe de *laser* é disparado em relação ao avião com uma velocidade c . Assinale a alternativa que apresenta, respectivamente, os valores da velocidade do míssil e da velocidade do feixe de *laser*, percebidos por um observador em um referencial estacionário.

- a)** c e c .
- b)** $0,97 c$ e c .
- c)** $1,50 c$ e c .
- d)** $1,50 c$ e $1,90 c$.
- e)** $0,30 c$ e $0,10 c$.

(UEPB-09) Leia o texto V para responder às questões 59 e 60.

A relatividade proposta por Galileu e Newton na Física Clássica é reinterpretada pela Teoria da Relatividade Restrita, proposta por Albert Einstein (1879-1955) em 1905, que é revolucionária porque mudou as idéias sobre o espaço e o tempo, uma vez que a anterior era aplicada somente a referenciais inerciais. Em 1915, Einstein propôs a Teoria Geral da Relatividade válida para todos os referenciais (inerciais e não inerciais).

59) Acerca do assunto tratado no texto, podemos afirmar:

- I** - A Teoria da Relatividade afirma que a velocidade da luz não depende do sistema de referência.
- II** - Para a Teoria da Relatividade, quando o espaço dilata, o tempo contrai, enquanto que, para a física newtoniana, o espaço e o tempo sempre se mantêm absolutos.
- III** - A Mecânica Clássica e a Teoria da Relatividade não limitam a velocidade que uma partícula pode adquirir.

IV - Na relatividade de Galileu e Newton, o tempo não depende do referencial em que é medido, ou seja, é absoluto.

Após a análise feita, é (são) correta(s) a(s) proposição(ões):

a) II e III

b) I e IV

c) I , II e IV

d) III

e) III e IV

60) Ainda acerca do assunto tratado no texto, resolva a seguinte situação-problema: Considere uma situação “fictícia”, que se configura como uma exemplificação da relatividade do tempo. Um grupo de astronautas decide viajar numa nave espacial, ficando em missão durante seis anos, medidos no relógio da nave. Quando retornam a Terra, verifica-se que aqui se passaram alguns anos. Considerando que c é a velocidade da luz no vácuo e que a velocidade média da nave é $0,8c$, é correto afirmar que, ao retornarem a Terra, se passaram:

a) 20 anos

b) 10 anos

c) 30 anos

d) 12 anos

e) 6 anos

61) (UFJF-10) Fótoms de raios X, com energias da ordem de $1,98 \cdot 10^{-15} \text{ J}$, são utilizados em experimentos de difração com cristais. Nesses experimentos, o espaçamento entre os átomos do cristal é da ordem do comprimento de onda dos raios X. Em 1924, Louis de Broglie

apresentou a teoria de que a matéria possuía tanto características corpusculares como ondulatórias. A teoria de Louis de Broglie foi comprovada por um experimento de difração com cristais, utilizando-se um feixe de elétrons no lugar de um feixe de raios X. Considere: a constante de Planck $h=6,60 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$; a velocidade da luz no vácuo $c=3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; massa do elétron $m=9,10 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ e $1 \text{ eV}=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

- a) Calcule o valor do espaçamento entre os átomos do cristal, supondo que o valor do espaçamento é igual ao comprimento de onda dos raios X com energia $1,98 \cdot 10^{-15} \text{ J}$.
- b) Calcule o valor da quantidade de movimento dos elétrons utilizados no experimento de difração com o cristal, cujo espaçamento entre os átomos foi determinado no item anterior. Despreze os efeitos relativísticos no movimento dos elétrons.
- c) Calcule o valor aproximado da energia cinética dos elétrons, em eletron-volts, neste experimento.

62) (UFC-10) Em relação a um sistema de referência em repouso, dois elétrons movem-se em sentidos opostos, ao longo da mesma reta, com velocidades de módulos iguais a $c/2$. Determine a velocidade relativa de aproximação entre os elétrons. Em seguida, assinale a alternativa que apresenta corretamente essa velocidade.

- a) $c/2$
- b) $3c/4$
- c) $3c/5$
- d) $4c/5$
- e) c

63) (ITA-10) No processo de fotossíntese, as moléculas de clorofila do tipo a nas plantas verdes apresentam um pico de absorção da radiação eletromagnética no comprimento de onda $\lambda=6,80 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Considere

que a formação de glicose ($C_6H_{12}O_6$) por este processo de fotossíntese é descrita, de forma simplificada, pela reação:



Sabendo-se que a energia total necessária para que uma molécula de CO_2 reaja é de $2,34 \cdot 10^{-18} J$, o número de fótons que deve ser absorvido para formar uma molécula de glicose é:

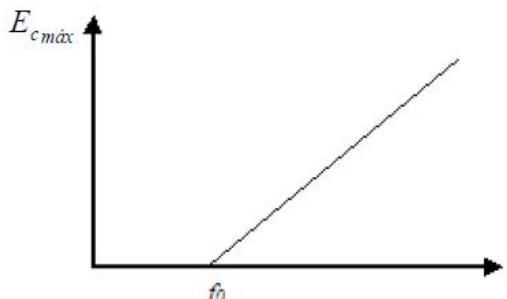
Dados: $h=6,62 \cdot 10^{-34} J \cdot s$; $c=3 \cdot 10^8 m/s$

- a) 8.
- b) 24.
- c) 48.
- d) 120.
- e) 240.

64) (UFU-10) O lançamento de satélites e de sondas espaciais demanda muito propelente, isto é, uma mistura de combustível e combustível, que, ao liberar gases, faz o foguete se mover. Contudo, graças às tecnologias atuais, quando o satélite ou a sonda espacial entra em órbita, é possível manter parte do seu funcionamento sem a utilização do propelente. Esta fonte extra de energia é obtida por meio de *células solares*, que convertem energia solar em eletricidade. Um dos fenômenos físicos envolvidos no funcionamento das células solares é o efeito fotoelétrico. A equação que descreve o efeito fotoelétrico é dada por

$$hf = W + E_{c\max},$$

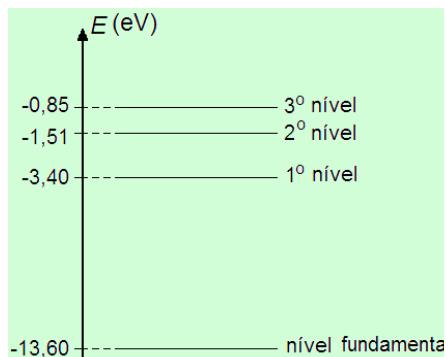
em que a energia do fóton incidente é dada por hf , sendo h a constante de Planck e f a frequência do fóton; W é a função trabalho da superfície emissora, que significa a energia necessária para arrancar o elétron da superfície do metal; e $E_{c\max}$ é a energia cinética máxima que o elétron pode ter. Qualitativamente, os resultados experimentais podem ser descritos pelo seguinte gráfico:



Com base nas informações dadas, marque, para as afirmativas abaixo, (V) Verdadeira, (F) Falsa ou (SO) Sem Opção. Considere $h=6.10^{-34}\text{J.s}$.

- I () O efeito fotoelétrico não pode ser explicado corretamente pela Física Clássica, mas pela Mecânica Quântica.
- II () Para explicar o efeito fotoelétrico, Albert Einstein criou o conceito de fóton, que significa um quantum de energia da luz.
- III () A remoção dos elétrons do metal ocorre qualquer que seja o valor de frequência da radiação incidente.
- IV () Se a frequência da onda incidente for $f=f_0=4,0 \times 10^{14}\text{Hz}$, a função trabalho será dada por $W=2,4 \times 10^{-19}\text{J}$.

- 65) (UFRN-10)** Sobre um átomo de hidrogênio no estado fundamental, incidem três fótons, cujas energias, em eletrovolt (eV), são, respectivamente, 13,20, 12,09 e 10,20. Uma vez num estado excitado, o átomo de hidrogênio decairá, emitindo energia na forma de fótons. Na figura ao lado, estão representadas as energias dos quatro primeiros níveis de energia do átomo de hidrogênio.



A partir dessas informações:

- a)** determine quais desses fótons incidentes podem ser absorvidos pelo átomo de hidrogênio no estado fundamental e explice qual o estado final do átomo em cada caso;
- b)** represente, na figura localizada no *Espaço destinado à Resposta*, as possíveis transições dos elétrons que se encontram nos níveis excitados, após a emissão dos respectivos fótons;
- c)** determine as energias dos fótons emitidos.

66) (UFRN-10) Os óculos de visão noturna detectam a radiação infravermelha emitida ou refletida pelos corpos. Esses equipamentos são bastante utilizados em aplicações militares, em navegação, e também por pesquisadores, que, com o auxílio deles, podem detectar animais na mata durante a noite, entre outras aplicações. Um desses tipos de óculos, que utiliza a técnica da imagem térmica, opera por meio da captura do espectro luminoso infravermelho, emitido, na forma de calor, pelos objetos. A teoria física que explica a emissão de radiação pelos corpos, e na qual se baseia o funcionamento dos óculos de visão noturna, é a teoria:

- a)** do efeito fotoelétrico, de Einstein.
- b)** do átomo, de Bohr.
- c)** da dualidade onda-partícula, de De Broglie.
- d)** da radiação do corpo negro, de Planck.

67) (UFPE-10) Quando um feixe de luz de comprimento de onda $4,0 \times 10^{-7} \text{ m}$ ($E_{\text{fóton}} = 3,0 \text{ eV}$) incide sobre a superfície de um metal, os fotoelétrrons mais energéticos têm energia cinética igual a $2,0 \text{ eV}$. Suponha que o comprimento de onda dos fótons incidentes seja reduzido à metade. Qual será a energia cinética máxima dos fotoelétrrons, em eV?

68) (UFPB-11) A Relatividade Especial é uma teoria muito bem consolidada experimentalmente, inclusive tendo aplicações dela no cotidiano. Um exemplo bastante expressivo é o aparelho de navegação GPS, o qual está baseado na Relatividade Especial, e é construído com a finalidade de proporcionar orientação espacial com precisão. Com base nos conceitos da Relatividade Especial, identifique as afirmativas corretas:

- I.** A velocidade da luz no vácuo é a mesma em todas as direções e em todos os referenciais iniciais e não depende do movimento da fonte ou do observador.
- II.** As leis da Física dependem do referencial inercial escolhido.
- III.** Dois observadores em movimento relativo não concordam, em geral, quanto à simultaneidade entre dois eventos.
- IV.** O tempo próprio é o intervalo de tempo entre dois eventos que ocorrem no mesmo ponto em um determinado referencial inercial, medido nesse referencial.
- V.** O comprimento próprio de um objeto é aquele medido em um referencial no qual ele está em repouso.

69) (UFPA-10) Em uma gincana colegial sobre o tema Física Moderna, os participantes deveriam identificar as afirmativas corretas entre as transcritas abaixo.

- I.** A expressão $\lambda' - \lambda = \lambda_0 (1 - \cos \theta)$ descreve operacionalmente o Efeito Compton, em que λ' é o comprimento de onda da radiação que sofreu espalhamento, λ é o comprimento de onda incidente e λ_0 é a constante de Compton. Essa expressão prediz ser o aumento do comprimento de onda da radiação espalhada dependente do ângulo de espalhamento θ .
- II.** Segundo Einstein, a energia cinética máxima dos fotoelétrons emitidos pela superfície metálica deverá ser uma função linear da frequência da radiação eletromagnética incidente.

III. A relação $E = h f$, com f sendo a frequência de oscilação e h a constante de Planck, expressa operacionalmente o Postulado de Planck.

IV. Os raios X possuem natureza ondulatória, sendo ondas longitudinais, e dessa forma não podem ser polarizadas por espalhamento.

Ao analisar essas afirmativas, os participantes da gincana deveriam concluir que as afirmativas corretas estão nos itens

- a)** II e IV
- b)** I e II
- c)** II, III e IV
- d)** I, II e III
- e)** I, III e IV

70) (UEPB-11) No ano de 1927, Werner Heisenberg (1901-1976) formula o princípio da incerteza, o qual passou a ser considerado um dos pilares da Mecânica Quântica. Com base neste princípio de Heisenberg, analise as afirmativas abaixo:

I - A incerteza é uma limitação do instrumento de medida.

II - É impossível medir simultaneamente a posição e a velocidade de uma partícula.

III - A imprecisão entre as medidas de posição e velocidade a que Heisenberg se refere está relacionada ao mundo macroscópico.

Após a análise feita, conclui-se que é(são) correta(s) apenas a(s) proposição(ões)

- a)** II e III.
- b)** II.
- c)** I.
- d)** I e III.
- e)** III.

71) (UEPB-11-mod.) Considerando o princípio de Incerteza de Heisenberg, que \hbar é a constante de Planck e que um elétron que tem massa $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg se move na direção do eixo x com velocidade de $4 \cdot 10^6$ m/s, se a medida da velocidade apresenta uma incerteza de 2% e admitindo-se que $\hbar/4\pi = 5,3 \cdot 10^{-35}$ J.s, a incerteza na medida da posição desse elétron é maior ou igual a:

a) $7,3 \cdot 10^{-10}$ m

b) $1,3 \cdot 10^5$ m

c) $7,3 \cdot 10^{-4}$ m

d) $6,2 \cdot 10^{-36}$ m

e) $6,2 \cdot 10^{-28}$ m

72) (UFPI-11) Luz com comprimento de onda de $2,6 \cdot 10^{-7}$ m incide sobre uma placa metálica e fotoelétrons são produzidos, passando a se mover com velocidade de $8,0 \cdot 10^5$ m/s. Pode-se afirmar que o comprimento de onda de corte (isto é, o comprimento de onda acima do qual não ocorre o efeito fotoelétrico) vale aproximadamente:

Dados: $\hbar=6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s; $c=3 \cdot 10^8$ m/s; $m_{\text{elétron}}=9,1 \cdot 10^{-31}$ kg

a) $1,8 \cdot 10^{-7}$ m

b) $2,9 \cdot 10^{-7}$ m

c) $3,7 \cdot 10^{-7}$ m

d) $4,2 \cdot 10^{-7}$ m

e) $5,5 \cdot 10^{-7}$ m

73) (UFPI-11) Sobre as propriedades dos efeitos fotoelétrico e Compton e do princípio da incerteza de Werner Heisenberg, analise as seguintes afirmativas e coloque V, para verdadeiro, ou F, para falso.

1 () Os efeitos fotoelétrico e Compton evidenciam o caráter corpuscular da radiação eletromagnética.

2 () O efeito Compton pode produzir fotoelétrons, se a energia transferida para o elétron for suficiente para ejetá-lo do material.

3 () A frequência de corte (isto é, a frequência mínima da radiação abaixo da qual não há efeito fotoelétrico) é determinada através da energia de ligação dos elétrons do material.

4 () Na mecânica clássica, uma partícula pode ser localizada com incerteza nula na posição ($\Delta x=0$) e incerteza nula no seu momento ($\Delta p_x=0$), simultaneamente, mas, na teoria quântica, esta proposição é válida apenas no limite de temperatura absoluta, T, igual a zero.

74) (UFC) De acordo com Einstein, um feixe de luz é composto de fótons (partículas de luz). Cada fóton transporta uma quantidade de energia proporcional à frequência da onda associada a esse feixe de luz. Considere dois feixes de luz, 1 e 2, com comprimentos de onda λ_1 e λ_2 , respectivamente, com $\lambda_1=\lambda_2/4$. Sejam E_1 , a energia dos fótons do feixe 1 e E_2 , a energia dos fótons do feixe 2. Assinale a alternativa correta.

a) $E_1 = 4E_2$

b) $E_1 = 2E_2$

c) $E_1 = E_2$

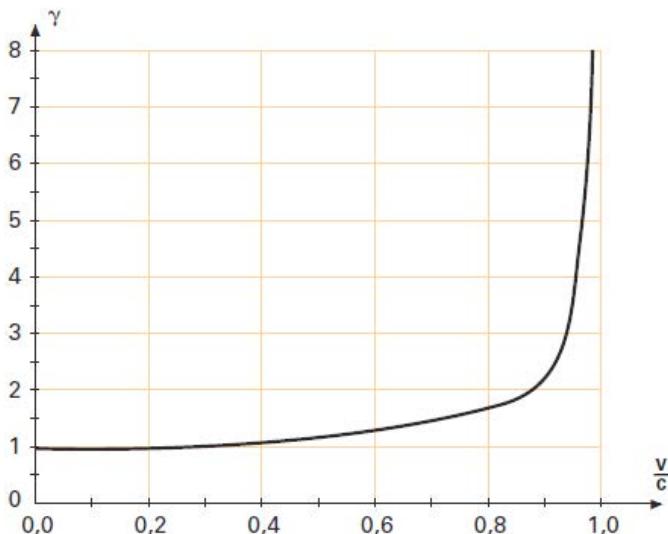
d) $E_1 = 0,5E_2$

e) $E_1 = 0,25E_2$

75) (UFRN) André está parado com relação a um referencial inercial, e Regina está parada com relação a outro referencial inercial, que se move com velocidade (vetorial) constante em relação ao primeiro. O módulo dessa velocidade é v . André e Regina vão medir o intervalo de tempo entre dois eventos que ocorrem no local onde esta se encontra. (Por exemplo, o intervalo de tempo transcorrido entre o instante em que um pulso de luz é emitido por uma lanterna na mão de Regina e o instante em que esse pulso volta à lanterna, após ser refletido por um

espelho.) A teoria da relatividade restrita nos diz que, nesse caso, o intervalo de tempo medido por André ($\Delta t_{\text{André}}$) está relacionado ao intervalo de tempo medido por Regina (Δt_{Regina}) através da expressão $\Delta t_{\text{André}} = \gamma \Delta t_{\text{Regina}}$. Nessa relação, a letra gama denota o fator de Lorentz.

O gráfico abaixo representa a relação entre γ e v/c , na qual c é a velocidade da luz no vácuo.



Imagine que, realizadas as medidas e comparados os resultados, fosse constatado que $\Delta t_{\text{André}} = 2\Delta t_{\text{Regina}}$. Usando essas informações, é possível estimar-se que, para se obter esse resultado, a velocidade v teria de ser aproximadamente:

- a) 50% da velocidade da luz no vácuo.
- b) 87% da velocidade da luz no vácuo.
- c) 105% da velocidade da luz no vácuo.
- d) 20% da velocidade da luz no vácuo.

76) (PUC-RJ) Uma superfície quente emite radiação em toda a faixa do espectro eletromagnético. Para dada temperatura absoluta T da

superfície, o comprimento de onda λ_M da radiação na qual a intensidade da emissão é máxima é dada por $\lambda_M = C/T$, em que $C = 0,29 \cdot 10^{-2}$ m.K. A temperatura média da pele humana é de 27 °C. Em que comprimento de onda a pele emite com intensidade máxima?

77) Um feixe de luz incide em uma lâmina de metal, provocando a emissão de alguns elétrons. A respeito desse fenômeno, denominado de efeito fotoelétrico, é correto afirmar que;

- a) qualquer que seja a frequência da luz incidente, é possível que sejam arrancados elétrons do metal.
- b) quaisquer que sejam a frequência e a intensidade da luz, os elétrons são emitidos com a mesma energia cinética.
- c) quanto maior a intensidade da luz de uma determinada frequência incidindo sobre o metal, maiores são as energias com que os elétrons abandonam o metal.
- d) quanto maior a frequência da luz de uma determinada intensidade incidindo sobre o metal, maiores são as energias com que os elétrons abandonam o metal.
- e) quanto maior a frequência da luz de uma determinada intensidade incidindo sobre o metal, mais elétrons abandonam o metal.

78) (ITA) Dobrando-se a energia cinética de um elétron não-relativístico, o comprimento de onda original de sua função de onda fica multiplicado por:

- a) $\frac{1}{\sqrt{2}}$
- b) $\frac{1}{2}$
- c) $\frac{1}{4}$
- d) $\sqrt{2}$
- e) 2

79) (Ufla-MG) Quando aceleramos um elétron até que ele atinja uma velocidade $v = 0,5c$, em que c é a velocidade da luz, o que acontece com a massa?

- a)** Aumenta, em relação à sua massa de repouso, por um fator $g = \frac{I}{\sqrt{0,75}}$
- b)** Aumenta, em relação à sua massa de repouso, por um fator $g = \frac{I}{\sqrt{0,5}}$
- c)** Diminui, em relação à sua massa de repouso, por um fator $g = \sqrt{0,75}$
- d)** Diminui, em relação à sua massa de repouso, por um fator $g = \sqrt{0,5}$
- e)** Não sofre alteração.

80) (UFMG) O principal processo de produção de energia na superfície do Sol resulta da fusão de átomos de hidrogênio para formar átomos de hélio. De uma forma bem simplificada, esse processo pode ser descrito como a fusão de quatro átomos de hidrogênio ($m_H = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$) para formar um átomo de hélio ($m_{He} = 6,65 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$). Suponha que ocorram 10^{38} reações desse tipo a cada segundo. Com base nas suposições feitas, calcule a quantidade de energia liberada a cada segundo.

81) (UPE-12) Ao se incidir luz de frequência f sobre um átomo de hidrogênio, o elétron sai do estado fundamental para o 2º estado excitado. Sobre isso, assinale a alternativa CORRETA.

- a)** A diferença de energia entre o 2º estado excitado e o estado fundamental precisa ser necessariamente igual a hf , em que h é a constante de Planck.
- b)** O sistema tende a retornar à situação de menor energia, logo o elétron irá retornar ao estado fundamental, emitindo um fóton cuja frequência é necessariamente f .
- c)** O elétron continuará no segundo estado excitado, pois não há como ele perder energia.
- d)** O elétron irá voltar para o estado fundamental, emitindo um fóton de energia menor ou igual a hf .

e) Ao ser excitado pela luz, o elétron foi para a segunda camada de energia.

82) (ITA-12) Considere as seguintes afirmações:

I. As energias do átomo de Hidrogênio do modelo de Bohr satisfazem a relação, $E_n = -13,6/n^2$ eV, com $n = 1, 2, 3, \dots$; portanto, o elétron no estado fundamental do átomo de Hidrogênio pode absorver energia menor que 13,6 eV.

II. Não existe um limiar de frequência de radiação no efeito fotoelétrico.

III. O modelo de Bohr, que resulta em energias quantizadas, viola o princípio da incerteza de Heisenberg.

Então, pode-se afirmar que:

- a)** apenas a II é incorreta.
- b)** apenas a I e II são corretas.
- c)** apenas a I e III são incorretas.
- d)** apenas a I é incorreta.
- e)** todas são incorretas.

83) (UFRN-12) Descoberto independentemente pelo russo Alexandre Stoletov, em 1872, e pelo alemão Heinrich Hertz, em 1887, o efeito fotoelétrico tem atualmente várias aplicações tecnológicas principalmente na automação eletro mecânica, tais como: portas automáticas, dispositivos de segurança de máquinas e controle de iluminação. Fundamentalmente, o efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons por superfícies metálicas quando iluminadas por radiação eletromagnética.

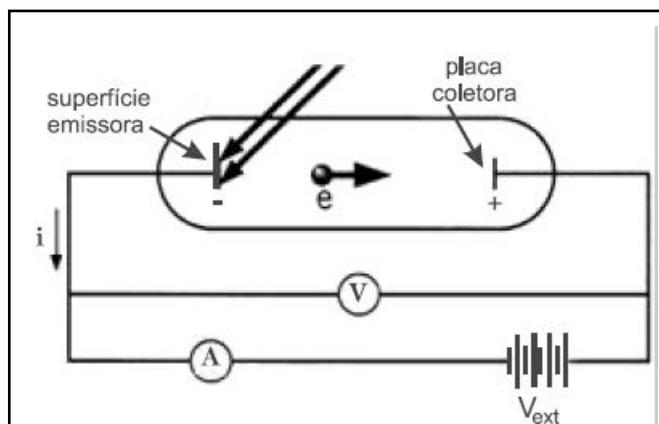
Dentre as principais características observadas experimentalmente, destacamos:

1) Por menor que seja a intensidade da radiação causadora do fenômeno, o intervalo de tempo entre a incidência da radiação e o aparecimento da corrente gerada pelos elétrons emitidos é totalmente desprezível, isto é, o efeito é praticamente instantâneo.

2) Para cada superfície metálica específica, existe uma frequência mínima, chamada “frequência de corte”, a partir da qual se verifica o fenômeno.

3) Se a frequência da radiação incidente está abaixo da frequência de corte, mesmo aumentando sua intensidade, não se verifica o fenômeno. Por outro lado, para frequências da radiação incidente acima da frequência de corte, o fenômeno se verifica para qualquer intensidade.

A Figura representa um dispositivo para o estudo efeito fotoelétrico. Nela, elétrons são arrancados da superfície emissora, devido à radiação incidente, e acelerados em direção à placa coletora pelo campo elétrico, gerando uma corrente elétrica que é medida pelo amperímetro, A.



Diante do exposto, responda as questões abaixo:

a) Como se explica o comportamento observado no item 1 do texto? Justifique sua resposta.

b) Como se explica o comportamento observado no item 2 do texto? Justifique sua resposta.

c) Como se explica o comportamento observado no item 3 do texto? Justifique sua resposta.

84) (UFPE-12) Com relação à teoria da relatividade especial e aos modelos atômicos podemos afirmar que:

I) A velocidade da luz no vácuo independe da velocidade da fonte de luz.

II) As leis da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais. A única exceção ocorre em fenômenos físicos que ocorram sob gravidade nula.

III) É impossível determinar simultaneamente a velocidade e a posição do elétron no átomo de hidrogênio.

IV) No modelo de Bohr do átomo de hidrogênio o elétron não irradia quando se encontra nas órbitas estacionárias, isto é, naquelas órbitas onde o momento linear do elétron é um múltiplo inteiro da constante de Planck.

V) Para ionizar o átomo de hidrogênio, no seu estado fundamental, isto é, separar completamente o elétron do núcleo, gasta-se uma energia menor do que 10 eV.

85) (UFRN-12) Estudantes interessados em analisar a natureza dual da luz preparavam uma apresentação para uma Feira de Ciências com três experimentos, conforme mostrados nas Figuras abaixo.



- o **1º experimento** mostra a difração da luz ao passar por uma fenda estreita;
- o **2º experimento** mostra o efeito fotoelétrico caracterizado pela geração de corrente elétrica a partir da incidência de luz sobre uma célula fotoelétrica; e
- o **3º experimento** mostra o efeito da polarização da luz ao fazê-la incidir sobre filtros polarizadores.

A partir desses experimentos, é correto afirmar que:

- a)** o efeito fotoelétrico e a polarização evidenciam a natureza ondulatória da luz, enquanto a difração evidencia a natureza corpuscular da luz.
- b)** a polarização e a difração evidenciam a natureza corpuscular da luz, enquanto o efeito fotoelétrico evidencia a natureza ondulatória da luz.
- c)** a difração e a polarização evidenciam a natureza ondulatória da luz, enquanto o efeito fotoelétrico evidencia a natureza corpuscular da luz.
- d)** o efeito fotoelétrico e a difração evidenciam a natureza ondulatória da luz, enquanto a polarização evidencia a natureza corpuscular da luz.

86) (UFPB-12) A Física Moderna no campo da Mecânica Quântica tem explicado com sucesso muitas características das partículas subatômicas, tais como elétron, próton e nêutron. Uma boa parte da tecnologia moderna opera a uma escala em que os efeitos quânticos são significativos. Exemplos incluem o laser, o microscópio eletrônico e a supercondutividade.

Com relação a efeitos quânticos, identifique as afirmativas corretas:

- I.** O valor extremamente pequeno da constante de Planck faz com que os efeitos quânticos só se revelem em escalas atômicas.
- II.** A energia do átomo de hidrogênio só pode apresentar valores discretos.
- III.** O efeito fotoelétrico só pode ser explicado se a luz for considerada como uma onda.
- IV.** O princípio da incerteza de Heisenberg implica que quanto menor for a incerteza na medida da posição de uma partícula maior será a indeterminação na medida da quantidade de movimento daquela partícula.
- V.** O elétron, no interior de um átomo, comporta-se como uma onda de matéria.

87) (UFJF-12) Suponha que um amigo seu, que nasceu no mesmo dia e hora que você nasceu, a bordo de uma nave espacial, tenha viajado com velocidade constante até um planeta que está a 4 anos-luz da Terra e imediatamente retorne. Ele afirma que a viagem toda durou *6 anos*. Baseado no conceito relativístico da dilatação dos tempos, calcule:

- a)** a velocidade da nave.
- b)** o tempo total da viagem no referencial da Terra.
- c)** a diferença de idade entre vocês dois quando voltarem a se encontrar.

88) (UFJF-12) No ano *2000*, a usina hidrelétrica de Itaipu atingiu a produção histórica de *93.428 GWh*, na época um recorde mundial de produção de energia elétrica. De acordo com a teoria da relatividade, a conversão da massa de repouso m_0 em energia é dada pela fórmula $E=m_0c^2$, em que $c = 3,0 \cdot 10^8 m/s$ é a velocidade da luz no vácuo. Se um ovo de galinha de massa $m_0=100 g$ fosse, hipoteticamente, transformado em energia elétrica, quantos ovos, aproximadamente, seriam

necessários para obter a mesma energia produzida por Itaipu na ocasião da sua produção histórica? Admita que $1 \text{ GWh} = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ J}$.

- a) 2.525 ovos . b) 252 ovos . c) 58 ovos .
d) 37 ovos . e) 17 ovos .

89) (UFJF-12) Um feixe de luz laser, de comprimento de onda $\lambda=400\text{nm}=400 \cdot 10^{-9}\text{m}$, tem intensidade luminosa $I=100\text{W/m}^2$. De acordo com o modelo corpuscular da radiação, proposto por Einstein, em 1905, para explicar fenômenos da interação da radiação com a matéria, a luz é formada por *quanta* de energias denominados fótons. Usando como base esse modelo quântico da luz, calcule: (dados: $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; $h \approx 4 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$ e $e=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

- a) a energia de cada fóton do feixe de luz laser em elétron-volt.
b) a energia que incide sobre uma área de 1 cm^2 perpendicular ao feixe durante um intervalo de tempo de $1,0 \text{ s}$, *em joules*.
c) o número n de fótons que atingem essa área durante esse intervalo de tempo.

90) (UPE-12-mod) De acordo com os postulados da relatividade restrita, analise as afirmações abaixo:

- I.** As leis, que governam as mudanças de estado para quaisquer sistemas físicos, são variantes em quaisquer sistemas de coordenadas inerciais.
- II.** A velocidade da luz é invariante, independentemente do meio isotrópico em que se movimenta.
- III.** A velocidade da luz, num certo meio, é invariante para qualquer sistema de coordenadas inerciais.
- IV.** A velocidade da luz no vácuo é superior a $3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

V. O interferômetro de Michelson-Morley não permite verificar a invariância da velocidade da luz em diferentes referenciais.

Está CORRETO o que se afirma em:

- a)** I e III.
- b)** I e IV.
- c)** II e III.
- d)** IV.
- e)** I, II, III, IV e V.

91) (UPE-12) Sobre o Princípio da Incerteza de Heisenberg, analise as proposições a seguir:

I. Se uma medida da posição for feita com precisão Δx e se uma medida simultânea da quantidade de movimento for feita com precisão Δp , então o produto das duas incertezas nunca poderá ser menor do que , $\frac{h}{4\pi}$ ou seja, $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$.

II. Quanto maior a precisão na determinação da posição do elétron, menor é a precisão na determinação de sua velocidade (ou de sua quantidade de movimento) e vice-versa.

III. O princípio afirma que há um limite real para a precisão das medições simultâneas da posição e da quantidade de movimento. Esse limite provém da própria estrutura quântica da matéria e das imperfeições dos instrumentos de medida utilizados.

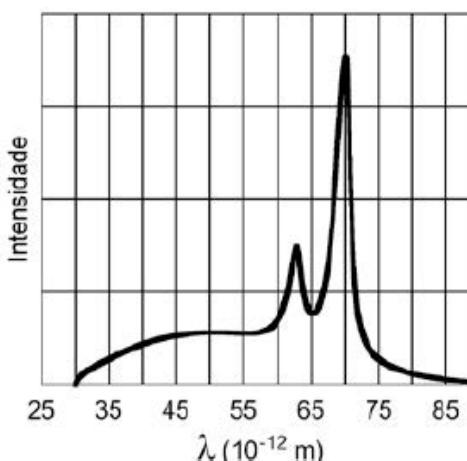
IV. O princípio fundamenta-se na ação do observador sobre o objeto observado; logo, ele é uma manifestação da impossibilidade de se ignorar a interação entre o observador e o objeto observado.

V. Esse princípio se torna irrelevante na interpretação de experiências que lidam com objetos macroscópicos, mas se torna relevante na interpretação de experiências que lidam com partículas subatômicas, como os elétrons.

Estão CORRETAS:

- a) I, II, III, IV e V.
- b) I e II, apenas.
- c) I, II e V, apenas.
- d) I, II, IV e V, apenas.
- e) I, II e IV, apenas.

92) (Unicamp-12-mod) Raios X, descobertos por Röntgen em 1895, são largamente utilizados como ferramenta de diagnóstico médico por radiografia e tomografia. Além disso, o uso de raios X foi essencial em importantes descobertas científicas, como, por exemplo, na determinação da estrutura do DNA. Em um dos métodos usados para gerar raios X, elétrons colidem com um alvo metálico perdendo energia cinética e gerando fótons de energia $E=hf$, sendo $h=6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ e f a frequência da radiação. A figura abaixo mostra a intensidade da radiação emitida em função do comprimento de onda, λ . Se toda a energia cinética de um elétron for convertida na energia de um fóton, obtemos o fóton de maior energia. Nesse caso, a frequência do fóton torna-se a maior possível, ou seja, acima dela a intensidade emitida é nula. Marque na figura o comprimento de onda correspondente a este caso e calcule a energia cinética dos elétrons incidentes. Considere $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.



93) (UEPB-12) A energia nuclear resulta de processos de transformação de núcleos atômicos. Alguns isótopos de certos elementos apresentam a capacidade de se transformar em outros isótopos ou elementos através de reações nucleares. Baseia-se no princípio da equivalência de energia e massa, observado por Albert Einstein, e foi descoberta por Hahn, Frita e Meitner com a observação de uma fissão nuclear depois da irradiação de urânio com nêutrons. (*Adaptado de http://pt.wikipedia.org/wiki/Titz_Stra%39Fmann*)

Com base cm seus conhecimentos relacionados à energia nuclear, é correto afirmar que:

- a)** Nas reações de fissão nuclear, como acontece nas usinas, há um aumento de massa do núcleo que é transformada em energia.
- b)** A energia irradiada pelo sol, quando os átomos de hidrogênio e de outros elementos leves se combinam, se dá pelo processo da fusão nuclear e não pela fissão nuclear.
- c)** Nas reações de fusão nuclear, devido à quebra de átomos mais pesados, há um aumento de massa do núcleo que é transformada em energia.
- d)** A energia irradiada pelas estrelas, quando os átomos de hidrogênio e de outros elementos leves se combinam, se dá pelo processo de fissão nuclear.
- e)** A luz e calor irradiados pelo Sol, quando os átomos de hidrogênio e de outros elementos leves se combinam, se dão pelo processo de fissão nuclear.

94) (FUVEST-12) Em um laboratório de física, estudantes fazem um experimento em que radiação eletromagnética de comprimento de onda $\lambda=300\text{nm}$ incide em uma placa de sódio, provocando a emissão de elétrons. Os elétrons escapam da placa de sódio com energia cinética máxima $E_C = E - W$, sendo E a energia de um fóton da radiação e W a energia mínima necessária para extrair um elétron da placa. A energia de cada fóton é $E = h f$, sendo h a constante de Planck e f a frequência da radiação.

NOTE E ADOTE

Velocidade da radiação eletromagnética: $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$$

$$h = 4 \times 10^{-15} \text{ eVs}$$

$$W(\text{sódio}) = 2,3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Determine:

- a)** a frequência f da radiação incidente na placa de sódio;
- b)** a energia E de um fóton dessa radiação;
- c)** a energia cinética máxima E_C de um elétron que escapa da placa de sódio;
- d) a frequência f_o da radiação eletromagnética, abaixo da qual é impossível haver emissão de elétrons da placa de sódio.

95) (UFMG-12) Considere que, no ano de 2222, um trem expresso passa por uma estação à velocidade de $0,2c$, em que c é a velocidade da luz. Henrique está dentro desse trem, em um vagão que mede 30 m de comprimento. Quando o trem está passando pela estação, Henrique liga um *laser* situado no fundo do vagão. Esse *laser* emite um pulso de luz, que é refletido por um espelho posicionado na frente do vagão, retorna e atinge um detector situado junto ao *laser*.

- a)** No referencial de Henrique, **CALCULE** o intervalo de tempo entre o pulso sair do *laser* e atingir o detector.
- b)** Enquanto isso, Alberto, parado na estação, vê o trem passar. Considerando essa informação, responda: Qual é a velocidade do pulso de luz do *laser* medida no referencial de Alberto?

96) (ITA-04) Num experimento que usa o efeito fotoelétrico, ilumina-se sucessivamente a superfície de um metal com luz de dois comprimentos de onda diferentes, λ_1 e λ_2 , respectivamente. Sabe-se que as velocidades máximas dos fotoelétrons emitidos são, respectivamente,

v_1 e v_2 , em que $v_1 = 2v_2$. Designando c a velocidade da luz no vácuo, e h a constante de Planck, pode-se, então, afirmar que a função trabalho do metal é dada por:

a) $\frac{(2\lambda_1 - \lambda_2)hc}{\lambda_1\lambda_2}$

b) $\frac{(\lambda_2 - 2\lambda_1)hc}{\lambda_1\lambda_2}$

c) $\frac{(\lambda_2 - 4\lambda_1)hc}{3\lambda_1\lambda_2}$

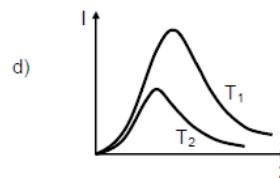
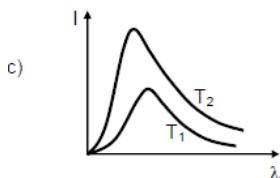
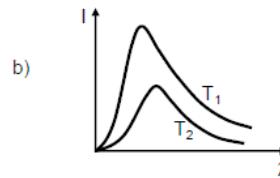
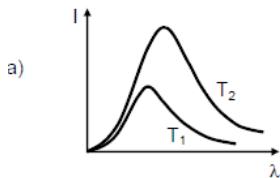
d) $\frac{(4\lambda_1 - \lambda_2)hc}{3\lambda_1\lambda_2}$

e) $\frac{(2\lambda_1 - \lambda_2)hc}{3\lambda_1\lambda_2}$

97) Considerando os processos que ocorrem na lâmpada fluorescente, podemos afirmar que a explicação para a emissão de luz envolve o conceito de:

- a) colisão elástica entre elétrons e átomos de mercúrio.
- b) efeito fotoelétrico.
- c) modelo ondulatório para radiação.
- d) níveis de energia dos átomos.
- e) relatividade geral.

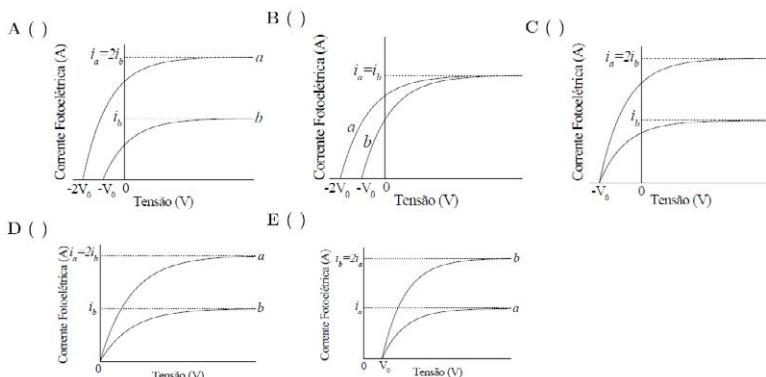
98) (UFV-11) A intensidade I da radiação eletromagnética emitida por um bloco de ferro à temperatura T depende do comprimento de onda λ da radiação. A alternativa que representa CORRETAMENTE os comportamentos da intensidade emitida pelo bloco em função do comprimento de onda, para duas temperaturas diferentes T_1 e T_2 ($T_1 < T_2$), é:



99) (UFV-11) Ao observar o espectro eletromagnético de uma galáxia distante, percebeu-se que os comprimentos de onda da luz emitida por alguns elementos químicos existentes na galáxia eram maiores que os comprimentos de onda emitidos pelos mesmos elementos aqui na Terra. É CORRETO afirmar que este fenômeno pode ser explicado:

- a)** pela refração da luz devido à atmosfera terrestre.
- b)** pela interferência da luz devido aos elementos óticos do telescópio.
- c)** pela dispersão da luz no vácuo devido à luz não ser monocromática.
- d)** pelo efeito Doppler da luz devido à expansão do universo.

100) (ITA-11) O aparato para estudar o efeito fotoelétrico mostrado na figura consiste de um invólucro de vidro que encerra o aparelho em um ambiente no qual se faz vácuo. Através de uma janela de quartzo, luz monocromática incide sobre a placa de metal P e libera elétrons. Os elétrons são então detectados sob a forma de uma corrente, devido à diferença de potencial V estabelecida entre P e Q. Considerando duas situações distintas a e b, nas quais a intensidade da luz incidente em a é o dobro do caso b, assinale qual dos gráficos abaixo representa corretamente a corrente fotoelétrica em função da diferença de potencial.



101) (UPE-12) De acordo com os postulados da relatividade restrita, analise as afirmações abaixo:

- I.** As leis, que governam as mudanças de estado para quaisquer sistemas físicos, são variantes em quaisquer sistemas de coordenadas inerciais.
- II.** A velocidade da luz é invariante, independentemente do meio.
- III.** A velocidade da luz, num certo meio, é invariante para qualquer sistema de coordenadas inerciais.
- IV.** A velocidade da luz no vácuo é superior a $3 \cdot 10^8$ m/s.
- V.** O interferômetro de Michelson-Morley não permite verificar a invariância da velocidade da luz em diferentes referenciais.

Está **CORRETO** o que se afirma em:

- a)** I e III.
- b)** I e IV.
- c)** II e III.
- d)** IV.
- e)** I, II, III, IV e V.

102) (UPE-12) Ao se incidir luz de frequência f sobre um átomo de hidrogênio, o elétron sai do estado fundamental para o 2º estado excitado. Sobre isso, assinale a alternativa CORRETA.

- a)** A diferença de energia entre o 2º estado excitado e o estado fundamental precisa ser necessariamente igual a hf , em que h é a constante de Planck.
- b)** O sistema tende a retornar à situação de menor energia, logo o elétron irá retornar ao estado fundamental, emitindo um fóton cuja frequência é necessariamente f .
- c)** O elétron continuará no segundo estado excitado, pois não há como ele perder energia.

d) O elétron irá voltar para o estado fundamental, emitindo um fóton de energia menor ou igual a hf .

e) Ao ser excitado pela luz, o elétron foi para a segunda camada de energia.

103) (UFPE-12) Com relação à teoria da relatividade especial e aos modelos atômicos julgue como Verdadeiro ou Falso as assertivas abaixo.

I) A velocidade da luz no vácuo independe da velocidade da fonte de luz.

II) As leis da física são as mesmas em todos os referenciais inertiais. A única exceção ocorre em fenômenos físicos que ocorram sob gravidade nula.

III) É impossível determinar simultaneamente a velocidade e a posição do

elétron no átomo de hidrogênio.

IV) No modelo de Bohr do átomo de hidrogênio o elétron não irradia quando se encontra nas órbitas estacionárias, isto é, naquelas órbitas onde o momento linear do elétron é um múltiplo inteiro da constante de Planck.

V) Para ionizar o átomo de hidrogênio, no seu estado fundamental, isto é, separar completamente o elétron do núcleo, gasta-se uma energia menor do que 10 eV.

104) (UFPB-12) A Física Moderna no campo da Mecânica Quântica tem explicado com sucesso muitas características das partículas subatômicas, tais como elétron, próton e nêutron. Uma boa parte da tecnologia moderna opera a uma escala em que os efeitos quânticos são significativos. Exemplos incluem o laser, o microscópio eletrônico e a supercondutividade.

Com relação a efeitos quânticos, identifique as afirmativas corretas:

- I.** O valor extremamente pequeno da constante de Planck faz com que os efeitos quânticos só se revelem em escalas atômicas.
- II.** A energia do átomo de hidrogênio só pode apresentar valores discretos.
- III.** O efeito fotoelétrico só pode ser explicado se a luz for considerada como uma onda.
- IV.** O princípio da incerteza de Heisenberg implica que quanto menor for a incerteza na medida da posição de uma partícula maior será a indeterminação na medida da quantidade de movimento daquela partícula.
- V.** O elétron, no interior de um átomo, comporta-se como uma onda de matéria.

105) (ITA-12) Considere as seguintes afirmações:

- I.** As energias do átomo de Hidrogênio do modelo de Bohr satisfazem à relação, $E_n = -13,6/n^2$ eV, com $n = 1, 2, 3, \dots$; portanto, o elétron no estado fundamental do átomo de Hidrogênio pode absorver energia menor que 13,6 eV.
- II.** Não existe um limiar de frequência de radiação no efeito fotoelétrico.
- III.** O modelo de Bohr, que resulta em energias quantizadas, viola o princípio da incerteza de Heisenberg.

Então, pode-se afirmar que:

- a)** apenas a II é incorreta.
- b)** apenas a I e II são corretas.
- c)** apenas a I e III são incorretas.
- d)** apenas a I é incorreta.
- e)** todas são incorretas.

106) (UFBA-12) O tsunami que atingiu o Japão em 11 de março de 2011 também comprometeu a segurança da estação nuclear em Fukushima. A planta inteira foi inundada, os sistemas de resfriamento foram desativados, e os reatores começaram a superaquecer, ocasionando explosões e incêndios, provocando o vazamento de radionuclídeos.

A fissão nuclear consiste na quebra de um núcleo atômico resultando em novos núcleos e nêutrons. A reação tem início pela absorção de um nêutron e produz grande energia, porque a massa total dos novos elementos é menor que a do núcleo original, e a diferença de massa é transformada em energia. Essa energia é distribuída principalmente em forma de energia cinética dos núcleos e nêutrons produzidos e em energia de radiação γ .

A fissão nuclear do urânio produz vários isótopos em múltiplas possibilidades de reação. A maioria dos fragmentos de fissão são altamente instáveis (radioativos). Alguns deles, como o ^{137}Cs e ^{90}Sr são muito perigosos, quando lançados ao ambiente. Um exemplo de reação cujos produtos são o $^{137}_{55}\text{Cs}$ e o $^{95}_{37}\text{Rb}$ é:



Com base nas informações e nos conhecimentos de Física, calcule a energia liberada na reação, utilizando a equação de Einstein de equivalência entre a massa e a energia, sabendo que $1\text{ u} \times c^2 \approx 930\text{ MeV}$, e os dados apresentados na tabela.

Elemento	A (uma)
${}_{92}^{235}\text{U}$	235,04
${}_{55}^{137}\text{Cs}$	136,91
${}_{37}^{95}\text{Rb}$	94,93
${}_1^n$	1,01

Produtos da Fissão do ^{235}U

+Energia

107) (UPE-13) Uma régua cujo comprimento é de 50 cm está se movendo paralelamente à sua maior dimensão com velocidade 0,6 c em

relação a certo observador. Sobre isso, é CORRETO afirmar que o comprimento da régua, em centímetros, para esse observador vale

- a) 35 b) 40 c) 62,5 d) 50 e) 100

108) (ITA-13) Num experimento que usa o efeito fotoelétrico ilumina-se a superfície de um metal com luz proveniente de um gás de hidrogênio cujos átomos sofrem transições do estado n para o estado fundamental. Sabe-se que a função trabalho do metal é igual à metade da energia de ionização do átomo de hidrogênio cuja energia do estado n é dada por $E_n = \frac{E_1}{n^2}$. Considere as seguintes afirmações:

I) A energia cinética máxima do elétron emitido pelo metal é

$$E_C = \frac{E_1}{n^2} - \frac{E_1}{2}$$

II) A função trabalho do metal é $f = -\frac{E_1}{2}$.

III) A energia cinética máxima dos elétrons emitidos aumenta com o aumento da frequência da luz incidente no metal a partir da frequência mínima de emissão.

Assinale a alternativa verdadeira.

- a) Apenas a I e a III são corretas.
b) Apenas a II e a III são corretas.
c) Apenas a I e a II são corretas.
d) Apenas a III é correta.
e) Todas são corretas.

109) (ITA-14) É muito comum a ocorrência de impurezas em cristais semicondutores. Em primeira aproximação, a energia de ionização dessas impurezas pode ser calculada num modelo semelhante ao do átomo de hidrogênio. Considere um semicondutor com uma impureza de carga +e atraindo um elétron de carga -e. Devido a interações com

os átomos da rede cristalina, o elétron, no semicondutor, possui uma massa igual a $m_r m_0$, em que m_0 é a massa de repouso do elétron e m_r uma constante adimensional. O conjunto impureza/elétron está imerso no meio semicondutor de permissividade relativa ϵ_r . A razão entre a energia de ionização desta impureza e a energia de ionização do átomo de hidrogênio é igual a:

- a)** 1. **b)** m_r/ϵ_r^2 . **c)** ϵ_r^2/m_r . **d)** m_r/ϵ_r . **e)** ϵ_r/m_r .

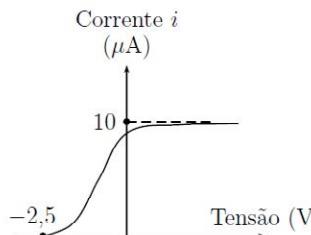
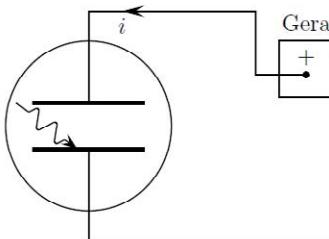
110) (ITA-14) Considere um capacitor de placas paralelas ao plano yz tendo um campo elétrico de intensidade E entre elas, medido por um referencial S em repouso em relação ao capacitor. Dois outros referenciais, S' e S'' , que se movem com velocidade de módulo v constante em relação a S nas direções de x e y , nesta ordem, medem as respectivas intensidades E' e E'' dos campos elétricos entre as placas do capacitor. Sendo

$$g = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

, pode-se dizer que E'/E e E''/E são, respectivamente, iguais a:

- a)** 1 e 1. **b)** γ e 1. **c)** 1 e γ . **d)** γ e $1/\gamma$. **e)** 1 e $1/\gamma$

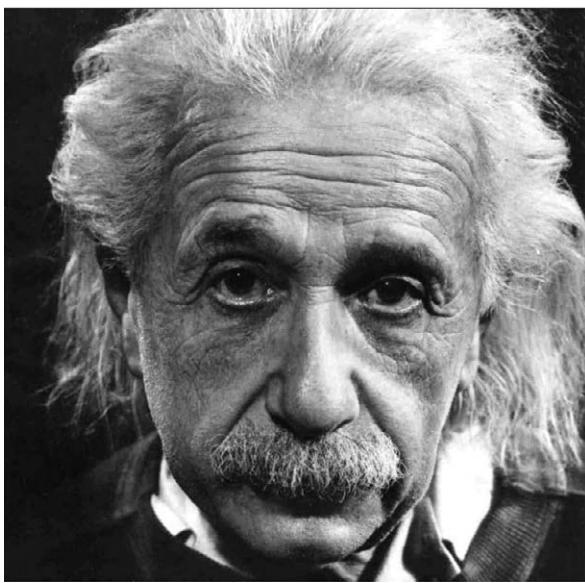
111) (ITA-14) Duas placas de um mesmo metal e com a mesma área de $5,0 \text{ cm}^2$, paralelas e próximas entre si, são conectadas aos terminais de um gerador de tensão ajustável. Sobre a placa conectada ao terminal negativo, faz-se incidir radiação e, por efeito fotoelétrico, aparece uma corrente no circuito, cuja relação com a tensão aplicada é explicitada no gráfico da página seguinte. Sabendo que a função trabalho do metal é de 4,1 eV e assumindo que na região de saturação da corrente todo fóton incidente sobre a placa gera um fotoelétron que é coletado, a medida da intensidade dessa radiação em $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ é igual a:



- a) 13. b) 8,2. c) 6,6. d) 3,2. e) 1,6.

112) (UPE-14) Se um elétron move-se de um nível de energia para outro mais afastado do núcleo do mesmo átomo, é CORRETO afirmar que, segundo Bohr,

- a) há emissão de energia.
- b) há absorção de energia.
- c) o número atômico varia.
- d) há emissão de luz de um determinado comprimento de onda.
- e) não há variação de energia.



Albert Einstein. Fonte: <http://lusocarpediem.blogspot.com.br>.

“A coisa mais bela que o homem pode experimentar é o mistério. É a emoção fundamental que está na raiz de toda ciência e arte. O homem que desconhece esse encanto, incapaz de sentir admiração e estupefação, esse já está, por assim dizer, morto, e tem os olhos extintos.”

GABARITO

1. A	2. B
3. C	4. a) $w=0,1\text{eV}$ b) $V_0=0,90\text{V}$
5. a) $N=10^{35}$ fótons b) $[h]=\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	6. $Tg(\alpha)=h/e$
7. $R=6,4 \cdot 10^7 \text{W/m}^2$	8. $\Delta t=40\text{min}; m=1600\text{g}; L=6\text{m}$
9. C	10. A
11. F V V V	12. E
13. D	14. $E_{\text{Fóton}} > W$
15. $h \approx 7,4 \cdot 10^{-34} \text{J.s}; W \approx 3,45 \cdot 10^{-19} \text{J}$	16. B
17. C	18. B
19. $T_p \approx 1,42 \cdot 10^{-43} \text{s}$	20. A
21. C	22. B
23. B	24. $p=2$
25. C	26. 2eV
27. $12 \cdot 10^{14} \text{Hz}$	28. $2,1\text{eV}$
29. $4,2 \cdot 10^{15}$ fótons	30. E
31. A	32. C
33. A	34. B
35. D	36. A
37. SOMA:12	38. A
39. a) $3 \cdot 10^{16} \text{m/s}^2$ b) $2,6 \cdot 10^3$ c) 22m/s	40. C
41. 40	42. 18
43. a) $E_L = 3,6 \cdot 10^{-13} \text{J}$ b) $5 \cdot 10^5$ fótons	44. A
45. C	46. a) $9,3\text{mm}$ e $2,12 \cdot 10^{-23} \text{J}$ b) $1,06 \cdot 10^{28}$ fótons/s
47. A	48. E
49. D	50. B
51. E	52. B
53. a) $-6,8\text{eV}$ b) $8,1 \cdot 10^{-14} \text{J}$	54. B
55. A	56. B
57. B	58. B
59. B	60. B

61. a) $\lambda=1\text{\AA}$ b) $Q=6,6 \cdot 10^{-24}\text{kg.m/s}$ c) $E_c=150\text{eV}$	62. D
63. C	64. V V F V
65. a) $12,09\text{eV}$ e $10,20\text{eV}$ c) $12,09\text{eV}$, $10,20\text{eV}$ e $1,89\text{eV}$	66. A
67. $5,0\text{eV}$	68. I, III, IV e V
69. D	70. B
71. A	72. D
73. V V V F	74. A
75. B	76. $9,7\mu\text{m}$
77. D	78. A
79. A	80. $2,7 \cdot 10^{26}\text{J}$
81. D	82. A
83. ♥	84. V F V F F
85. C	86. I, II, IV e V
87. a) $v=0,8c$ b) $\Delta t=10\text{anos}$ c) $\Delta t-\Delta t_0=4\text{anos}$	88. D
89. a) $E_{\text{Foton}}=3,0\text{eV}$ b) $E_{\text{Total}}=0,01\text{J}$ c) $n \approx 2,1 \cdot 10^{16} \text{ f\acute{o}tons}$	90. C
91. D	92. $\lambda_{\text{Min}}=30\text{pm}$ e $E_c=6,6 \cdot 10^{-15}\text{J}$
93. B	94. a) $f=10^{15}\text{Hz}$ b) $E=4,0\text{eV}$ c) $E_c=1,7\text{eV}$ d) $f_c=5,75 \cdot 10^{14}\text{Hz}$
95. a) 10^{-7}s b) $c=3 \cdot 10^8\text{m/s}$	96. D
97. D	98. C
99. D	100. C
101. C	102. D
103. V F V F F	104. I, II, IV e V
105. A	106. $E \approx 158 \text{ MeV}$
107. B	108. E
109. B	110. C
111. A	112. B

- 83) a)** Tal comportamento se justifica pelo fato de que, ao contrário do previsto pela teoria ondulatória, na qual demandaria algum tempo entre a incidência da radiação na superfície metálica e a posterior emissão de elétrons por essa superfície, no efeito fotoelétrico praticamente não existe intervalo de tempo entre a incidência da radiação e a emissão do fotoelétron, isto é, o efeito é praticamente instantâneo. Esse comportamento se justifica pelo modelo corpuscular da luz, proposto por Einstein, segundo o qual a radiação é formada por pequenos pacotes de energia (fótons) que, ao colidirem diretamente com um dos elétrons da superfície, transmite toda sua energia para o elétron, arrancando-o, assim, da superfície.
- b)** No modelo corpuscular proposto por Einstein, a energia do fóton é igual ao produto da constante de Planck pela frequência da radiação incidente ($E=hf$), e cada tipo de superfície metálica apresenta distinta função trabalho (energia mínima necessária para se arrancar um elétron). Logo, existe uma frequência mínima para a qual o fóton terá energia igual à da função trabalho da superfície. Tal frequência é chamada de frequência de corte, e somente fótons com frequências iguais ou maiores que à de corte serão capazes de arrancar elétrons da superfície.
- c)** A não dependência da intensidade está associada à natureza corpuscular da radiação eletromagnética, pois o aumento da intensidade significa apenas o aumento da quantidade de fótons incidentes na placa metálica, por unidade de tempo, não aumentando, assim, a energia de cada fóton. Portanto, o aparecimento do fenômeno não pode depender da intensidade da radiação incidente, mas apenas da energia de cada fóton, a qual depende exclusivamente do produto da frequência da radiação incidente pela constante de Planck, conforme descrito no modelo corpuscular da luz.

Referências Bibliográficas

- BISCOULA, G. J.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. *Tópicos de Física*. 17 ed. reform. e ampl. São Paulo: Saraiva, 2007. Vol. 3.
- BRITO, R. *Física Moderna para Vestibulandos*. 5 ed. (2005).
- CARUSO, F., OGURI, V. *Física Moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos*. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. *Física 4*. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- HEWITT, P. G. *Física Conceitual*, 9 ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- LEMOS, N. (2001). E=mc²: Origem e Significado. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 1, (2001).
- OLIVEIRA, I. S. *Física Moderna para iniciados, interessados e aficionados*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005. Vol. 1.
- SANTOS, dos C. A. *O genial cientista Albert Einstein*. Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/einstein/genio.html>>. Acesso em: 20 de ago. de 2010.
- SANTOS, dos C. A. *Einstein e Mileva*. Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/einstein/mileva.html>>. Acesso em: 11 de set. de 2012.
- TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para cientistas e engenheiros*. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. Vol. 3: Física Moderna: Mecânica Quântica, Relatividade e a Estrutura da Matéria.
- TIPLER, P. A. *Física Moderna*. Rio de Janeiro: editora Guanabara Dois S.A., 1981.
- YOUNG, H. D. *Física IV: óptica e física moderna*. 12 ed. São Paulo: Addison Wesley, 2009.



INSTITUTO FEDERAL
PARAÍBA

Ministério da
Educação

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA



INSTITUTO FEDERAL
DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PARAÍBA

ISBN 978-85-63406-54-5

9 788563 406545