

Aula 15

FÍSICA DAS RADIAÇÕES

META

- Fazer com que o estudante pense no ensino de ciências como algo “orgânico” que está em profunda transformação;
- Fazer com que os estudantes percebam que podemos usar os softwares de ensino de matemática também no ensino de física;
- Fazer com que os alunos percebam as aplicações da física no cotidiano.

OBJETIVOS

- Ao final desta aula, o aluno deverá:
 - estar cientes das novas possibilidades e dos desafios que envolvem o ensino de ciências em geral;
 - Que para se ensinar física não precisamos ficar presos ao livro didático;
- Que ensinar física não é ensinar a resolver problemas e que a física é uma mera aplicação da matemática;
- Que ao ensinar física devemos, sempre que possível, mostrar como esta é importante mundo tecnológico.

PRÉ-REQUISITOS

Os alunos deveram ter cursado as disciplinas de Psicologia da Educação, Física A, B e C.

Vera Lucia Martins de Mello

INTRODUÇÃO

Na aula anterior introduzimos a problemática de se ensinar ou não o tópico “Físicas Moderna” no ensino médio. Lá abordamos os conceitos de efeito fotoelétrico, Compton, a física do raio x e o modelo atômico de Rhutefor. O objetivo central desta aula é o de fazer uma breve introdução e mostrar as inúmeras aplicações da física das radiações na vida moderna. Devido às características dos temas abordados nesta aula não há, ao que saibamos, experimentos de baixo custo sobre este tema.

A aplicação mais corriqueira da “Física Moderna” é a “Física das Radiações”. O uso da “Física Moderna” na nossa vida pode ser dividido em “Física Médica” e “Física das Radiações”. Na “Física Médica” temos o uso terapêutico das radiações no tratamento do câncer; o uso do raio X na traumatologia; o uso da ressonância magnética nuclear e o do tomógrafo. Na indústria temos o uso das radiações nos ensaios não destrutivos. Por exemplo, temos o uso do raio X na detecção de trincas e falhas estruturais em óleos dutos.

FÍSICA DAS RADIAÇÕES

O que é radiação?

Radiação é a propagação de energia através de partículas ou ondas. A radiação eletromagnética é uma forma de energia que se propaga como combinação de campos elétricos e magnéticos, variáveis no tempo e no espaço, que viajam no vácuo ou no ar à mesma velocidade da luz. Na figura baixo, mostra-se o espectro eletromagnético – a distribuição da radiação eletromagnética em suas diversas faixas de frequências. Observando-se esta figura, percebe-se que as radiações podem ser classificadas entre ionizantes e não ionizantes.



Figura 1 – Espectro eletromagnético

Radiação não ionizante

Equipamentos como televisores, rádios e telefones celulares, entre outros, localizam-se na faixa de frequência considerada não ionizante. O que isto significa? Significa que a energia emitida por estes equipamentos não é suficiente para “arrancar” elétrons de átomos ou moléculas durante a sua passagem pela matéria.

Não existe ainda nenhum estudo que comprove que a radiação não ionizante causa efeitos deletérios à saúde. Seu principal efeito biológico é térmico: o aquecimento devido à energia eletromagnética. Este efeito não leva necessariamente a efeitos biológicos. O aquecimento de nossa pele pelos raios solares, por exemplo, é um efeito biológico. Haverá risco de queimaduras se não forem obedecidos os limites de exposição solar.

Radiação ionizante

Além da capacidade de ionização, isto é, de arrancar elétrons do material durante sua passagem pelo mesmo, as radiações ionizantes são bastante penetrantes quando comparadas aos demais tipos.

Os principais tipos de radiação são a γ , x , α (núcleos de Hélio), β^+ , β^- e nêutrons. Se ordenarmos de maneira crescente em relação ao poder de penetração, a radiação α não é capaz de atravessar uma folha de papel, a beta atravessa uma folha de papel, mas não atravessa uma lâmina metálica, enquanto a radiação gama atravessaria até uma placa de chumbo, dependendo de sua energia e da espessura da placa.

Não há diferenças físicas entre as radiações gama e x , somente em relação à sua origem. Os Raios γ são originados em transições nucleares e os raios x em transições eletrônicas.

Qual é a origem destas radiações?

As radiações podem ser originadas por processos de decaimentos, por processos de ajuste do núcleo ou pela interação da própria radiação com a matéria.

Por processos de decaimentos:

- Raios X característicos;
- Elétrons Auger;
- Conversão interna.

Por processos de ajuste do núcleo:

- Radiação Alfa;
- Radiação Beta;
- Captura eletrônica.

Por interação da radiação com a matéria:

- Bremsstrahlung;
- Produção de pares;
- Aniquilação de pares.

Processos de decaimento:

Raios X característicos

São radiações eletromagnéticas de alta energia originadas em transições eletrônicas do átomo que sofreu excitação ou ionização após interação. Elétrons das camadas externas fazem transições para ocupar lacunas produzidas pelas radiações nas camadas mais internas, próximas do núcleo, emitindo o excesso de energia sob a forma de Raios X. Como as energias das transições são típicas da estrutura de cada átomo, elas podem ser utilizadas para a sua identificação, numa técnica de análise de materiais denominada de fluorescência de RX.

Exemplo: Átomo de Titânio (22 elétrons)

1. Um elétron da camada K é ejetado do átomo por um fóton, criando uma vacância. (Fonte: <http://www.amptek.com/xrf.html>)

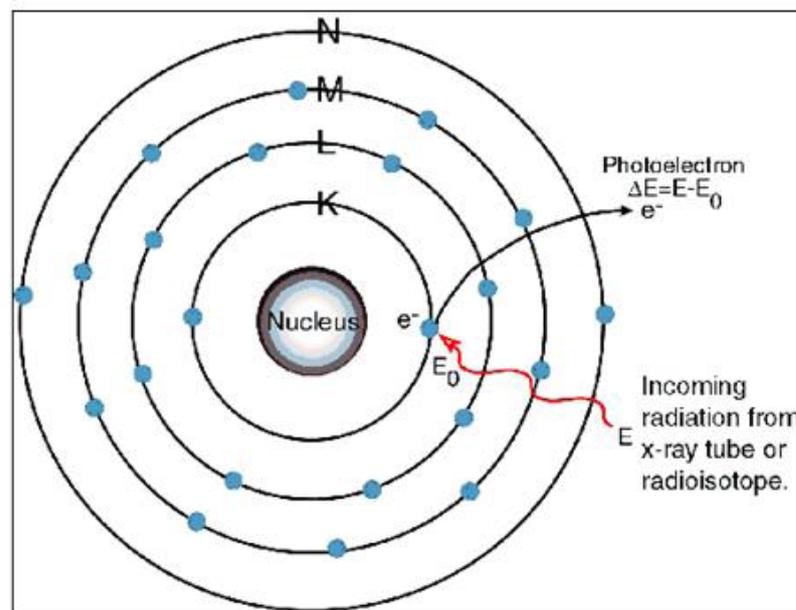


Figura 2 – Disponível em: <http://www.amptek.com/xrf.html>.

2. Um elétron da camada L ou M pula para encher a vacância. No processo, ele emite um Raio X característico, que caracteriza este átomo, e na volta ele produz uma vacância na camada L ou M.

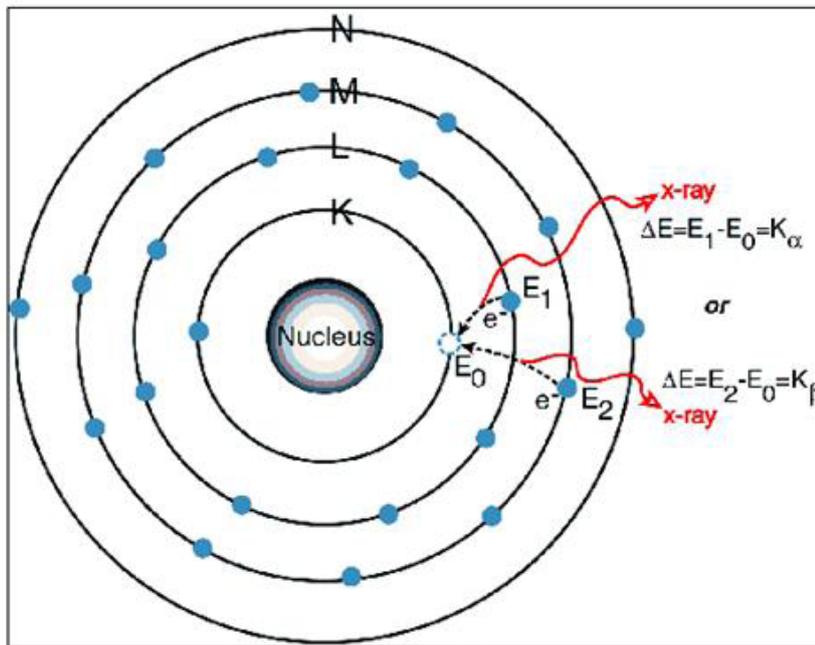


Figura 3 – Disponível em: <http://www.amptek.com/xrf.html>.

3. As linhas M. Quando uma vacância é criada na camada L, um elétron da camada M ou N pula para ocupar a vacância. Nesse processo produz raios x.

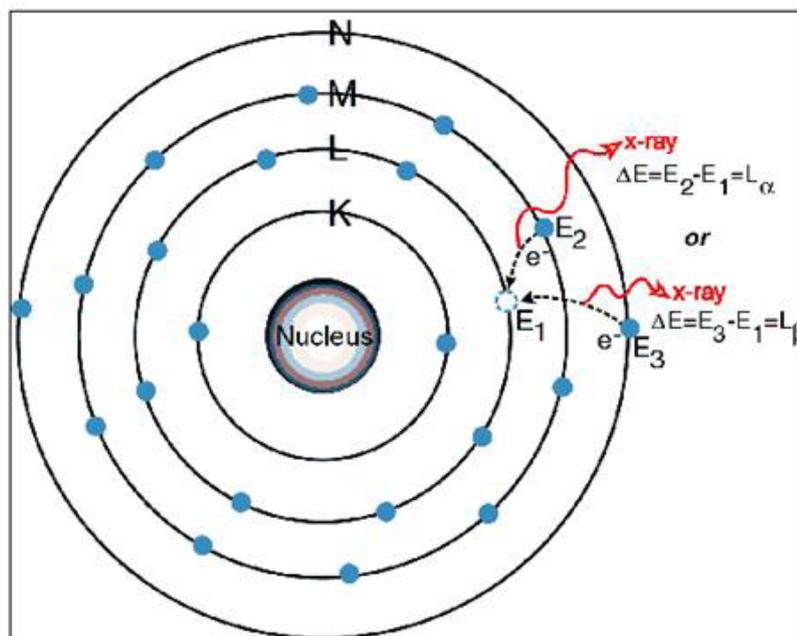


Figura 4 – Disponível em: <http://www.amptek.com/xrf.html>.

A tabela com as energias correspondentes aos Raios X de cada elemento pode ser encontrada na tabela abaixo.

X-Ray Data Booklet Table 1-2. Photon energies, in electron volts, of principal K-, L-, and M-shell emission lines.

Element	$K\alpha_1$	$K\alpha_2$	$K\beta_1$	$L\alpha_1$	$L\alpha_2$	$L\beta_1$	$L\beta_2$	$L\gamma_1$	$M\alpha_1$
3 Li	54.3								
4 Be	108.5								
5 B	183.3								
6 C	277								
7 N	392.4								
8 O	524.9								
9 F	676.8								
10 Ne	848.6	848.6							
11 Na	1,040.98	1,040.98	1,071.1						
12 Mg	1,253.60	1,253.60	1,302.2						
13 Al	1,486.70	1,486.27	1,557.45						
14 Si	1,739.98	1,739.38	1,835.94						
15 P	2,013.7	2,012.7	2,139.1						
16 S	2,307.84	2,306.64	2,464.04						
17 Cl	2,622.39	2,620.78	2,815.6						
18 Ar	2,957.70	2,955.63	3,190.5						
19 K	3,313.8	3,311.1	3,589.6						
20 Ca	3,691.68	3,688.09	4,012.7	341.3	341.3	344.9			
21 Sc	4,090.6	4,086.1	4,460.5	395.4	395.4	399.6			

Tabela 1 - Energia dos Raios X característicos dos elementos com Z entre 1 e 21. Disponível em: http://xdb.lbl.gov/Section1/Table_1-2.pdf.

Elétrons Auger

A energia de excitação do elétron mais interno é transferida a outro mais externo causando a sua ejeção do átomo.

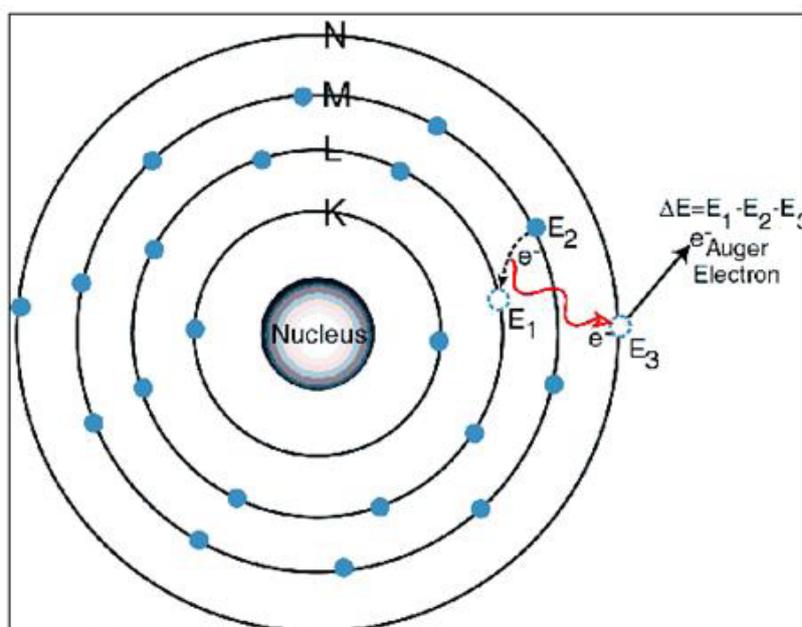


Figura 5 – Disponível em: <http://www.amptek.com/xrf.html>.

Conversão Interna

A energia de excitação do núcleo é transferida diretamente para um elétron orbital que é ejetado do átomo com uma energia dada pela diferença entre a energia de excitação do átomo e a energia de ligação do elétron no eletro esfera E_B :

$$E_e = E_{Ex} - E_B$$

Processos de “ajuste” no núcleo

Radiação Alfa

Quando o número de prótons e nêutrons é elevado, o núcleo pode se tornar instável devido à repulsão elétrica entre os prótons, que pode superar a força nuclear atrativa. Nesses casos pode ocorrer a emissão pelo núcleo de partículas alfa.

Partículas alfa – núcleo do átomo 4He .

Radiação beta (elétrons de origem nuclear)

Sua emissão constitui um processo em núcleos que possuem excesso de nêutrons ou de prótons em relação à estrutura estável correspondente.

Emissão β^-

Quando um núcleo tem excesso de nêutrons em seu interior, e, portanto, falta de prótons, o mecanismo de compensação ocorre através da transformação de um nêutron em um próton mais um elétron, que é emitido no processo de decaimento.

Emissão β^+

Transformação de um próton em um nêutron que, por conservação de carga, produz um pósitron.

Captura eletrônica

Em alguns núcleos, a transformação do próton em nêutron, ao invés de ocorrer por emissão de um pósitron, se processa pela captura de um elétron orbital das camadas mais próximas.

A captura do elétron da camada mais interna provoca uma vacância que, ao ser preenchido, provoca a emissão de RX característicos.

Interação da Radiação com a matéria

Bremsstrahlung

Bremsstrahlung é uma palavra em alemão que significa “radiação de frenagem”. As radiações constituídas por partículas carregadas como α , β e elétrons acelerados, ao interagir com a matéria, podem converter uma parte de sua energia cinética em radiação eletromagnética. Esta é o resultado da

interação entre os campos elétricos da partícula incidente, do núcleo e dos elétrons atômicos.

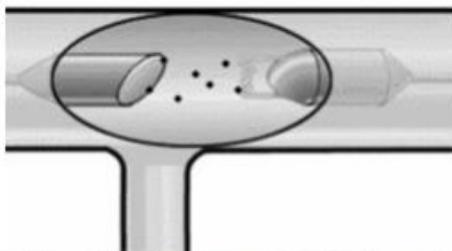


Figura 6 - Esquema simplificado da produção da radiação de frenamento.
(Fonte: http://www.colorado.edu/physics/2000/xray/making_xrays.html).

Um espectro típico é mostrado na figura abaixo:

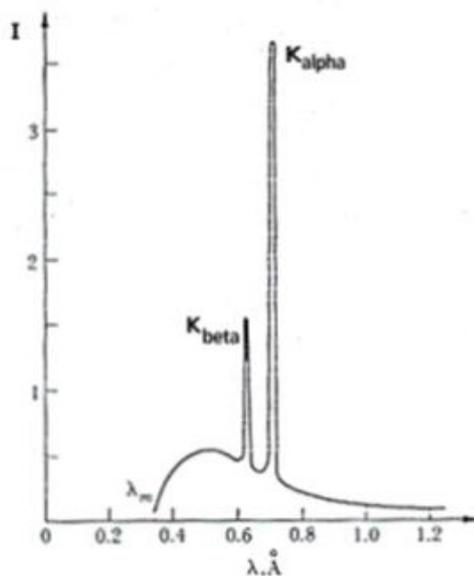


Figura 7 - Espectro de radiação de frenagem (bremsstrahlung) típico.

Produção de pares

Este efeito ocorre quando fótons de energia superior a 1,022 MeV passam perto do núcleo de Z elevado, interagindo com o forte campo elétrico nuclear. Nesta interação, a radiação desaparece e dá origem a um par elétron-pósitron ($2mc^2 = 1,022 \text{ MeV}$).

Radiação de Aniquilação

Quando um pósitron, após perder toda a sua energia cinética, interage com um elétron, a matéria se transforma em dois fótons.

Fontes de Radiação

Nós vivemos em um mundo radioativo. O tempo todo estamos inevitavelmente sujeitos a emissões radioativas, provenientes tanto de fontes naturais quanto artificiais. Os seres humanos estão expostos à radiação desde seu surgimento na Terra. As fontes de radiação incluem:

- o solo em que nós andamos;
- o ar que respiramos;
- a comida com a qual nos alimentamos;
- o sistema solar como um todo.

Tudo em nosso mundo contém pequenas quantidades de átomos radioativos. Esses elementos radioativos tiveram sua origem quando da criação do universo ou são formados pela interação com a radiação cósmica. A Terra, portanto, está constantemente recebendo radiação cósmica vinda do espaço.

Fontes Naturais

As fontes naturais representam cerca de 70% da exposição a que estamos submetidos, sendo o restante devido às fontes artificiais, conforme mostrado na figura abaixo.

Fração de doses na população para fontes naturais e artificiais:

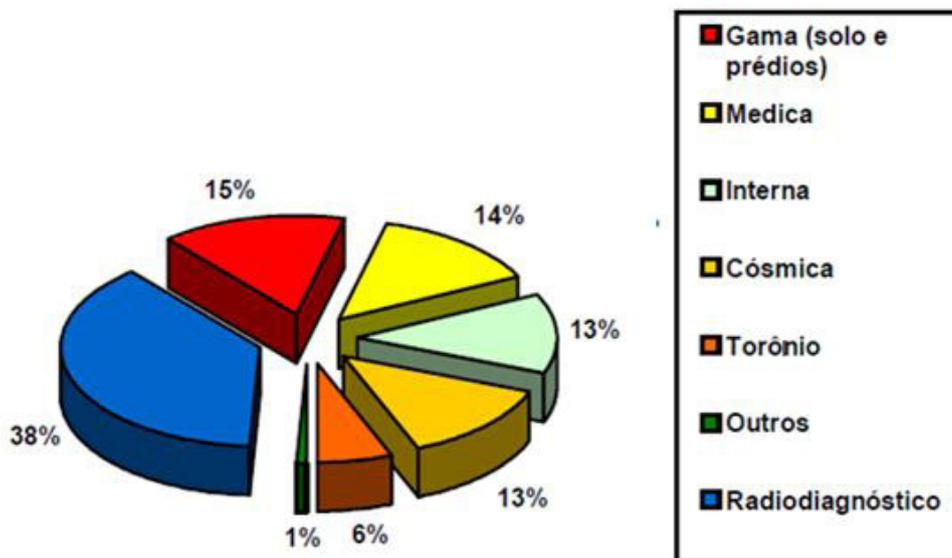


Figura 8 - Distribuição da dose na população para fontes naturais e artificiais.

Radônio e o torônio

Produtos de decaimento do urânio e tório são encontrados em rochas, solos, sedimentos e minérios. São gasosos e depositam-se nas partes mais baixas dos ambientes devido a seu alto peso atômico. Representam cerca de 80% da dose total recebida pelo homem devido à radiação natural.

Radiação cósmica

Proveniente do espaço sideral, como resultante de explosões solares e estelares. Grande parte dela é freada pela atmosfera, mas mesmo assim uma porcentagem importante atinge os seres humanos. Recentemente, com o aumento do buraco na camada de ozônio da atmosfera, o percentual devido a estas radiações tem aumentado substancialmente.

Fontes artificiais

As principais fontes artificiais são os Raios X médicos, odontológicos e industriais, e os aceleradores de partículas.

Tubos de Raios X

O tubo de Raios X é um conversor de energia: recebe energia elétrica e a converte em raios x e calor. Ele é constituído pelo ânodo e pelo cátodo. O cátodo, geralmente é um filamento de tungstênio, é aquecido por um circuito apropriado, podendo atingir altas temperaturas e assim produzir os elétrons que atingem o alvo (ânodo) num ponto bem determinado, chamado de ponto focal.

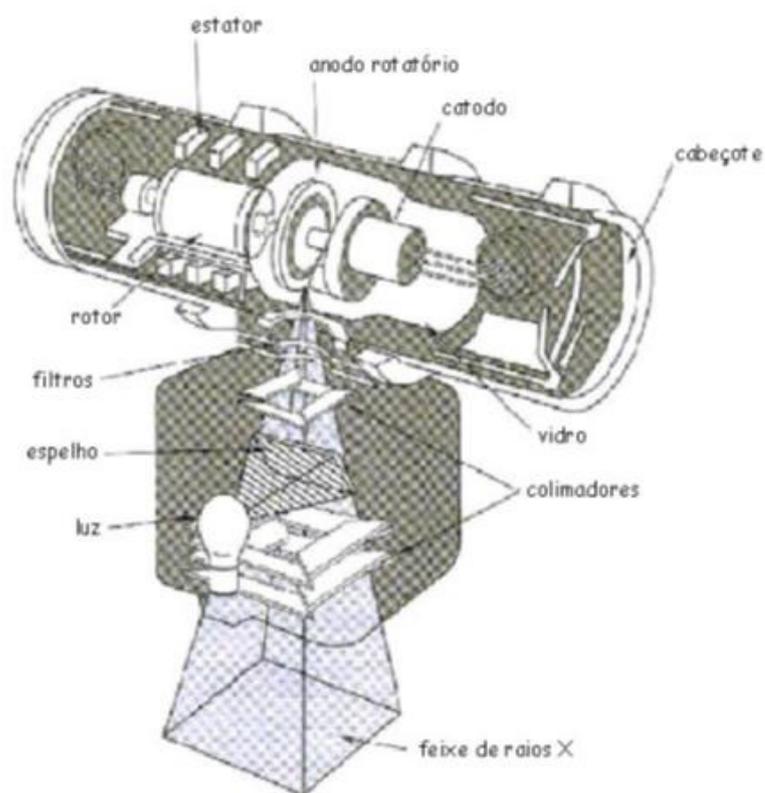


Figura 9 - Esquema simplificado de um tubo de raios x. Figura 9 - Esquema simplificado de um tubo de raios x.

Ânodo

O ânodo é um disco de metal, geralmente de W (tungstênio) onde os elétrons incidem produzindo os raios x. Ele converte energia elétrica em raios x (5%) e em calor (95%).

O material do ânodo deve ter algumas características essenciais:

- Alto número atômico (alta eficiência na produção de raios x);
- Baixa taxa de evaporação (para evitar metalização do vidro da ampola);
- Alta resistência física quando aquecido;
- Alto ponto de fusão;
- Alta condutividade térmica (dissipação rápida de calor).

Ampola

A ampola é constituída de vidro de alta resistência e mantida a vácuo. Dentro dela estão fixados o ânodo e o cátodo. Sua função é promover o isolamento térmico e elétrico entre as partes.

Cabeçote

O cabeçote contém a ampola e demais acessórios. É geralmente constituído de chumbo ou cobre cuja função é blindar a radiação de fuga. Possui uma janela radiotransparente por onde passa o feixe. O espaço interno é preenchido com óleo que atua como isolante elétrico e térmico.

Acelerador de partículas

Existem diversos dispositivos que permitem a geração de feixes intensos de partículas com energia variável, utilizando processos de aceleração baseados em campos elétricos e campos magnéticos. Os principais aceleradores de partículas são:

- aceleradores de elétrons;
- acelerador Van der Graaff;
- cíclotrons;
- aceleradores de grande porte.

Acelerador de elétrons

Os elétrons são gerados por filamentos aquecidos e injetados no tubo acelerador. Este tubo é dividido em várias seções, cada uma delas sujeita a uma ddp diferente, aumentando conforme o elétron se desloca no tubo, até atingir a energia desejada.

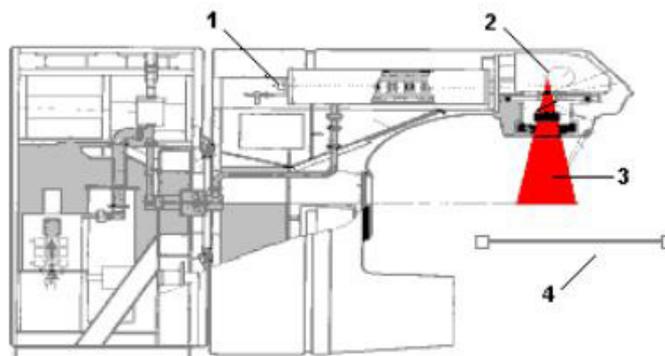


Figura 10 - Esquema simplificado de um acelerador de elétrons médico. 1. Fonte de elétrons. 2. Alvo. 3. Feixe de elétrons ou fótons. 4. Mesa de tratamento.

Van der Graaff

As cargas são conduzidas através de uma correia até o coletor de carga que transfere a carga para o condutor esférico onde esta é armazenada. O potencial do condutor esférico é muito grande em relação ao potencial da Terra e essas partículas podem ser injetadas em outro tipo de acelerador (pré-aceleração) ou incidir em um tubo de Raios X para produzir RX. É um acelerador eletrostático desenvolvido para acelerar partículas carregadas.

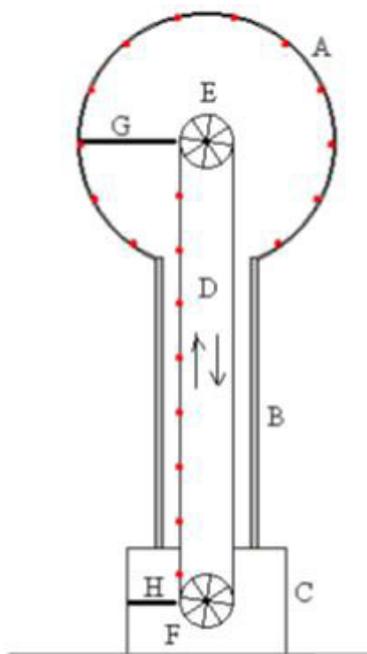


Figura 11 - Esquema simplificado de um acelerador Van der Graaff.

Entre no site abaixo para ver uma animação deste acelerador:
http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo_electrico/graaf/graaf.htm.

Cíclotron

O acelerador é constituído por duas câmaras metálicas, em forma de D, alimentadas por uma fonte de alta voltagem. O sistema inteiro é colocado na presença de um forte campo magnético, perpendicular aos D's. A trajetória dos íons no interior dos D's é circular, devido ao campo magnético. Além disso, deve-se controlar a frequência f da fonte de voltagem alternada para que os íons sejam acelerados continuamente.

Para o movimento não relativístico, pode-se calcular a frequência através das relações:

$$F_{cp} = mv^2/r = qvB/c = F_{mag}$$

$$w = v/r$$

$$f = w/2\pi = qB/2\pi mc$$

sendo f chamada de frequência de ressonância do cíclotron.

Applet: <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/cyclotron/cyclotron.html> (em inglês).

Acelerador de grande porte: LEP (Large Electron-Positron Collider)

O LEP é o maior colisor de partículas do mundo (anel de 27 km de circunferência). Em um anel de 27 km de circunferência, feixes de elétrons e pósitrons viajam em direções opostas e são acelerados a velocidades próximas a da luz.



Veja o texto da Faculdade de Ciências Farmacêuticas da Universidade de São Paulo, disponível em:

<http://www.fcf.usp.br/Ensino/Graduacao/Disciplinas/LinkAula/My-Files/interacao.htm>

Questões:

- Q1 - Cite as principais aplicações da radiação na medicina.
- Q2 - Cite as principais aplicações da radiação na indústria.
- Q3 – O que é um Tomógrafo?
- Q4 – O que é ressonância magnética nuclear?



APPLETS DE ENSINO

1 – Física Animada. Neste site você pode encontrar vários applets de ensino de física moderna. Exemplos:

http://www.fisicanimada.net.br/?q=fisica_moderna/radioactivity

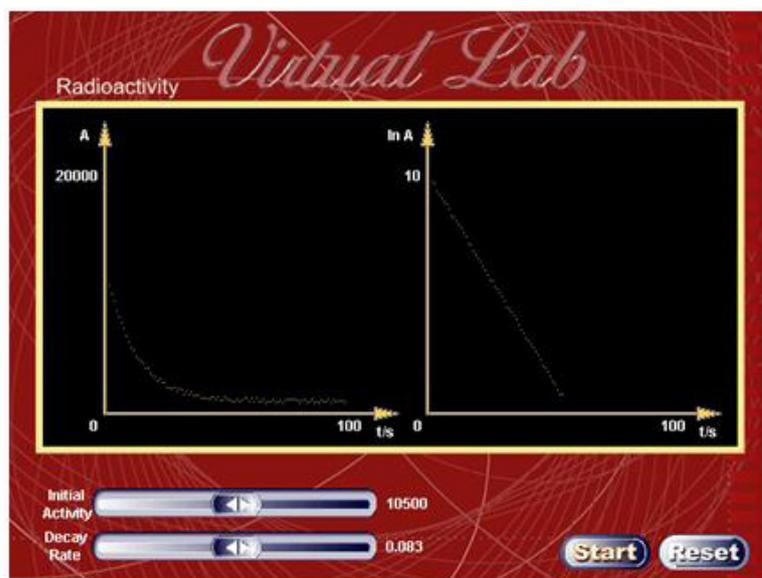
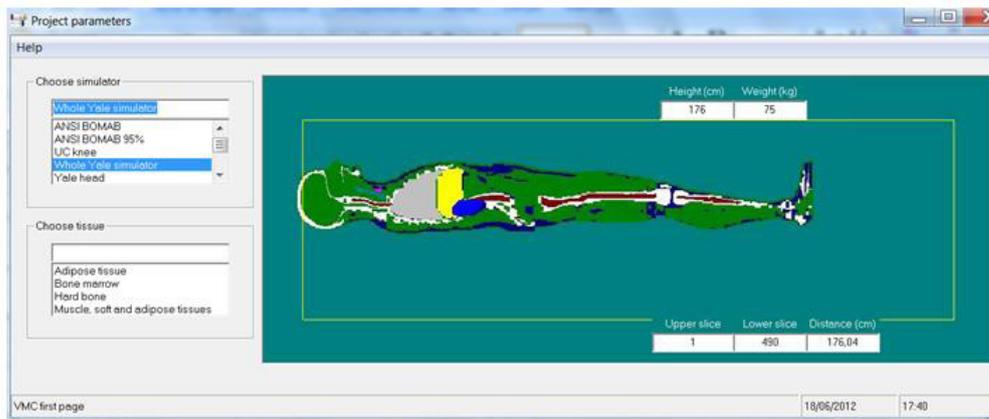


Figura 13 – Radioatividade. Disponível em: http://www.fisicanimada.net.br/?q=fisica_moderna/radioactivity.

2 - Baixar o software VMC in vivo e o VMC dc. Este software calcula a dose de radiação no corpo humano. Cálculo realístico.

<http://www.vmcsoftware.com/in%20vivo.html>



VÍDEO AULAS

1 - Física Moderna.

<http://www.youtube.com/watch?v=nTzmkFWnark&feature=related>

2 – Raios X e planos de Bragg.

<http://www.youtube.com/watch?v=nLKUPwqoFas&feature=related>

3 – Telecurso2000. Ensaio de Materiais ou aplicação da física moderna na indústria. Série de 25 aulas.

<http://www.youtube.com/watch?v=j4wkMsviSX4&feature=related>

4 - Como funciona a ressonância magnética.

Parte 1 - <http://www.youtube.com/watch?v=YeVHTjMwVTo>

Parte 2 - <http://www.youtube.com/watch?v=gxQIDDID5Pk>

5 – Física Médica.

<http://www.youtube.com/watch?v=ZhmljYHTQ1o>

APÊNDICE

MANUAL SOFTWARE “MONTE CARLO IN VIVO”

Software de pesquisa e ensino. Sua função é calcular a dose recebida em alguns órgãos e tecidos do corpo.

- O botão “Load the Simulator” inicia o programa.

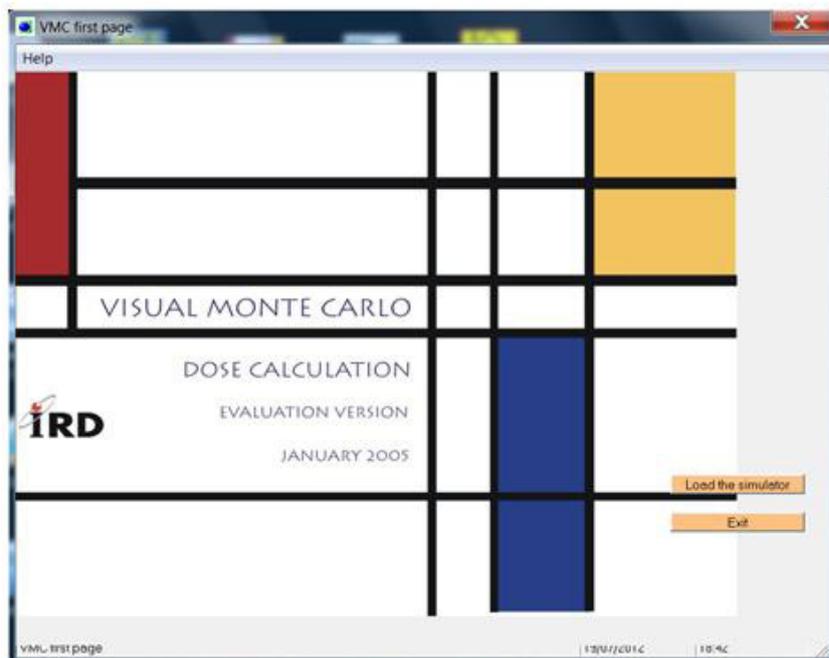
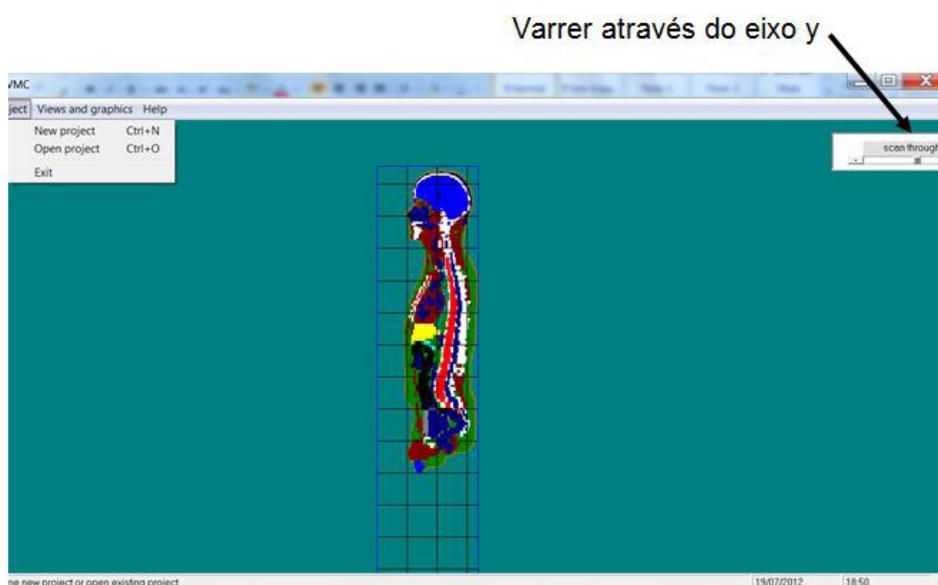


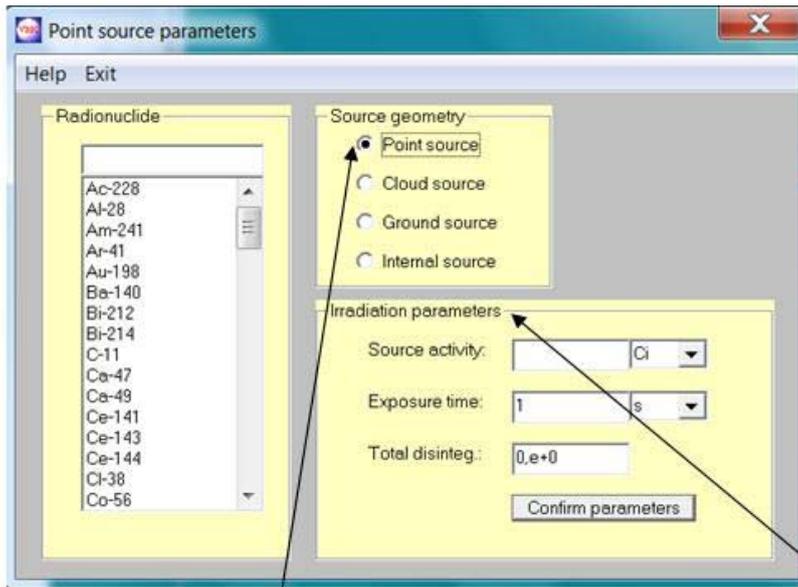
Figura 15

- Ao abrir o simulador aparecerá a janela. (New = novo e Open = abrir).



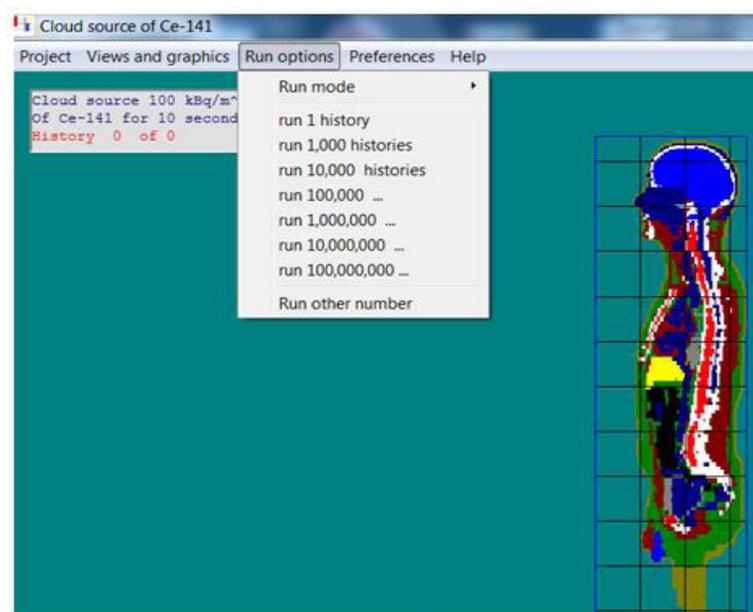
- Se clicar em “New Project” aparecerá à tela abaixo. Nela poderá escolher o tipo, a geometria, a atividade da fonte, o tempo de exposição e a desintegração total.

Nota: Radionuclide = radionuclideo (fonte radioativa)



Geometria da Fonte	Parâmetros da Irradiação
Fonte pontual	Atividade da fonte
Fonte em nuvem	Tempo de exposição
Fonte terra	Desintegração total
Fonte interna	

- Depois de escolher a fonte, a geometria e parâmetros da irradiação você deverá confirmar os parâmetros.
- Aparecerá a tela para salvar o projeto.
- Escreva um nome para o projeto.
- Aparecerá à tela:



- Finalmente deverá escolher quantas simulações deve fazer no botão “Opção de rolagem”.

CONCLUSÃO

Através de textos didáticos preparados para divulgar as aplicações da física moderna e retirados da web, complementados com applets de ensino e vídeo aulas, mostrando que o tópico “Física Moderna” pode ser ensinado, de tal modo, que esta não perca seu vínculo com suas aplicações no mundo tecnológico cotidiano e ao mesmo tempo seja interessante e atrativa.



RESUMO

Começamos essa aula fazendo uma apresentação de alguns tópicos abordados na física moderna, tais como: raios x, raios gama e um resumo da física das radiações. Usamos para isso textos tirados da web e que foram preparados para divulgar as aplicações da física das radiações na medicina e na indústria.

Finalizamos colocando alguns experimentos de baixo custo, coletados do artigo “Experiências em Física Moderna” [Cavalcante, Tavaloro e Haag], alguns links de applets e de vídeo aulas.

RESPOSTA ÀS QUESTÕES

Q1 – Citar, por exemplo, o uso do aparelho de raios x na ortopedia, o tomógrafo, e a radioterapia.

Q2 – Citar, por exemplo, o uso do aparelho de raios x e os raios gama nos ensaios não destrutivos.

COMENTÁRIOS REFERENTES AOS APPLETS DE ENSINO:

Eles devem achar interessantes e ilustrativos, mas não tão fáceis de usar como as da física A e B.

Comentários referentes às vídeo aulas:

Eles devem achar interessantes, ilustrativos, e ao contrário dos applets estas complementam muito bem as aulas expositivas.

REFERÊNCIAS

- ACEVEDO, J. A. - **Reflexiones sobre las finalidades de la enseñanza de las ciencias: educación científica para la ciudadanía.** Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias. Vol. 1, nº 1, p. 3 -16, 2004.
- AIKENHEAD, G. — **STS Education: A Rose by Any Other Name.** In R. Cross (Ed.): **Crusader for Science Education: Celebrating and Critiquing the Vision of Peter J. Fensham.** New York: Routledge Press. Disponível em: <<http://www.usask.ca/education/people/aikenhead/stsed.html>>. Acesso em: 28/08/2012.
- BAZZO, W. A. **Ciência, Tecnologia e Sociedade e o Contexto da Educação Tecnológica.** Ed. UFSC, Florianópolis, 1998. 319 p.
- BRASIL, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Linguagens, códigos e suas tecnologias.** Brasília: Ministério da Educação/Secretaria de Educação Média e Tecnológica, 2002. 244p.
- _____, **PCNEM: Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias, 1998.** Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>>. Acesso em: 28/08/2012.
- _____, **OCNEM Ensino Médio: Orientações Curriculares Nacionais para o Ensino Médio. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias, 2006.** Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/book_volume_02_internet.pdf>. Acesso em: 28/08/2012.
- CARDOSO, S. C. & Barroso, M. F. **RÁPIDA INTRODUÇÃO À FÍSICA DAS RADIAÇÕES.** Disponível em: <<http://omnis.if.ufrj.br/~marta/cederj/radiacoes/fr-unidade2.pdf>>. Acesso em: 18/08/2012
- CAVALCANTE, M. A. – **O Ensino de uma Nova Física e o Exercício da Cidadania.** Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 21. n. 4. Dez. 1999.
- CAVALCANTE, TAVALORO e HAAG. **Experiências em Física Moderna.** Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol6/Num1/exper-fis-mod.pdf>>. Acesso em: 28/08/2012.
- CRUZ, S. M. S. C. S.; ZYLBERSZTAJN, A. **O Evento Acidente de Goiânia: Uma Experiência de CTS no Ensino Fundamental.** In: VII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, 2000, Florianópolis. VII EPEF, 2000.
- DELORS, Jacques (Coord.). **Os quatro pilares da educação.** In: **Educação: um tesouro a descobrir.** 1ª Ed. São Paulo: Ed. Cortez, 1999.
- FERREIRA, M. S.; SALLES, S. E. **Análise de livros didáticos em ciências: entre as ciências de referência e as finalidades sociais da escolarização.** Revista Educação em Foco, Porto Alegre, v. 8, 2004.

GERMANO, A.S.M.; SOUZA, A.M.. ANÁLISE DE LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA QUANTO A SUAS ABORDAGENS PARA O CONTEÚDO DE FÍSICA NUCLEAR. XVIII Simpósio Nacional de Ensino de Física – SNEF 2009 – Vitória, ES.

MOREIRA, M. A. – A questão das ênfases curriculares e a formação do professor de ciências. Caderno Catarinense para o Ensino de Física. Florianópolis, vol. 3 n. 2. Ago. 1986.

SANTOS, W. L. P.; MORTIMER, E. F. – Tomada de decisão para ação social responsável no ensino de ciências. Ciência & Educação, vol. 7, n.1, p.95-111. 2001.

Sears, Francis W., Mark W. Zemansky e Hugh D. Young, University Physics, 6 edição, Addison-Wesley, 1983, pp. 843-4. Disponível em: <ISBN 0-201-07195-9>. Acesso em: 28/08/2012.

TIPLER, P. A.. vol.2. Física. Ed. LTC.

UFRGS. Site de Ensino. Física Moderna. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod05/m_s01.html>. Acesso em: 28/08/2012.

WEISSTEIN, Eric W.. “Eric Weisstein’s World of Physics”, 1996-2007, Eric Weisstein's World of Science, Wolfram Research. **Hertz Effect**. Disponível em: <<http://scienceworld.wolfram.com/physics/HertzEffect.html>>. Acesso em: 28/08/2012.

Wikipédia. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Raios_X>. Acesso em 28/08/2012.

ZANETIC, J. Física Também é Cultura. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo. 1989. 250 p.

ZORZI, M. B. S. O enfoque ciência, tecnologia e sociedade nos textos sobre radioatividade e energia nuclear nos livros didáticos de química. Dissertação de Mestrado. Paraná: Universidade Estadual de Maringá, 2006. 129 p.