PARTE B – Capítulo 6
Conceitos basicos sobre radiação. Modelos atómico e niveis de energia. Radiaoatividade.

Objetivos: Nesta aula veremos alguns conceitos básicos sobre a radiação ionizante com ênfase na radiação corpuscular. Faremos uma discussão breve sobro modelo atômico corrente, os níveis de energia dos elétrons e o conceito de espectro atômico. Serão também apresentados alguns conceitos sobre a energia vibracional e rotacional de moléculas. Por fim discutiremos sobre a radioatividade, desintegração nuclear e radioisótopos.

1 – Introdução

Vimos num aula anterior que a readiacao é propagacao de energia e um exemplo foi a radiacao eletromagnetica associacada a oscilacao de campos eletricos e magneticos. Se imaginarmos uma particula em movimento, esta tambem transporta energia na forma de energia cinetica. Dessa forma é comum definirmos um outro tipo de radiacao chamada de radiacao corpuscular para o caso de particulas em movimentos (ex. particulas elementrares como eletrons, protons, neutrons, nucleos atomicos, mesons π etc.).

A energia cinetica K de uma particila de massa m com velocidade v, quando v<<c (vel. da luz) é dada por

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

Em geral para radiação corpuscular costuma-se utilizar a unidade da energia cinética em eletron volts (1eV = 1.60217646 × 10^{-19} joules).

Max Planck, em 1901, e Albert Einstein, em 1905, iniciaram a formulação da teoria dos *quanta*. Segundo essa teoria, a radiação eletromagnética é emitida e se propaga descontinuamente, em pequenos pulsos de energia, chamados *pacotes de energia*, *quanta* ou *fótons*. Assim, a onda eletromagnética apresenta também um caráter corpuscular.

Fótons são partículas sem carga e massa de repouso nula

Planck descobriu que todos os fótons, associados a uma freqüência particular f de luz, possuem a mesma energia E, diretamente proporcional a f. Isto é,

$$\boxed{E = hf} \qquad (1.4)$$

em que h é uma constante universal, chamada constante de Planck, e vale $6{,}63 \times 10^{-34}$ J • s.

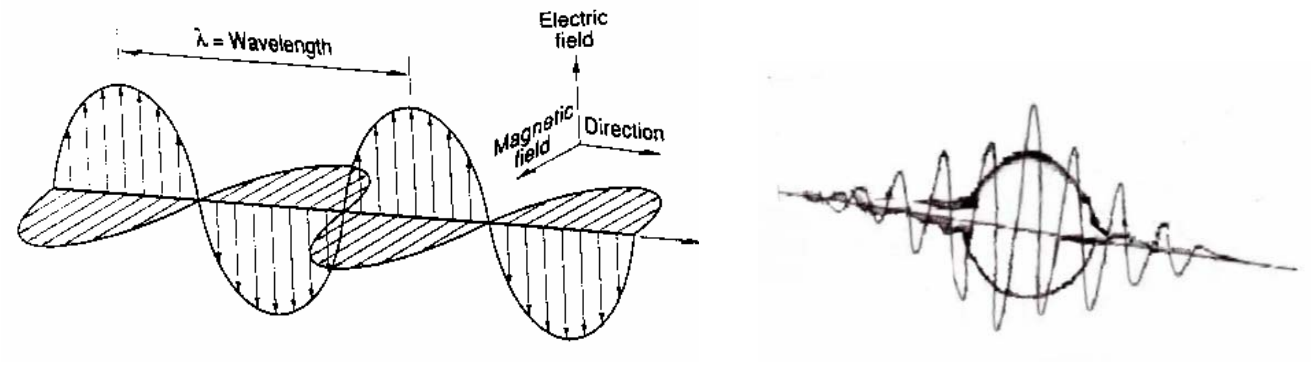


Fig. Modelo de onda eletro magnética (esq). Modelo de um pacote de ondas eletromagnético – fóton (dir.)

A energia E também pode ser calculada em função de λ. Substituindo-se a freqüência f dada pela equação (1.3) em (1.4), obtém-se

$$\boxed{E = \frac{hc}{\lambda}} \qquad (1.5)$$

Exemplo 1.1 — Qual é a energia de um fóton de luz amarela, sabendo-se que sua freqüência é de $6 \times 10^{14}\ s^{-1}$ •?

Solução

$E = hf = (6{,}63 \times 10^{-34}\ J \cdot s)(6 \times 10^{14}\ s^{-1})$
$E \cong 4 \times 10^{-19}\ J$

O fóton é a menor quantidade de luz que pode ser emitida ou absorvida em qualquer processo. Em particular, o fóton é a menor unidade de luz que pode ser absorvida por uma célula fotossensível da retina do olho.

É interessante ter uma idéia da ordem de grandeza da energia do Exemplo 1.1. Para comparar, calcule:

a. a energia cinética de uma bola de futebol de 0,5 kg com velocidade de 10 m/s;
b. a energia necessária para uma pessoa de 50 kg dar um salto vertical de 50 cm.

Desde a descoberta, em 1905, por Einstein, das propriedades corpusculares da onda, através do efeito fotoelétrico, passaram-se quase 20 anos antes que alguém especulasse sobre a possibilidade de o inverso também ser válido.

Em 1924, Louis de Broglie apresentou a teoria de que a matéria possuísse tanto características ondulatórias como corpusculares.

Essa proposição é escrita matematicamente na forma

$$\boxed{mv = \frac{h}{\lambda}} \qquad (1.6)$$

Const. de Planck
$h = 4.14 \times 10^{-15}$ eV. s
$= 6.63 \times 10^{-34}$ J.s

onde λ é chamado *comprimento de onda de de Broglie*.

O caráter corpuscular é representado pelo produto mv, pois m e v são respectivamente massa e velocidade do corpúsculo; enquanto que h/λ representa o caráter ondulatório, pois λ é o comprimento de onda da onda associada ao corpúsculo.

Exemplo 1.2 — Determine o comprimento de onda de de Broglie de um elétron com uma velocidade de 5×10^7 m/s. A massa do elétron vale $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg.

Solução

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}}{(9{,}11 \times 10^{-31}\ \mathrm{kg})(5 \times 10^7\ \mathrm{m/s})}$$

$$\lambda = 1{,}46 \times 10^{-11}\ \mathrm{m} = 0{,}146\ \text{Å}$$

O funcionamento do microscópio eletrônico se baseia nas propriedades ondulatórias do elétron, isto é, faz uso do elétron como onda.

2 – Tipos de radiação e suas características

As radiações de ambos os tipos, corpusculares e eletromagnéticas, quando possuem energia suficiente, atravessam a matéria, ionizando (removendo elétrons de) átomos e moléculas, e assim modificando-lhes o comportamento químico. Como conseqüência, podem ocorrer mutações genéticas e modificações nas células vivas. Essa ação destrutiva sobre as células pode ser utilizada no tratamento de tumores. Embora essas radiações produzam efeitos gerais semelhantes nos seres vivos, cada uma delas possui características próprias.

A seguir serão examinadas as características individuais de alguns dos tipos mais comuns de radiação.

2.1 - Radiação alfa ou partícula alfa (α)

As *partículas alfa* são núcleos do átomo de hélio, constituídos de dois prótons e dois nêutrons. Uma partícula alfa é, pois, muito mais pesada que um elétron e sua trajetória num meio material é retilínea.

Na interação de uma partícula alfa com átomos de ar, a primeira perde, em média, 33 eV por ionização. Então, uma partícula alfa com energia cinética inicial de 4,8 MeV, emitida pelo rádio-226, produz cerca de

$$\frac{4{,}8 \times 10^6\ \mathrm{eV}}{33\ \mathrm{eV}} \cong 145\,000$$

ionizações antes de parar.

A distância que uma partícula percorre antes de parar é chamada *alcance*. Num dado meio, partículas alfa de igual energia têm o mesmo alcance. Portanto, aumentando-se a energia das partículas alfa, aumenta-se o alcance para um dado meio.

Por outro lado, fixando-se a energia da partícula alfa, o alcance diminui, se a densidade do meio aumentar.

O alcance das partículas alfa é muito pequeno, como se pode ver na Tabela 1.1, o que faz que elas sejam facilmente blindadas. Uma folha finíssima de alumínio de 21 μm barra completamente um feixe de partículas alfa de 5 MeV. Mesmo sem blindagem, a referida partícula alfa não consegue atravessar a pele humana. Entretanto, a ingestão de uma fonte emissora de partículas alfa por uma pessoa poderá causar-lhe danos profundos a certas partes do corpo.

As partículas alfa são produzidas principalmente nos decaimentos de elementos pesados como urânio, tório, plutônio, rádio etc. Usualmente são acompanhadas de radiação beta e gama.

Tabela 1.1 – Alcance das partículas α e β no ar, no tecido humano e no alumínio.

Energia (MeV)	Alcance (cm)		
Partículas alfa	*Ar*	*Tecido humano*	*Alumínio*
1,0	0,55	$0,33 \times 10^{-2}$	$0,32 \times 10^{-3}$
2,0	1,04	$0,63 \times 10^{-2}$	$0,61 \times 10^{-3}$
3,0	1,67	$1,00 \times 10^{-2}$	$0,98 \times 10^{-3}$
4,0	2,58	$1,55 \times 10^{-2}$	$0,50 \times 10^{-3}$
5,0	3,50	$2,10 \times 10^{-2}$	$2,06 \times 10^{-3}$
Partículas beta	*Ar*	*Tecido humano*	*Alumínio*
0,01	0,23	$0,27 \times 10^{-3}$	
0,1	12,0	$1,51 \times 10^{-2}$	$4,3 \times 10^{-3}$
0,5	150	0,18	$5,9 \times 10^{-2}$
1,0	420	0,50	0,15
2,0	840	1,00	0,34
3,0	1 260	1,50	0,56

2.2 - Radiação beta ou partícula beta (β)

Partículas beta são elétrons (e^-) e pósitrons (e^+, partículas idênticas ao elétron, exceto no sinal de carga), que são muito mais penetrantes que as partículas alfa, como se pode ver na Tabela 1.1.

A radiação beta, ao passar por um meio material, também perde energia ionizando os átomos que encontra no caminho. Para blindar as partículas beta pode-se usar plástico ou alumínio.

2.3 – Neutrons (n)

Os nêutrons são partículas sem carga e não produzem ionização diretamente, mas o fazem indiretamente, transferindo energia para outras partículas carregadas que, por sua vez, podem produzir ionização.

Os nêutrons percorrem grandes distâncias através da matéria, antes de interagir com o núcleo dos átomos que compõem o meio. São muito penetrantes, e podem ser blindados por materiais ricos em hidrogênio, como, por exemplo, parafina ou água.

As características particulares como carga e massa das radiações corpusculares são apresentadas na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Carga e massa das radiações corpusculares.

	Alfa	Elétron	Pósitron	Nêutron	Próton
carga	$+2e$	$-e$	$+e$	0	$+e$
massa (kg)	$6,644 \times 10^{-27}$	$9,109 \times 10^{-31}$	$9,109 \times 10^{-31}$	$1,675 \times 10^{-27}$	$1,672 \times 10^{-27}$

2.4 - Radiação gama ou raios gama (γ)

Os raios gama são ondas eletromagnéticas extremamente penetrantes.

Eles interagem com a matéria pelo efeito fotoelétrico, pelo efeito Compton ou pela produção de pares, e nesses efeitos são emitidos elétrons ou pares elétron-pósitron que, por sua vez, ionizam a matéria.

Um fóton de radiação gama pode perder toda ou quase toda energia numa única interação, e a distância que ele percorre antes de interagir não pode ser prevista. Tudo que se pode prever é a distância em que ele tem 50% de chance de interagir. Essa distância se chama *camada semi-redutora*. A Tabela 1.3 dá as camadas semi-redutoras no tecido humano e no chumbo para raios X ou raios gama de algumas energias.

Para blindagem desse tipo de radiação usa-se chumbo, concreto, aço ou terra.

Tabela 1.3 — Camada semi-redutora no tecido humano e no chumbo para os raios X ou gama.

Energia (MeV)	Camada semi-redutora (cm)	
Raios X ou gama	Tecido humano	Chumbo
0,01	0,13	$4,5 \times 10^{-4}$
0,05	3,24	$0,8 \times 10^{-2}$
0,1	4,15	$1,1 \times 10^{-2}$
0,5	7,23	0,38
1,0	9,91	0,86
5,0	23,10	1,44

2.5 – Raios X

Os raios X são também ondas eletromagnéticas, exatamente como os raios gama, diferindo apenas quanto à origem, pois os raios gama se originam dentro do núcleo atômico, enquanto que os raios X têm origem fora do núcleo, na desexcitação dos elétrons. Suas características são, portanto, as mesmas da radiação gama.

Os raios X também podem ser formados diretamente da desaceleração ou aceleração de feixes de elétrons (ex. máquinas de raios X, tubos de raios catódicos, TV)

2.6 - Radiações Naturais

Toda vida, em nosso planeta, está exposta à radiação cósmica (partículas com grande energia provenientes do espaço) e à radiação proveniente de elementos naturais radioativos existentes na crosta terrestre como potássio, césio etc. A intensidade dessa radiação tem permanecido constante por milhares de anos. Nossos antepassados sempre estiveram expostos a ela, e nós também estamos.

Essa radiação se chama *radiação natural* ou *radiação de fundo* e provém de muitas fontes.

Cerca de 30% a 40% dessa radiação se deve a raios cósmicos. Alguns materiais radioativos — como potássio-40, carbono-14. urânio, tório etc. — estão presentes em quantidades variáveis nos alimentos. Uma quantidade razoável de radiação vem do solo e de materiais de construção. Assim, pois, a radiação de fundo pode variar de local para local.

O valor médio da radiação de fundo em locais habitados é de 1,25 milisievert (mSv) ao ano. (Veja a definição de milisievert no capítulo sobre proteção radiológica.)

Para altitudes de 3 000 m, a radiação de fundo é 20% superior à radiação ao nível do mar. Isso porque a atmosfera se encarrega de atenuá-la.

A radiação de fundo na Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira, em São Paulo, vem sendo medida pelo Laboratório de Dosimetria do Instituto de Física da USP. Seu valor médio é de 1,4 mSv ao ano. Por outro lado, em Guarapari, no Estado do Espírito Santo, a radiação de fundo é uma das mais altas entre os locais habitados — cerca de 3,15 mSv por ano — e se deve à presença de areias monazíticas.

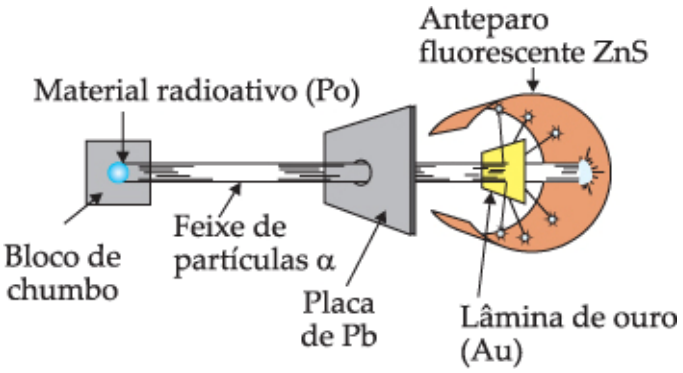
No Brasil há outros locais onde a radiação de fundo é razoavelmente alta, e estão situados próximos a minas de tório e de urânio. Poços de Caldas, em Minas Gerais, é um exemplo.

3 – Modelos atômicos

Ao longo da historia muitas teorias surgiram para explicar a estrutura da matéria. Nesta seção faremos apenas um breve discurso sobre o modelo proposto por Rutherford conhecido como modelo atômico clássico e em seguida ilustraremos o modelo atômico que é o mais aceito atualmente: o modelo da mecânica quântica ou da nuvem eletrônica.

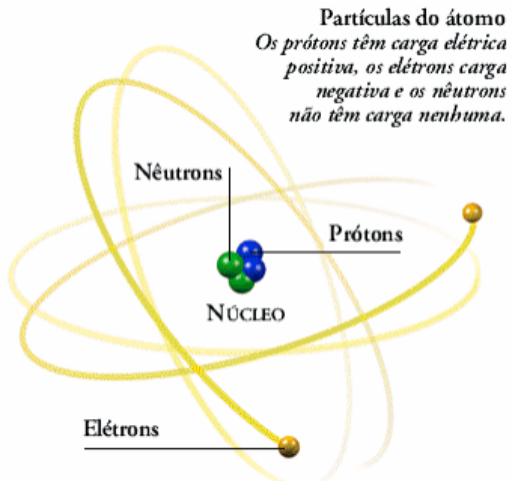
3.1 Modelo atômico de Rutherford, modelo atômico clássico.

Em 1911, Ernest Rutherford, estudando a trajetória de partículas a (partículas positivas) emitidas pelo elemento radioativo polônio, bombardeou uma lâmina fina de ouro. Ele observou que a maioria das partículas alfa atravessavam a lâmina de ouro sem sofrer desvio em sua trajetória; que algumas das partículas sofriam desvio em sua trajetória; outras, em número muito pequeno, batiam na lâmina e voltavam.



Rutherford concluiu que a lâmina de ouro não era constituída de átomos maciços e propôs que um átomo seria constituído de um núcleo muito pequeno carregado positivamente (no centro do átomo) e muito denso, rodeado por uma região comparativamente grande onde estariam os elétrons em movimentos orbitais. Essa região foi chamada de **eletrosfera**. Segundo o modelo de Rutherford, o tamanho do átomo seria de 10 000 e 100 000 vezes maior que seu núcleo. Rutherford teve que admitir os elétrons orbitando ao redor do núcleo, porque, sendo eles negativos, se estivessem parados, acabariam indo de encontro ao núcleo, que é positivo.

As partículas positivas do núcleo foram chamadas de prótons. Em 1932, Chadwick isolou o nêutron, cuja existência já era prevista por Rutherford. Portanto, o **modelo atômico clássico** é constituído de um núcleo, onde se encontram os prótons e nêutrons, e de uma eletrosfera, onde estão os elétrons orbitando em torno do núcleo.



Adotando-se como padrão a massa do próton, observou-se que sua massa era praticamente igual à massa do nêutron e 1836 vezes mais pesada que o elétron, concluindo-se que:

$$m_p \approx m_n \rightarrow m_p = 1836\, m_{e^-}$$

Prótons, nêutrons e elétrons são denominados partículas elementares ou fundamentais. Algumas características físicas das partículas atômicas fundamentais:

Partícula	Massa Relativa (u)	Carga Relativa uca = unidade de carga atômica
Próton	1	+1
Nêutron	1	0
Elétron	1/1836	–1

3.2 Modelo Atômico Rutherford-Bohr e o átomo de hidrogênio

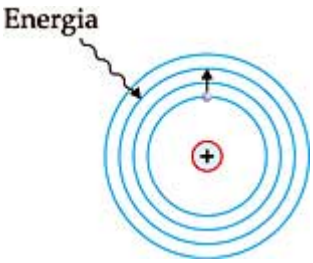
Bohr, baseando-se nos estudos feitos em relação ao espectro do átomo de hidrogênio e na teoria proposta em 1900 por Planck (Teoria Quântica), segundo a qual a energia não é emitida em forma contínua, mas em ”blocos”, denominados *quanta* de energia, propôs os seguintes postulados:

1. Os elétrons nos átomos descrevem sempre órbitas circulares ao redor do núcleo, chamadas de camadas ou níveis de energia.

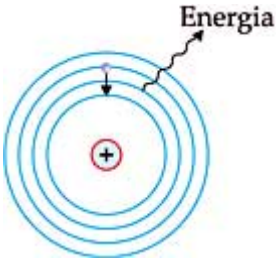
2. Cada um desses níveis possui um valor determinado de energia (estados estacionários).

3. Os elétrons só podem ocupar os níveis que tenham uma determinada quantidade de energia.

4. Os elétrons podem saltar de um nível para outro mais externo, desde que *absorvam* uma quantidade bem definida de energia (*quantum* de energia).

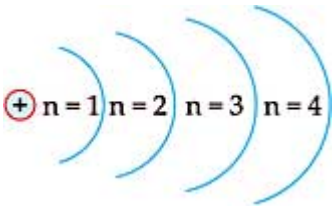


5. Ao voltar ao nível mais interno, o elétron *emite* um *quantum* de energia, na forma de luz de cor bem definida ou outra radiação eletromagnética (fóton).



6. Cada órbita é denominada de estado estacionário e pode ser designada por letras K, L, M, N, O, P, Q. As camadas podem apresentar: K = 2 elétrons, L = 8 elétrons, M = 18 elétrons, N = 32 elétrons, O = 32 elétrons, P = 18 elétrons, Q = 2 elétrons

7. Cada *nível de energia* é caracterizado por um número quântico (n), que pode assumir valores inteiros: 1, 2, 3, etc.

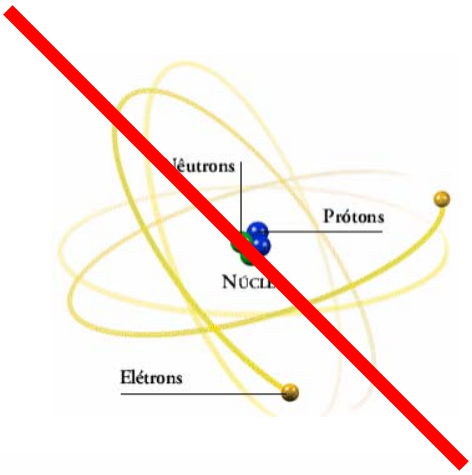


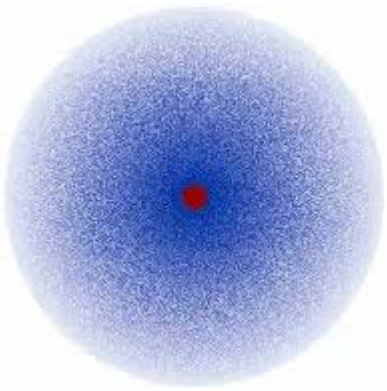
No caso do átomo de hidrogênio os níveis de energia dos elétrons podem ser obtidos pela expressão

$$En = -\frac{13{,}6}{n^2} eV$$

onde n representa o numero quântico principal (órbita permitida) e o sinal negativo indica que o elétron esta “ligado” ao núcleo, (é atraído pelo núcleo), em outras palavras, não tem energia suficiente para escapar do átomo. A energia do eletrôn no nível fundamental (n=1) é igual a E1 = -13,6 eV. Isso significa que é preciso uma energia de 13,6 eV para arrancar esse elétron do átomo de hidrogênio. Quando o eletro se encontra em estados superiores E2, E3, E4, etc, diz-se que o átomo esta no estado excitado.

3.3 Modelo de orbital atômico ou nuvem eletrônica
(Mecânica quântica: Distribuição de probabilidade para a posição dos elétrons)





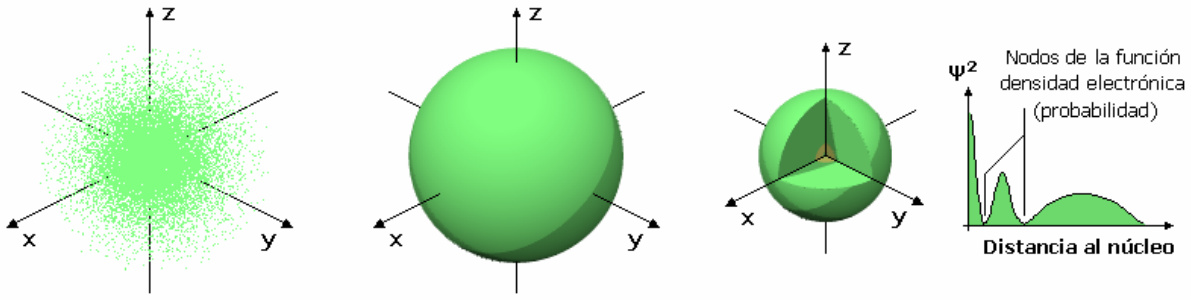
Orbital s

O orbital **s** tem simetria esférica ao redor do núcleo. Na figura seguinte, são mostradas duas alternativas de representar a nuvem eletrônica de um orbital **s**:

- Na primeira, a probabilidade de encontrar o elétron (representada pela densidade de pontos) diminui à medida que nos afastamos do núcleo.
- Na segunda, se apresenta o volume esférico no qual o elétron passa a maior parte do tempo.

Pela simplicidade, a segunda forma é mais utilizada.

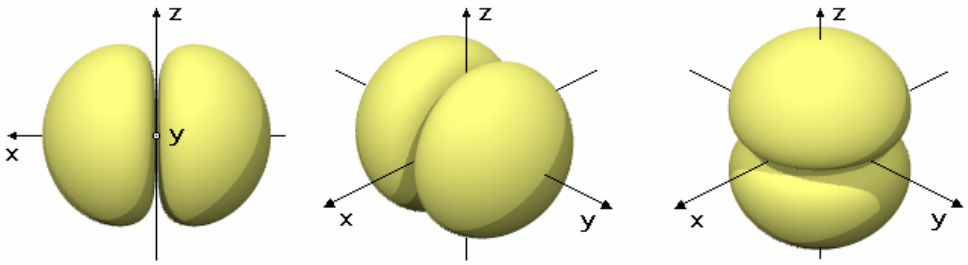
Para valores de número quântico principal maiores que um, a função densidade eletrônica apresenta n-1 nós, nos quais a probabilidade tende a zero. Nestes casos, a probabilidade de encontrar o elétron se concentra a certa distância do núcleo.



Orbital s ($\ell = 0$, $m_\ell = 0$) n = 1 (H) n = 3 (Na)

Orbital p

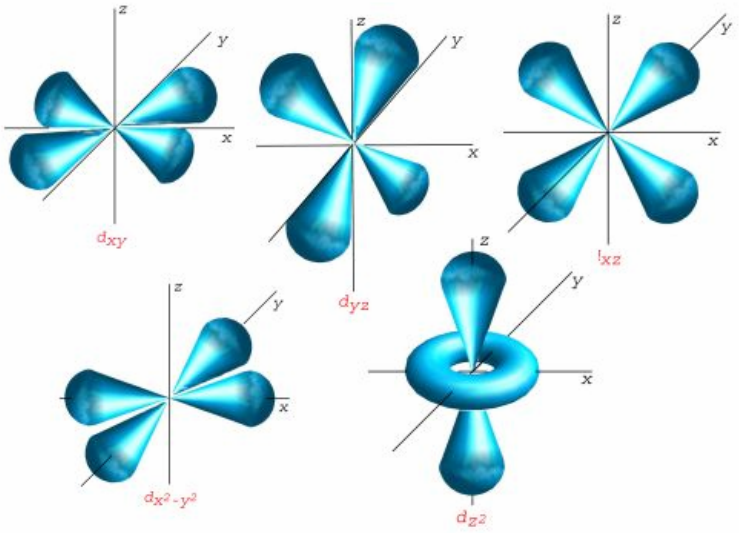
A forma geométrica dos orbitais **p** é a de duas esferas achatadas até o ponto de contato (o núcleo atômico) e orientadas segundo os eixos de coordenadas. Em função dos valores que pode assumir o terceiro número quântico **m** (-1, 0 e +1), obtém-se três orbitais **p** simétricos, orientados segundo os eixos **x**, **z** e **y**. De maneira análoga ao caso anterior, os orbitais **p** apresentam n-2 nós radiais na densidade eletrônica, de modo que, à medida que aumenta o valor do número quântico principal, a probabilidade de encontrar o elétron afasta-se do núcleo atômico.



Orbital p_x Orbital p_y Orbital p_z

Orbital d

Os orbitais **d** tem uma forma mais diversificada: quatro deles têm forma de 4 lóbulos de sinais alternados (dois planos nodais, em diferentes orientações espaciais), e o último é um duplo lóbulo rodeado por um anel (um duplo cone nodal). Seguindo a mesma tendência, apresentam n-3 nós radiais.



4 Espectros atômicos

O *segundo conceito quântico* de Bohr resume-se na seguinte afirmação:

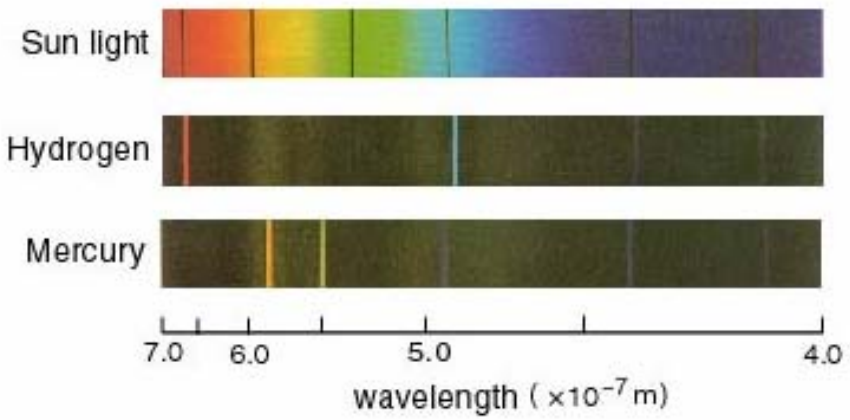
a radiação eletromagnética é *emitida* ou *absorvida* quando o elétron faz uma transição de uma órbita estacionária a outra. Por outro lado, enquanto a órbita do elétron permanecer a mesma, o átomo não perderá nem ganhará energia. Portanto, quando um elétron passa de um nível de energia para outro, a energia perdida ou ganha é emitida ou absorvida sob forma de um único fóton de freqüência *f*.

Energia inicial – Energia final = Energia do fóton

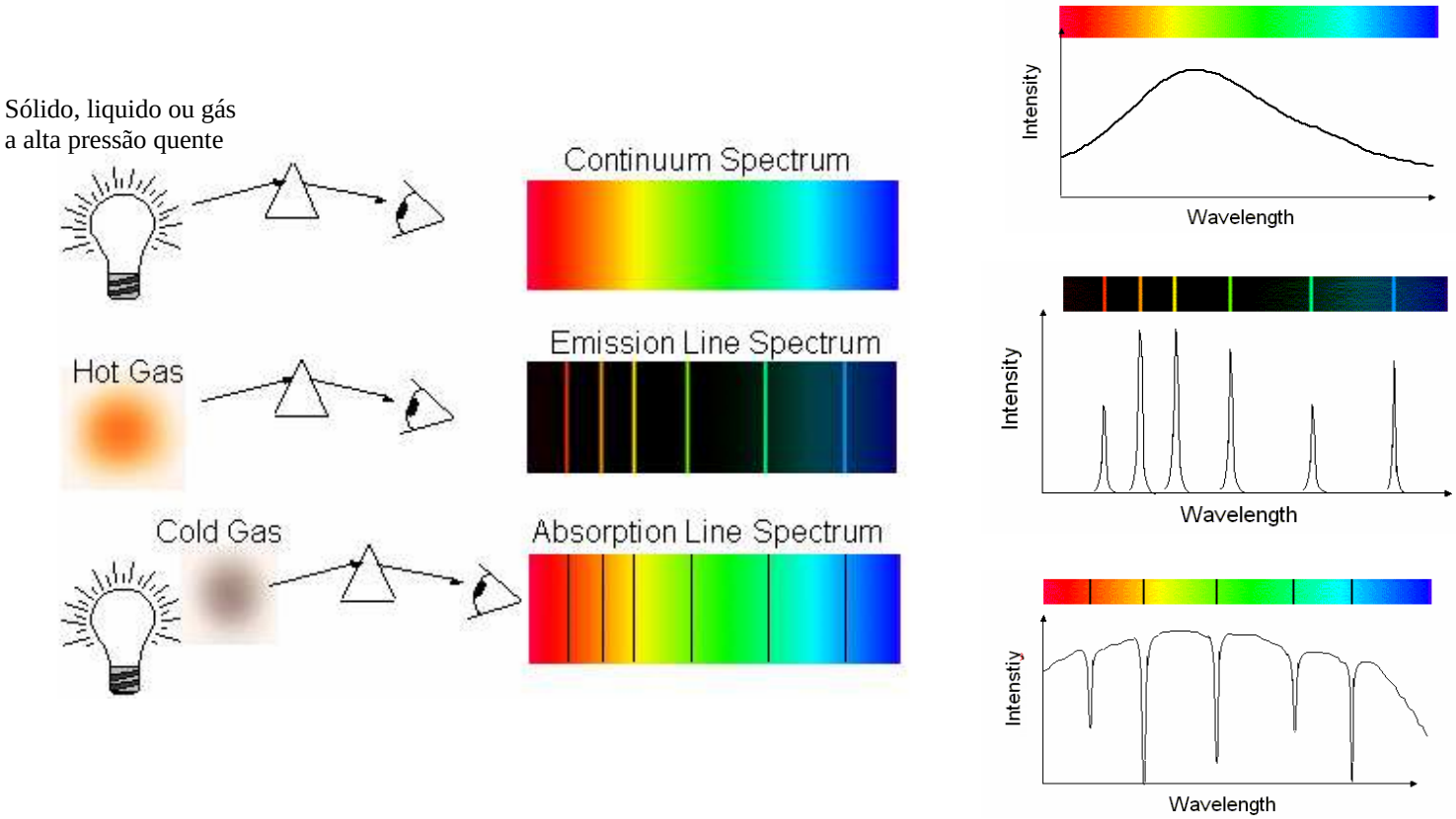
No caso do átomo de hidrogênio se ocorre uma transição de um elétron do nível eletrônico ("órbita") n_i para o nível eletrônico n_f, tal que $n_f > n_i$ (elétron vai para uma "órbita" mais interna) ocorre a emissão de um fóton com energia:

$$E_i - E_f = 13{,}6\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) = hf\,(\text{eV})$$

Devido às configurações eletrônicas e a carga nuclear de cada elementos químicos da tabela periódica serem distintas, o espectro de radiação emitido por cada elemento é único (impressão digital dos átomos). A área conhecida como espectroscopia utiliza esse fato para estudar a presença de átomos distintos numa certa amostra.



Leis de Kirchhoff (explicação das linhas luminosas e linhas escuras dos espectros)



5 O conceito de numero atômico e isótopos.

O núcleo do átomo é formado, basicamente, por partículas de carga positiva, chamadas prótons, e de partículas de mesmo tamanho mas sem carga, denominadas nêutrons. O número de prótons (**ou número atômico**) identifica um elemento químico, comandando seu comportamento em relação aos outros elementos.

O elemento natural mais simples, o hidrogênio, possui apenas um próton; o mais complexo, o urânio, tem 92 prótons, sendo o elemento químico natural mais pesado.

O número de nêutrons no núcleo pode ser variável, pois eles não têm carga elétrica. Com isso, um mesmo elemento químico pode ter massas diferentes. Átomos de um mesmo elemento químico com massas diferentes são denominados **isótopos**.

O hidrogênio tem 3 isótopos: o hidrogênio, o deutério e o trício (ou trítio).

O urânio, que possui 92 prótons no núcleo, existe na natureza na forma de 3 isótopos:

U-234, com 142 nêutrons (em quantidade desprezível);

U-235, com 143 nêutrons, usado em reatores PWR, após enriquecido (0,7%);

U-238, com 146 nêutrons no núcleo (99,3%).

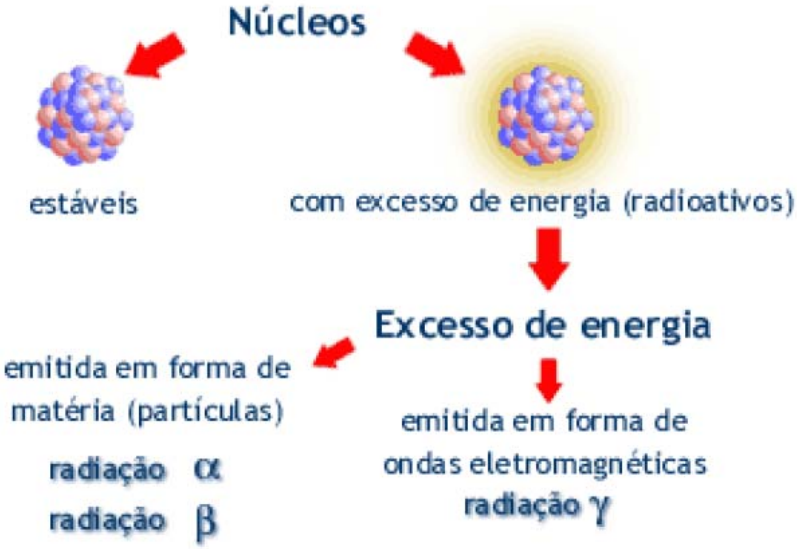
Além dos isótopos existe os **isótonos** que são átomos que possuem o mesmo número de nêutrons e os **isóbaros** que são átomos que possuem o mesmo número de massa

6 Radioatividade

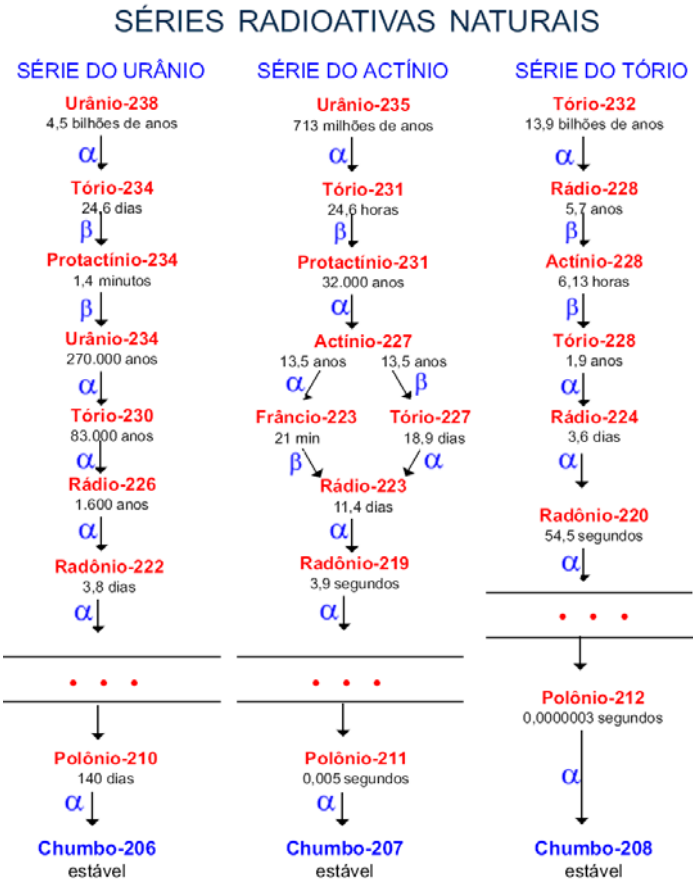
A **radioatividade** é um fenômeno natural ou artificial, pelo qual algumas substâncias ou elementos químicos, chamados radioativos, são capazes de emitir radiações (as quais têm a propriedade de impressionar placas fotográficas, ionizar gases, produzir fluorescência, atravessar corpos opacos à luz ordinária, etc). As radiações emitidas pelas substâncias radioativas são principalmente partículas alfa, partículas beta e raios gama. A radioatividade pode ser:

- Radioatividade natural ou espontânea: É a que se manifesta nos elementos radioativos e nos isótopos que se encontram na natureza e poluem o meio ambiente.

- Radioatividade artificial ou induzida: É aquela que é provocada por transformações nucleares artificiais.



A radioatividade é uma forma de energia nuclear, usada em medicina (radioterapia), e consiste no fato de alguns átomos como os do urânio, rádio e tório serem “instáveis”, perdendo constantemente partículas alfa, beta e gama (raios-X). O urânio, por exemplo, tem 92 prótons, porém através dos séculos vai perdendo-os na forma de radiações, até terminar em chumbo, com 82 prótons estáveis.



ATIVIDADE DE UMA AMOSTRA

Os núcleos instáveis de uma mesma espécie (mesmo elemento químico) e de massas diferentes, denominados **radioisótopos**, não realizam todas as mudanças ao mesmo tempo.

As emissões de radiação são feitas de modo imprevisto e não se pode adivinhar o momento em que um determinado núcleo irá emitir radiação.

Entretanto, para a grande quantidade de átomos existente em uma amostra é razoável esperar-se um certo número de emissões ou transformações em cada segundo. Essa “**taxa**” de transformações é denominada **atividade** da amostra.

A atividade de uma amostra com átomos radioativos (ou fonte radioativa) é medida em:

Bq (Becquerel) = uma desintegração por segundo
Ci (Curie) = $3,7 \times 10^{10}$ Bq

Meia vida $T_{1/2}$

Uma fonte radioativa contém muitos átomos e não há modo de dizer quando um dado núcleo irá se desintegrar. Entretanto, em média, pode-se predizer que após um dado intervalo de tempo, chamado *meia-vida* ($T_{1/2}$), metade dos núcleos (portanto, metade dos átomos) ter-se-á desintegrado. Na próxima meia-vida, metade dos átomos remanescentes irá sofrer decaimento. Cada radioisótopo tem uma meia-vida característica. Um radioisótopo com uma meia-vida longa decai mais lentamente que aquele com uma meia-vida curta.

As meias-vidas $T_{1/2}$ dos radioisótopos variam de um segundo a muitos milhões de anos. Entretanto, a meia-vida dos radioisótopos com aplicação na Biologia deve estar dentro de um certo intervalo de tempo limitado. Por exemplo, a meia-vida do $^{131}_{53}I$, usado no estudo do funcionamento da tireóide, é de 8 dias, enquanto que a do $^{15}_{8}O$, empregado na investigação respiratória, é de 2,1 minutos e a do $^{14}_{6}C$, utilizado na pesquisa de comportamento metabólico de proteínas, açúcares e gorduras, é de 5 760 anos.

Exemplo 5.1 — Seja uma fonte de ouro radioativo (^{198}Au), inicialmente, com 100×10^6 átomos. Sua meia-vida é de 2,7 dias. Portanto, passados 2,7 dias, a fonte radioativa terá 50×10^6 átomos; após $2 \times 2,7$ dias 25×10^6 átomos; após $3 \times 2,7$ dias $12,5 \times 10^6$ átomos e assim por diante. Faça um gráfico com os dados acima referidos.

Solução

Na Figura 5.1 pode ser visto o decaimento exponencial da fonte.

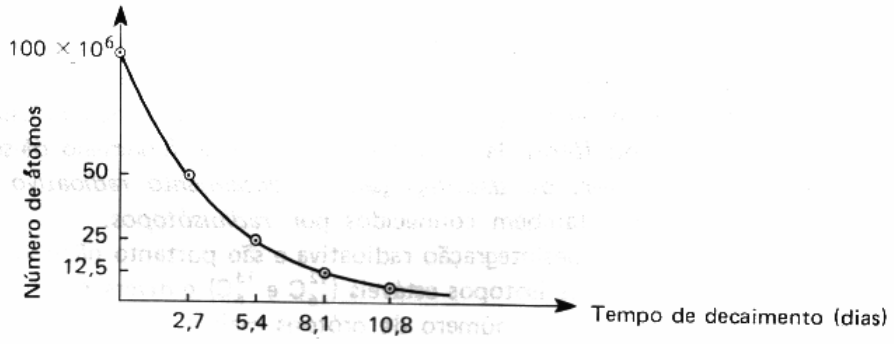


Figura 5.1 — Gráfico do decaimento exponencial de uma fonte de ^{198}Au radioativo, com escalas lineares.

Diz-se que esse tipo de curva apresenta um decaimento exponencial com o tempo. O fato de a desintegração radioativa seguir a lei exponencial é uma indicação de que tal fenômeno é de natureza estatística: cada núcleo em uma amostra de material radioativo possui uma certa probabilidade de desintegração, mas não há um meio de se conhecer, antecipadamente, qual núcleo se desintegrará num dado intervalo de tempo.

Se os mesmos dados do Exemplo 5.1 forem colocados num papel de gráfico semilogarítmico em que a escala vertical é logarítmica e a horizontal linear, em vez de se obter uma curva, obter-se-á uma reta. Esse gráfico pode ser visto na Figura 5.2.

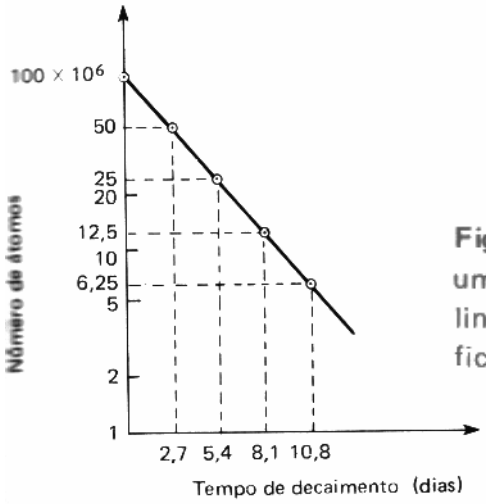


Figura 5.2 — Gráfico do decaimento exponencial de uma fonte de ^{198}Au radioativo com escala de tempo linear e escala do número de átomos logarítmica (gráfico semilogarítmico).

Uma maneira de representar matematicamente o decaimento exponencial, conhecendo-se a constante de decaimento λ, ou seja, a probabilidade de desintegração por unidade de tempo, é através da equação

$$\boxed{N = N_0 e^{-\lambda t}} \qquad (5.1)$$

onde N_0 é o número de átomos inicialmente presentes, N o número de átomos que ainda não se desintegraram após um intervalo de tempo t e e é a base dos logaritmos naturais ou neperianos.

Cada radioisótopo possui um λ característico.

Uma outra expressão matemática para o número N de átomos radioativos que ainda não se desintegraram após um tempo t, conhecendo-se a meia-vida $T_{1/2}$ e o número N_0 de átomos presentes no instante $t = 0$ é

$$\boxed{N = \frac{N_0}{2^{t/T_{1/2}}} = N_0\,[2^{-(t/T_{1/2})}]} \qquad (5.2)$$

Calculando N para $t = T_{1/2}$, $2T_{1/2}$, $3T_{1/2}$ obtém-se, respectivamente, $\frac{N_0}{2}$, $\frac{N_0}{4}$ e $\frac{N_0}{8}$, como era esperado. O cálculo de N pela Equação (5.2) é fácil somente para t igual a números inteiros de $T_{1/2}$.

Exemplo 5.2 — Calcule o número de átomos de ^{198}Au após 12,15 dias se, inicialmente, a amostra era constituída de 10^8 átomos? A meia-vida do ^{198}Au é de 2,7 dias.

Utilizando a Equação (5.2)

$$N = \frac{10^8}{2^{\frac{12,15}{2,7}}} = \frac{10^8}{2^{4,5}} = \frac{10^8}{2^4 \cdot 2^{0,5}} = \frac{10^8}{2^4 \cdot 2^{1/2}} = \frac{10^8}{2^4 \cdot \sqrt{2}}$$

Racionalizando,

$$N = \frac{\sqrt{2}}{2^5} \times 10^8 = \frac{\sqrt{2} \times 10^8}{32} \cong 4,4 \times 10^6 \text{ átomos}$$

Relação entre a constante de desintegração (λ) e meia-vida ($T_{1/2}$)

Sabendo-se que, para $t = T_{1/2}$, N será igual a $N_0/2$, e utilizando a Equação (5.1), obtém-se

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \qquad (5.3)$$

Uma vez que N_0 é diferente de zero, pode ser eliminado de ambos os membros.

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \qquad (5.4)$$

Calculando o logaritmo neperiano de ambos os membros,

$$\ln 2 = \lambda T_{1/2} \qquad (5.5)$$

$$\boxed{0{,}693 = \lambda T_{1/2}} \qquad (5.6)$$

Exemplo 5.3 — Calcule a constante de desintegração de ^{198}Au, cuja meia-vida é de 2,7 dias.

Solução

$$\lambda = \frac{0{,}693}{T_{1/2}} = \frac{0{,}693}{2{,}7} = 0{,}257 \text{ desintegrações por dia}$$

$$\lambda = 2{,}97 \times 10^{-6}\ s^{-1}$$

Exercícios propostos

1)

Num tubo de raios X, um elétron acelerado pode ceder toda a sua energia cinética emitindo um único fóton, correspondente à radiação X. Suponha que esse seja o caso de um elétron com energia cinética de 34,3 keV. Determine:

a. o comprimento de onda de de Broglie associado ao elétron;
b. a velocidade do elétron;
c. o comprimento de onda da radiação X produzida;
d. a velocidade do fóton;
e. a energia do fóton em J.

2)

Um cirurgião tenta colar uma retina descolada usando pulsos de raio laser com duração de 20 ms, com uma potência de 0,6 W. Quanta energia e quantos fótons são emitidos em cada pulso se o comprimento de onda do raio laser é de 643 nm?

3)

Calcule o comprimento de onda da linha espectral correspondente à transição do elétron do átomo de hidrogênio de $n = 4$ para $n = 2$. A que região do espectro eletromagnético pertence essa linha?

Qual a energia necessária para ionizar o átomo de hidrogênio quando o elétron está no estado $n = 3$?

4)

Exercício Proposto — Calcule o número de átomos de ^{198}Au que se desintegram em um dia, se inicialmente há 10^8 átomos, sendo $\lambda = 0{,}257$ desintegrações por dia.

Referências

- Duran J. E. R., 2003, “Biofísica – Fundamentos e Aplicações”, Ed. Peason.
- Okuno E., Caldas I.L. e Chow C., 1986, Física para ciências biológicas e biomédicas, Ed. Harba
- Halliday D, Resnick R. e Walker J., Fundamentos de Física, Volume 4. Livros Técnicos e Científicos Editora SA - LTC, 8ª Ed., 2009.
- Heneine I. F., 2000, “Biofisica Básica”, Ed. Atheneu.