



DECN

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
E CIÊNCIAS NUCLEARES

TÉCNICO LISBOA

Física das Radiações

I - Interações das radiações com a matéria

Rui M.C. da Silva

Curso de Proteção e Segurança Radiológica em Radiografia Industrial
Campus Tecnológico e Nuclear, 24 de novembro de 2015



DECN

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
E CIÊNCIAS NUCLEARES

TÉCNICO LISBOA

Interacções das radiações com a matéria



Interacções das radiações com a matéria

Os assuntos...

- estrutura da matéria;
- átomos e estrutura electrónica
- núcleos e estrutura nuclear
- transferência de energia para a matéria;
- **absorção da energia** pela matéria;
- **difusão, dispersão e atenuação da radiação** ao atravessar os meios materiais com os quais interactua...
- Na ausência de matéria ou de campos a radiação apenas sofre atenuação...



Interacções das radiações com a matéria

O que são ?...

... apresentação das radiações

- toda a forma de transmissão de energia por partículas, atómicas ou sub-atómicas em movimento ou propagação de fótons (campos electro-magnéticos).

Que radiações ?...

- **Radiações ionizantes:** as que, pela energia que conseguem transferir, têm a capacidade de provocar, directa ou indirectamente, a ionização de átomos e moléculas.



Interacções das radiações com a matéria

Sendo ionizantes...

- destroem ou alteram ligações químicas
- provocam alterações directas e indirectas em moléculas
- interferem com reacções químicas

E em sistemas vivos interferem com...

- processos metabólicos
- a codificação de genes e da síntese proteica
- o funcionamento dos sistemas vivos...
... afectam células, tecidos, órgãos e os organismos como um todo!



Interacções das radiações com a matéria

Que radiações são ionizantes ?

Directamente: partículas carregadas...

(a velocidade varia no meio de propagação)

- **protões, partículas alfa, iões pesados (e outros hadrões)**
- **electrões (e outros leptões)**

Fotões X e γ

(propagam-se a velocidade constante no meio)

Indirectamente: partículas neutras...

- **neutrões (e outros hadrões neutros)**
- **leptões neutros.**



Interacções das radiações com a matéria

Com que energias ?

Suficiente para ionizar átomos e/ou moléculas...

- 30 eV: suficiente p/ arrancar os electrões mais fracamente ligados;
- 120 keV: suficiente p/ arrancar os electrões mais fortemente ligados;

O que são “eV” e “keV”? A que correspondem?...

- são unidades de energia adequadas às radiações em causa;
- a fotossíntese é um processo bioquímico complexo que envolve uma cadeia de reacções químicas (catalisadas) redox despoletadas pela luz, i.e. por fotões com energias $< 2-3$ eV...



Interacções das radiações com a matéria

Energias ?

no SI: J (joule) (p.ex. qdo 1 N desloca o seu pto de aplicação de 1 m)

aqui: eV (electrão-volt) (p.ex. en. ganha qdo 1 e⁻ se desloca através de uma ddp de 1 V)

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} (\approx 4,4 \times 10^{-26} \text{ kWh}) \quad (\text{eV, keV, MeV, ... } 1, 10^3, 10^6 \dots)$$

ordem de grandeza da energia envolvida em algumas reacções químicas
p.ex. reacções de combustão de combustíveis fósseis...



Interacções das radiações com a matéria

Energias ?

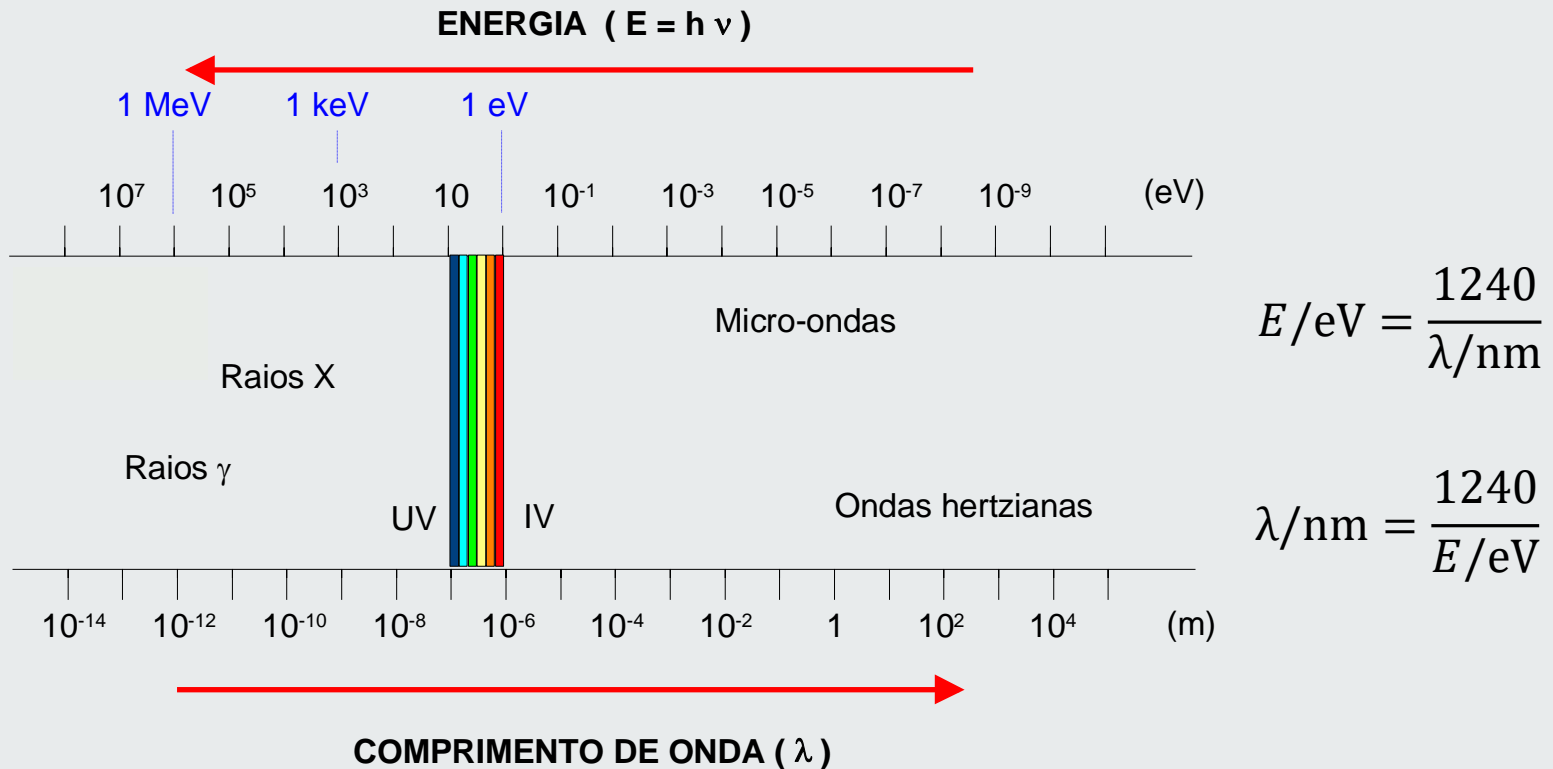
no SI: J (joule) (p.ex. qdo 1 N desloca o seu pto de aplicação de 1 m)

aqui: eV (electrão-volt) (p.ex. en. ganha qdo 1 e⁻ se desloca através de uma ddp de 1 V)

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} (\approx 4,4 \times 10^{-26} \text{ kWh}) \quad (\text{eV, keV, MeV, ... } 1, 10^3, 10^6 \dots)$$

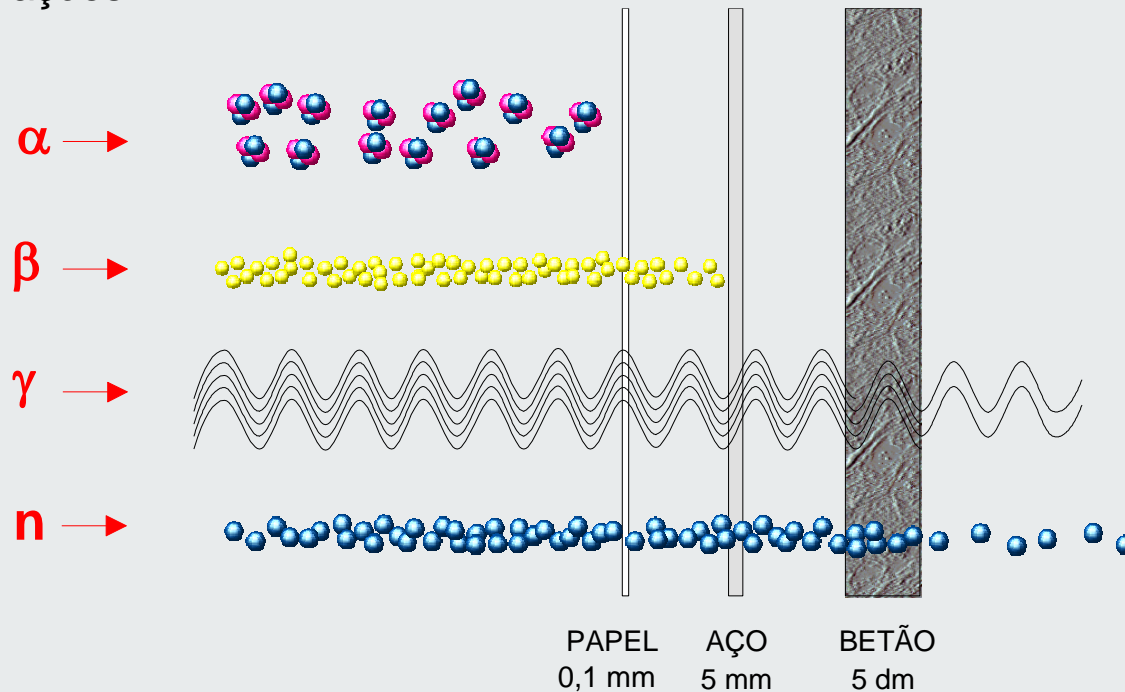
Reacção	Massa/g	Energia/kWh	Energia/eVu-1	(Energia/reacção)/eV
Combustão				
petróleo	86	1	~0,4	~ 40-50
gás	91		~0,4	~ 6-7
carvão	123		0,3	~ 3-4

Interacções das radiações com a matéria



Interacções das radiações com a matéria

As radiações ...



... não são todas iguais



Interacções das radiações com a matéria

Porque há radiações, de onde vêm, de que resultam?

... a origem das radiações

De ...

- como é constituída
- como se organiza
- a que interacções está sujeita

a matéria...

Como ?

- rearranjos dos estados de movimento nos átomos na passagem através da matéria
redistribuições de electrões e nucleões pelos \neq estados de energia disponíveis
- alteração de estados de movimento de partículas carregadas por na passagem por campos (inc. através da matéria, i.e. campos materiais)



Interacções das radiações com a matéria

Porque há radiações, de onde vêm, de que resultam?

A matéria é constituída por substâncias de naturezas diversas, em diferentes estados de agregação, e formadas por compostos com propriedades químicas definidas

Os compostos são constituídos por moléculas (quimicamente) idênticas formadas por combinações de átomos de elementos diferentes

Os átomos de um elemento são constituídos por núcleos e por electrões

Os núcleos atómicos são constituídos por protões e neutrões (colectivamente designados por nucleões)

Estas partículas fundamentais mantêm-se ligadas em configurações mais ou menos estáveis por meio de um número bem definido de forças ou interacções...

... a organização da matéria



Interacções das radiações com a matéria

Porque há radiações, de onde vêm, de que resultam?

Os nucleões – prótons e neutrões – **ligam-se** e mantêm-se ligados **em núcleos atómicos por meio de forças** de muito curto alcance (não actuam para lá dos núcleos) designadas por **interacções fortes**

Os núcleos e os electrões **ligam-se** e mantêm-se ligados **em átomos, os átomos ligam-se** e mantêm-se ligados **em moléculas**, por **interacções electrodinâmicas** (forças entre cargas eléctricas) de longo alcance

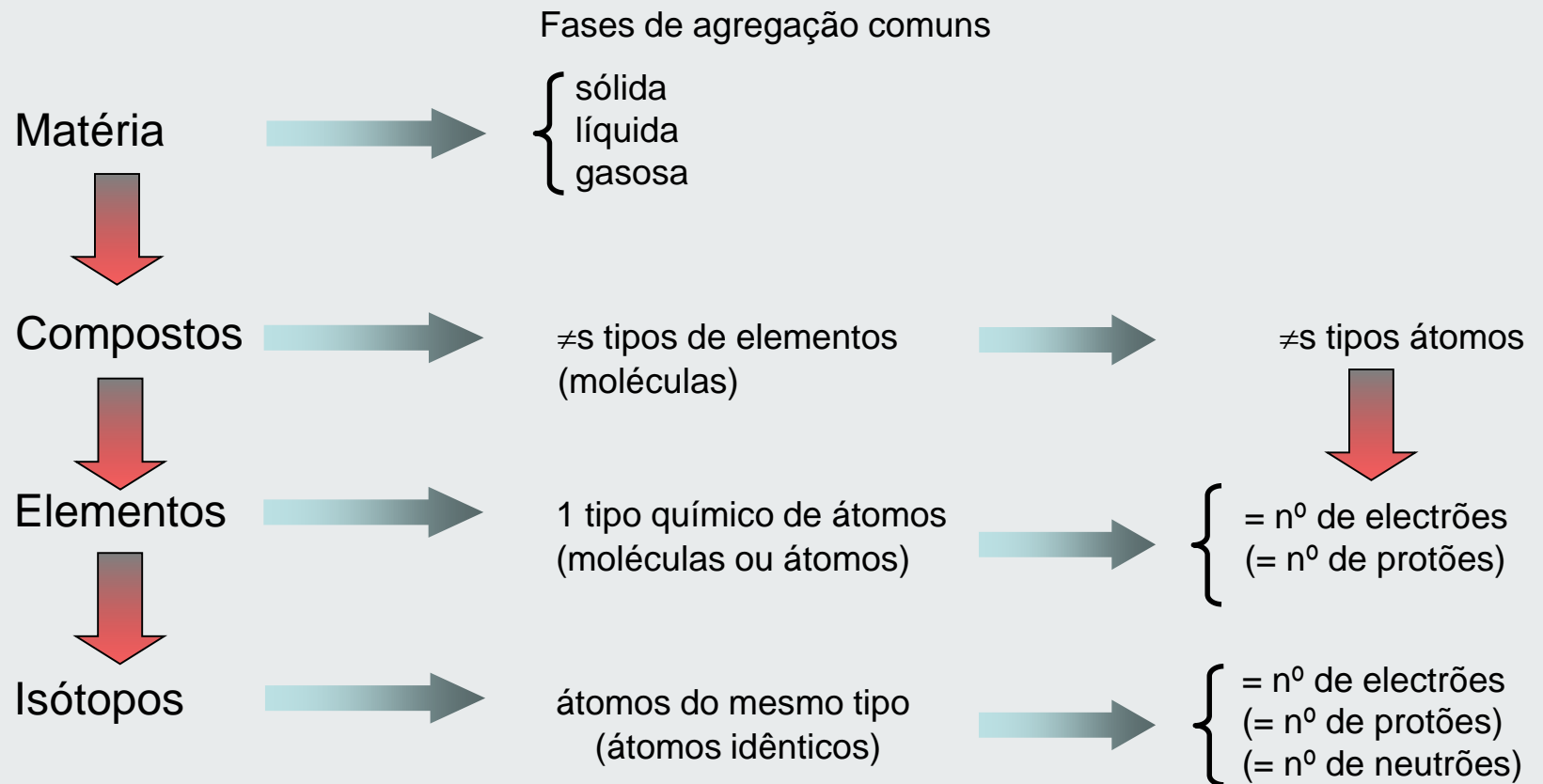
As **alterações**, espontâneas ou provocadas, **destas configurações – de nucleões em núcleos ou de electrões em átomos – dão origem à emissão de radiação** ionizante...

A **instabilidade nuclear dá origem à emissão de** partículas alfa (**radiação alfa**), electrões (**radiação beta**) e fotões (**radiação gama** ou raios gama)...

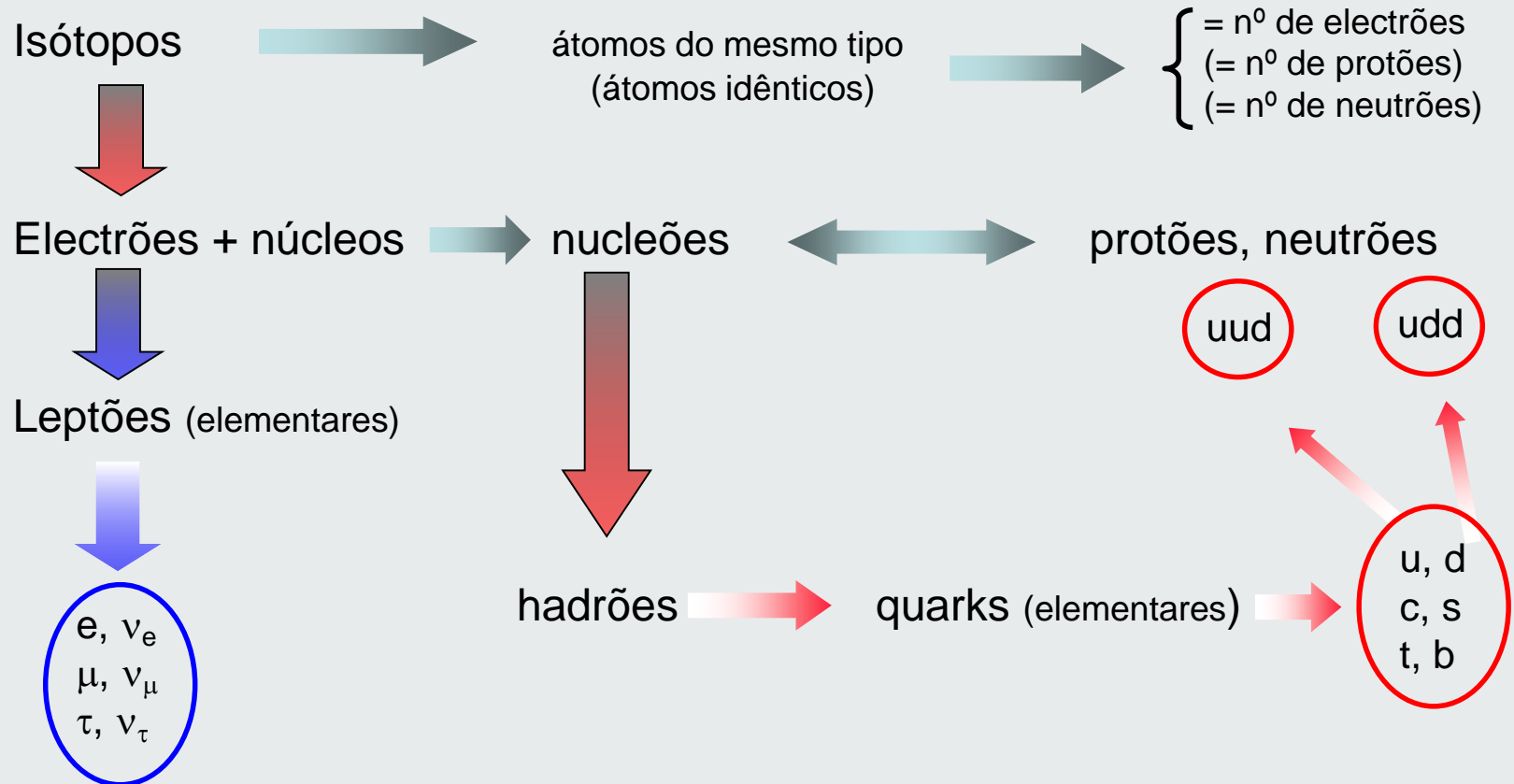
As **alterações das configurações electrónicas** dos átomos **ou de estados de movimento dos electrões dão origem à emissão de** fotões (radiação X ou **raios-X**)

... a organização da matéria

Interacções das radiações com a matéria



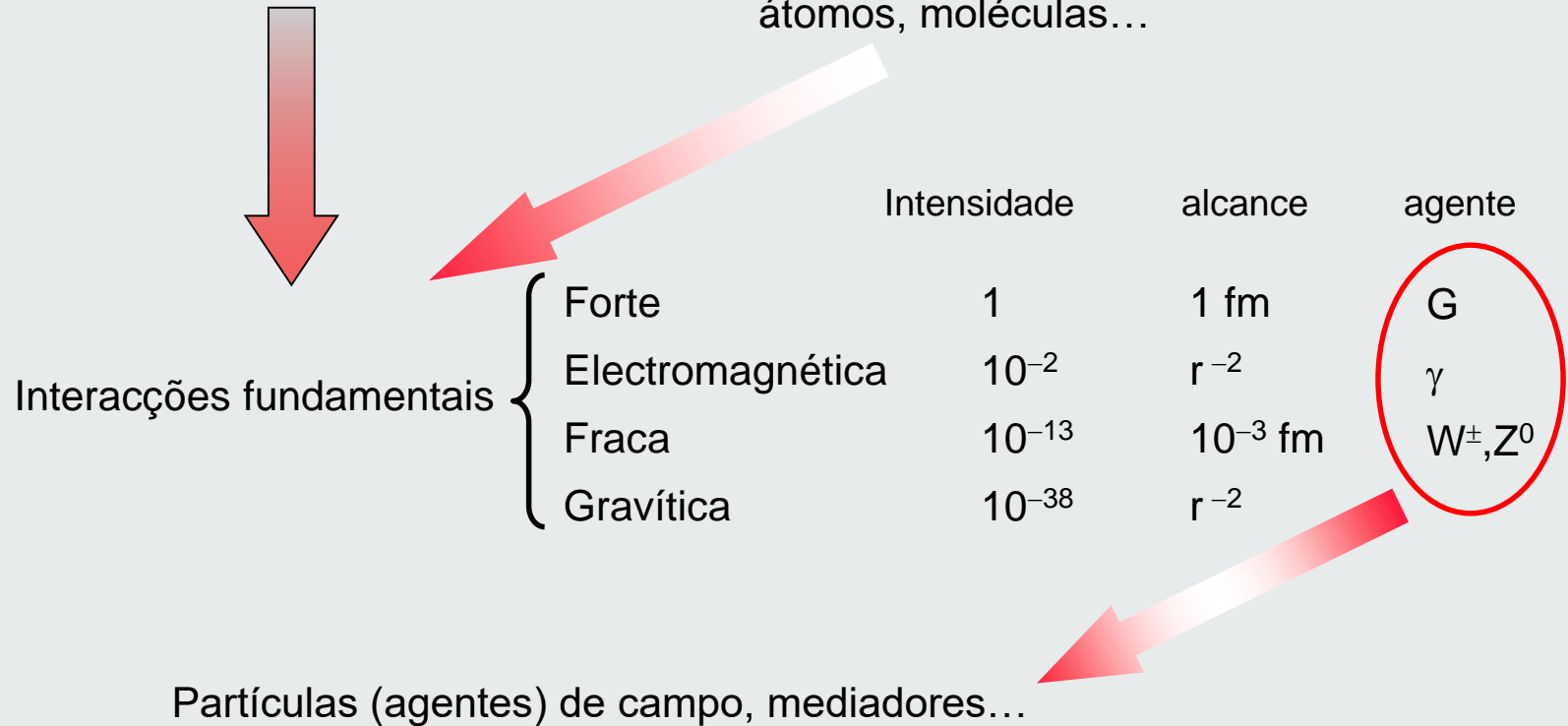
Interacções das radiações com a matéria



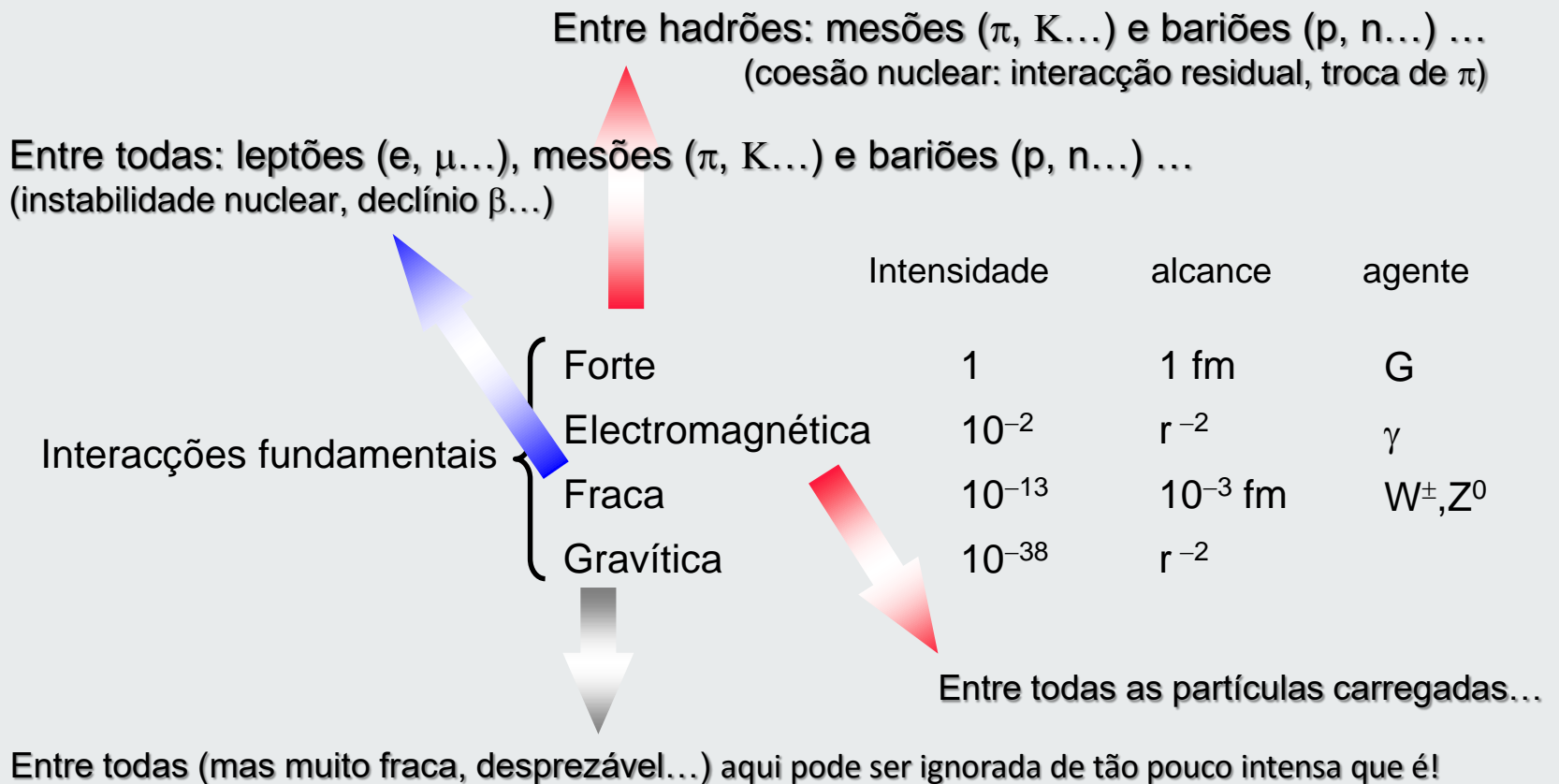
Interacções das radiações com a matéria

Electrões, prótons, neutrões...

átomos, moléculas...

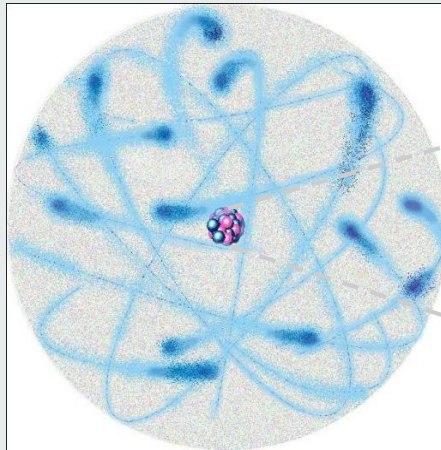


Interacções das radiações com a matéria



A matéria - átomos e núcleos

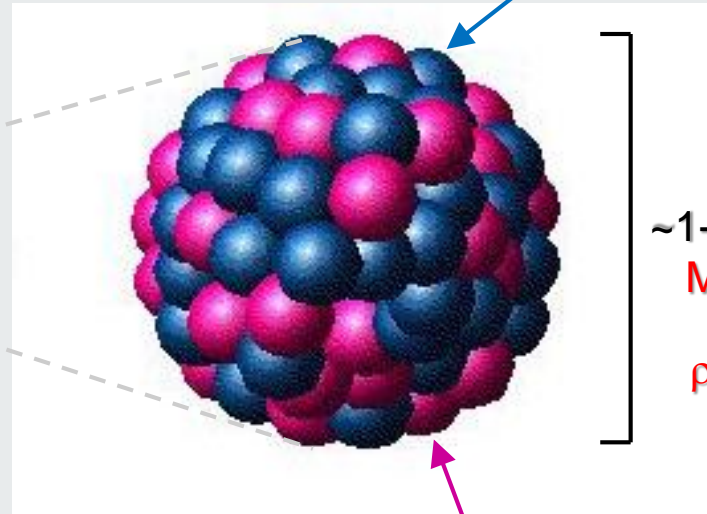
Z electrões... $Q_e = -Ze$



$\sim 1 \cdot 10 \times 10^{-8} \text{ m}$
 $M_e \ll M_N$

Os átomos...

Z protões $Q_N = +Ze$



$\sim 1 \cdot 10 \times 10^{-15} \text{ m}$
 $M_N \sim A \sim M_{\text{átomo}}$
 $\rho_N > 2 \cdot 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

(A - Z) neutrões

... os núcleos atómicos



A matéria - átomos e estrutura electrónica

Modelo de Bohr: modelo dinâmico, com núcleo

H e átomos hidrogenóides...

Definições

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \approx 6,58 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

$$\hbar c = 197,329 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

$$mc^2 \approx 0,511 \text{ MeV}$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

Níveis de energia

$$W_n = -\frac{\alpha^2 mc^2 Z^2}{2 n^2}$$

$$E_1 \approx -13,6 \text{ eV}$$

Diferença de energias entre estados

$$W_{nn'} = RZ^2 \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$R \approx 13,6 \text{ eV}$$

Raios orbitais

$$r_n = \frac{\hbar c}{\alpha mc^2} \frac{n^2}{Z}$$

$$a_1 \approx 0,0529 \text{ nm}$$

A matéria - átomos e estrutura electrónica

Modelo de Bohr-Sommerfeld: modelo dinâmico, com núcleo

H e átomos hidrogenóides...

Sommerfeld relaxou a imposição de simetria circular admitindo órbitas elípticas, sujeitas às condições...

$$\oint p_r dr = n_r h \quad \text{e} \quad \oint p_\theta d\theta = n_\theta h$$

Níveis de energia

$$W_n \rightarrow W_n - \frac{\alpha^4 mc^2 Z^4}{2} \frac{1}{n^4} \left(\frac{n}{l+1} - \frac{3}{4} \right)$$

Diferença de energias entre estados

$$W_{n' \rightarrow n} = W_{n'} - W_n \propto RZ^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$$

O estado de menor energia do átomo não ionizado e não excitado designa-se estado fundamental W_0

A energia do átomo ionizado num determinado nível n é $W_0 + E_n$ ($E_n \rightarrow$ en. de ionização do nível n)

Se um electrão de um nível de menor energia n' transita para o nível n a ionização passa para o nível n'

A energia do átomo ionizado no nível n' é $W_0 + E_{n'}$ e $E_{n'} < E_n$. O átomo perde energia (desexcita-se).

Se a transição for radiativa é emitido um fóton com energia $W_0 + E_n - (W_0 + E_{n'}) = E_n - E_{n'}$

Modelo de Bohr-Sommerfeld...

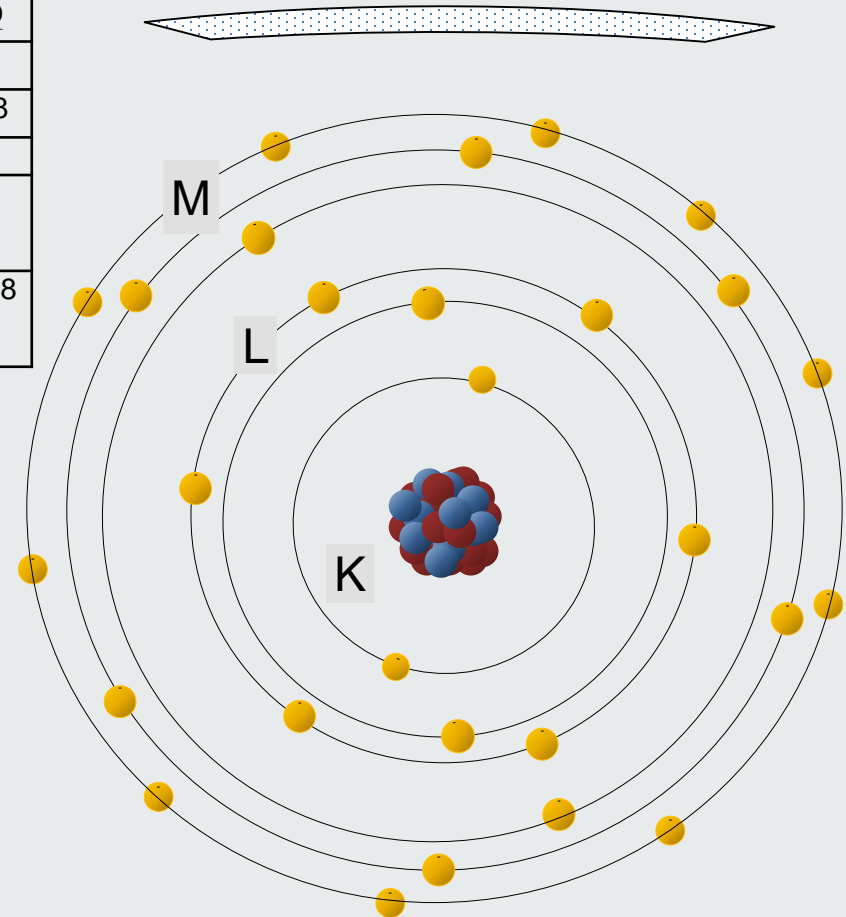
modelo de Bohr + refinamentos...

estrutura electrónica

Designação da camada	K	L	M	N	O	P	Q
Número da camada	1	2	3	4	5	6	7
Número máximo de electrões	2	8	18	32	50	72	98
Número do período (tabela periódica)	1	2	3	4	5	6	7
Número total de electrões Z no último átomo de período	2	10	18	36	54	86	118

As energias de ligação são características de cada átomo... para ionizar um átomo é necessário que a energia fornecida a um electrão (por qualquer meio) seja superior à sua energia de ligação...

Na ausência de qualquer perturbação: os estados são estáveis (estados estacionários)



Modelo de Bohr-Sommerfeld...

modelo de Bohr + refinamentos...

estrutura electrónica

Designação da camada	K	L	M	N	O	P	Q
Número da camada	1	2	3	4	5	6	7
Número máximo de electrões	2	8	18	32	50	72	98
Número do período (tabela periódica)	1	2	3	4	5	6	7
Número total de electrões Z no último átomo de período	2	10	18	36	54	86	118

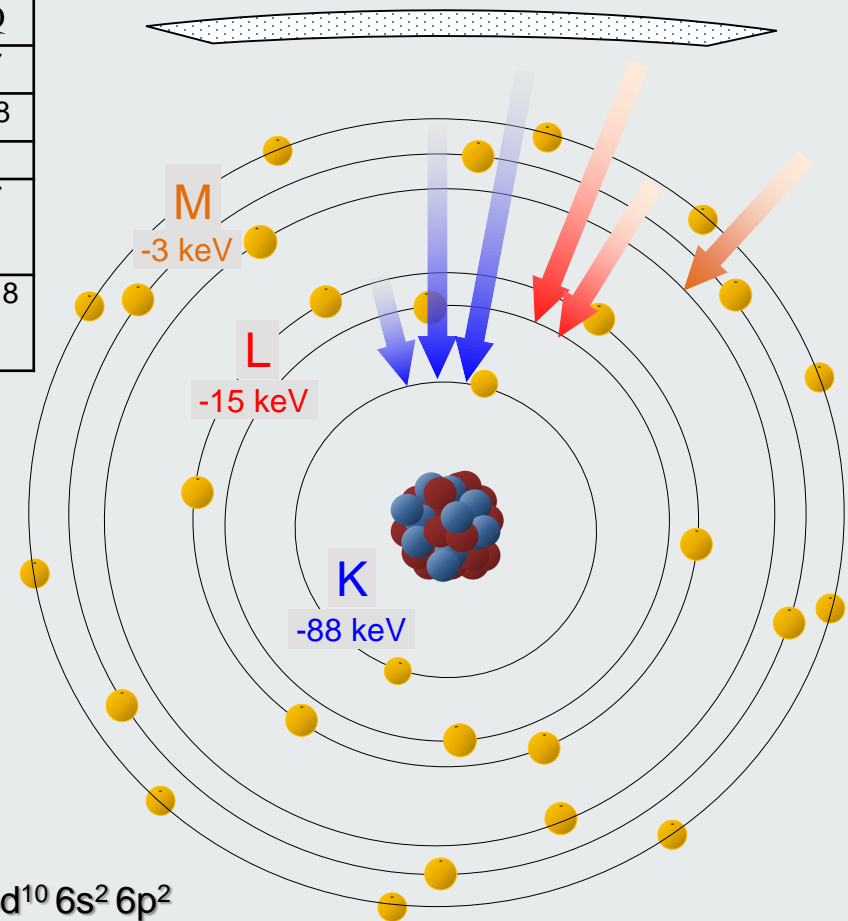
As perturbações podem provocar transições entre estados - transições electrónicas - envolvendo uma emissão ou absorção de energia...

O rearranjo é muito rápido (quase instantâneo)

As emissões designam-se pelo nível de destino...

Série K: transições para o nível K

Série L: transições para o nível L



Modelo de Bohr-Sommerfeld...

modelo de Bohr + refinamentos...

estrutura electrónica

Designação da camada	K	L	M	N	O	P	Q
Número da camada	1	2	3	4	5	6	7
Número máximo de electrões	2	8	18	32	50	72	98
Número do período (tabela periódica)	1	2	3	4	5	6	7
Número total de electrões Z no último átomo de período	2	10	18	36	54	86	118

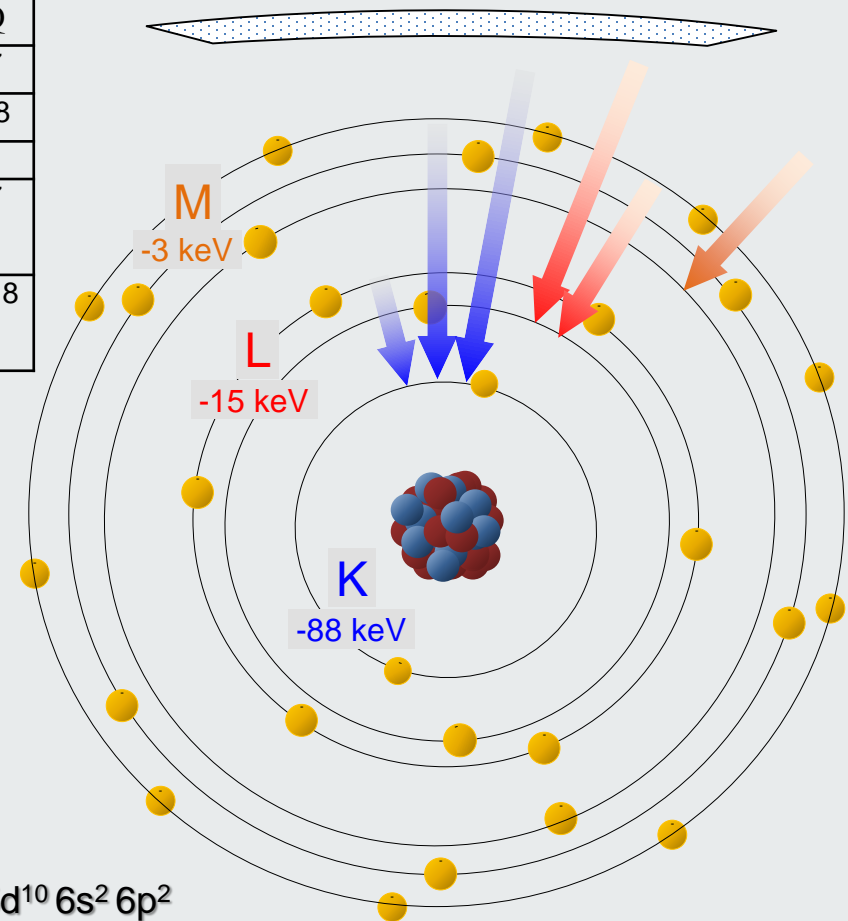
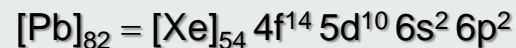
As energias das emissões são determinadas pelas energias dos níveis envolvidos...

$$W_{n' \rightarrow n} = W_{n'} - W_n \propto RZ^2 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right)$$

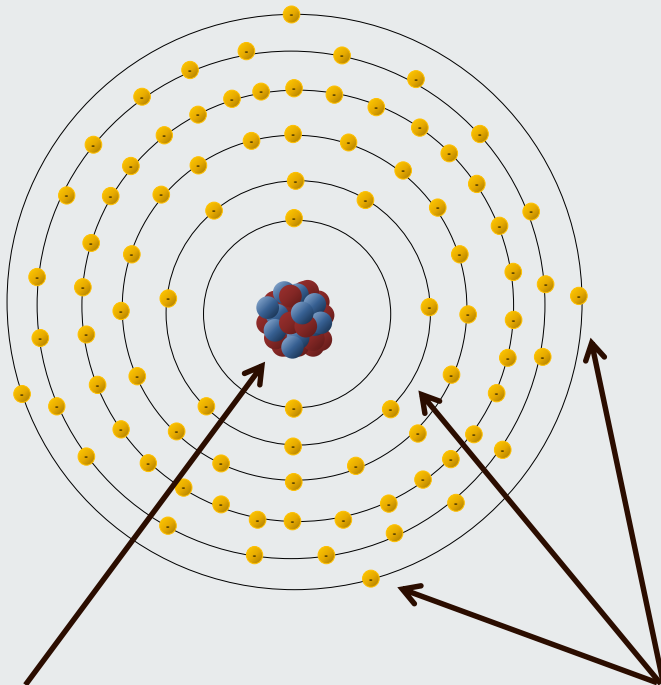
... e escalam com (são proporcionais a)

 Z^2

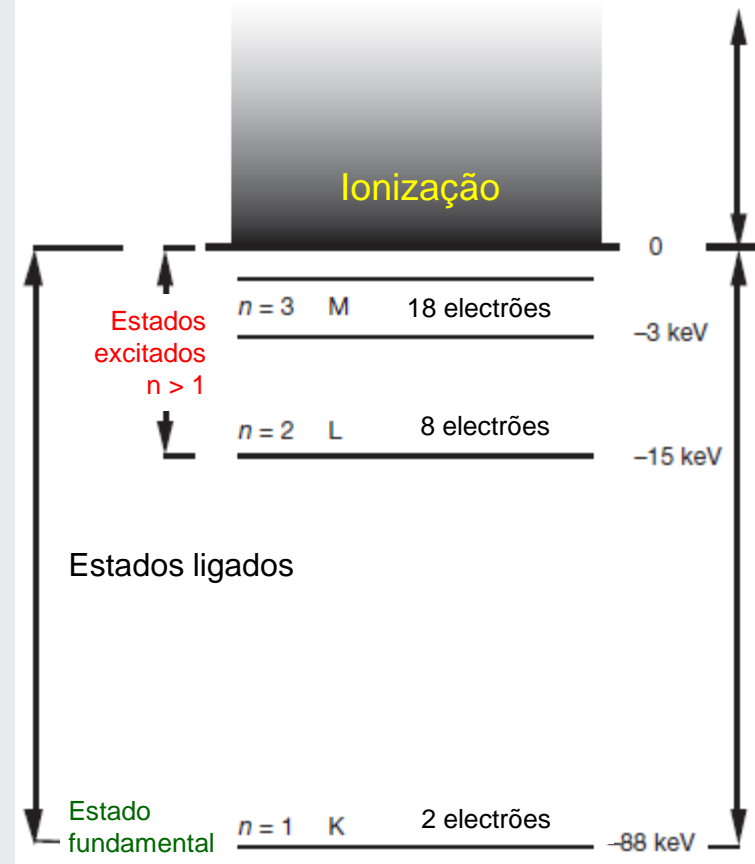
 o afastamento dos níveis ($n' - n$)

 a profundidade do nível onde se criou a lacuna ($1/n'^2$)...


Estrutura electrónica...

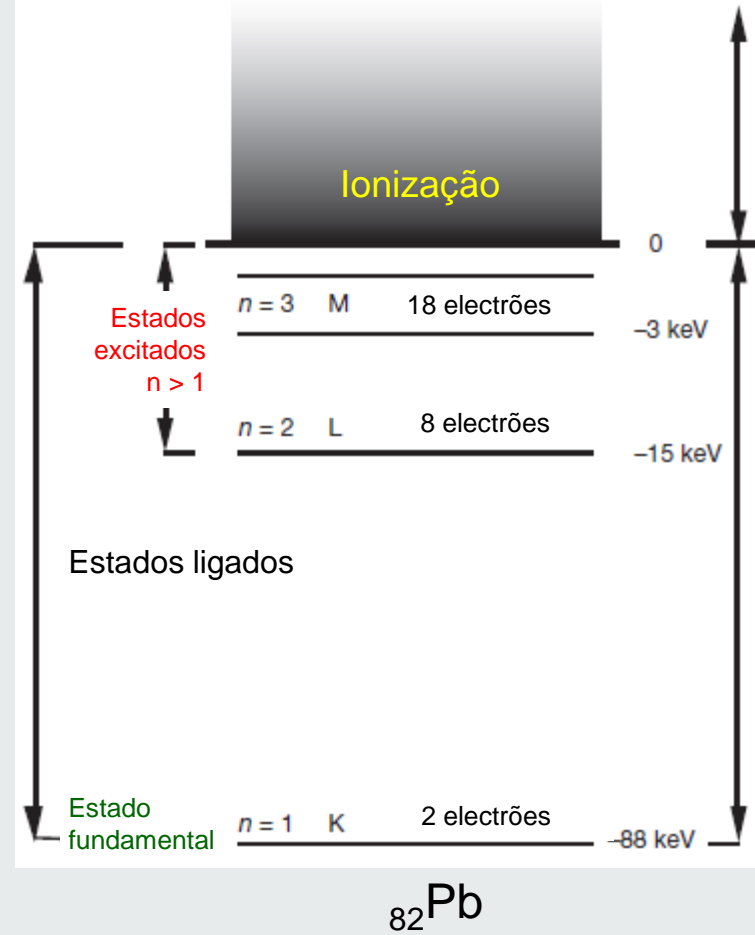
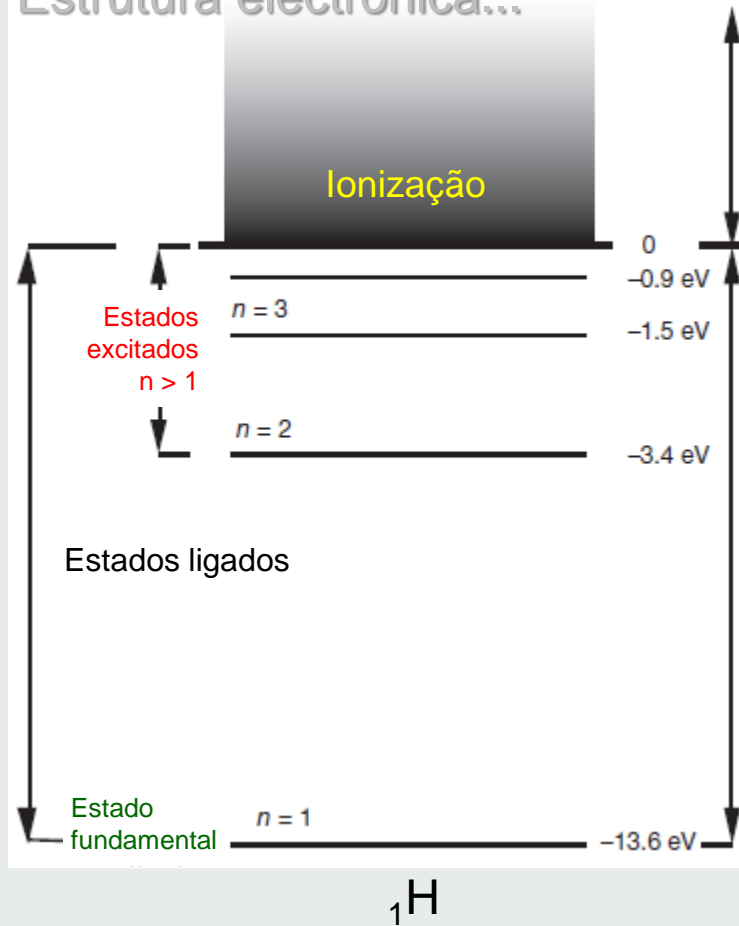


208 nucleões: 126 protões + 82 neutrões 82 eletrões

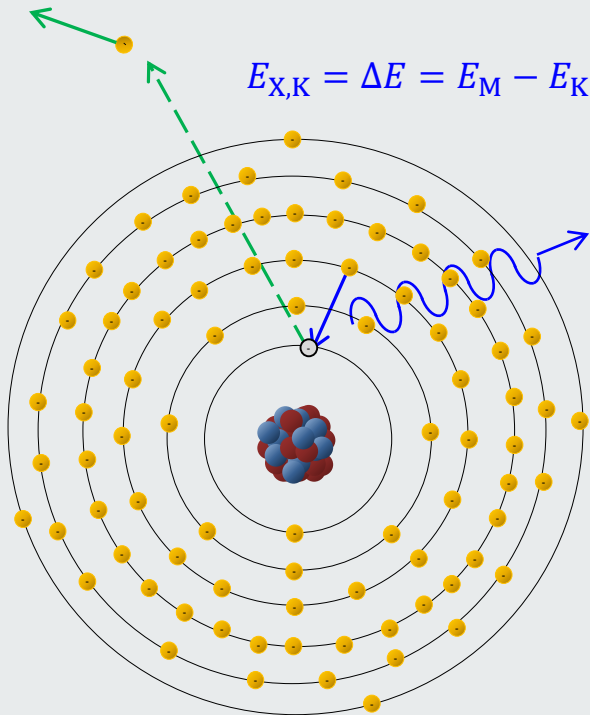


82Pb

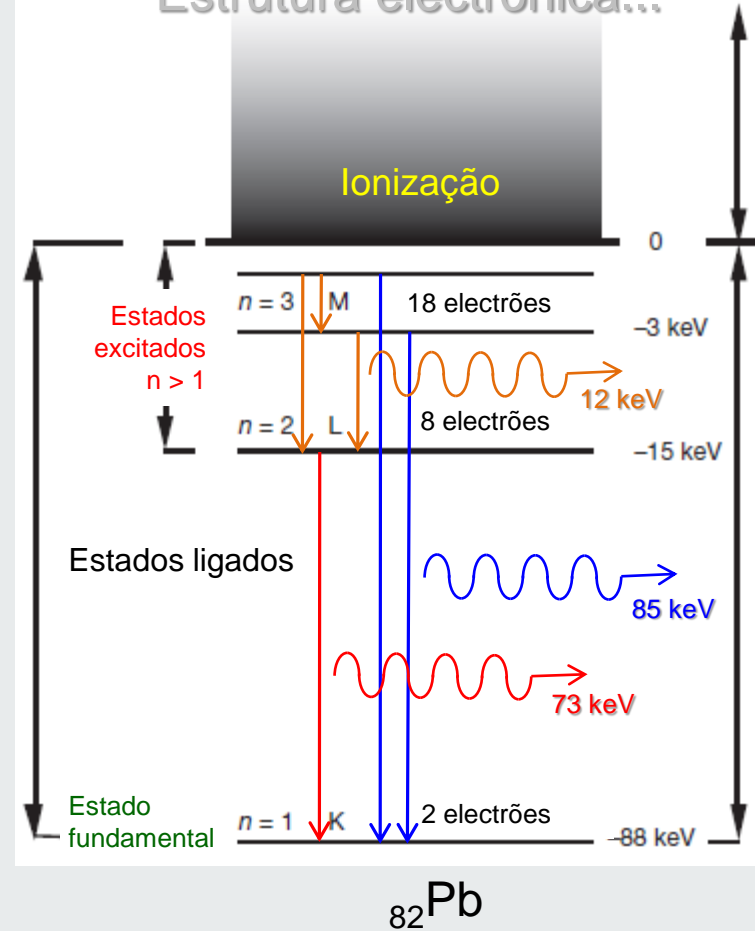
Estrutura electrónica...



Ionização e emissão de fótons...

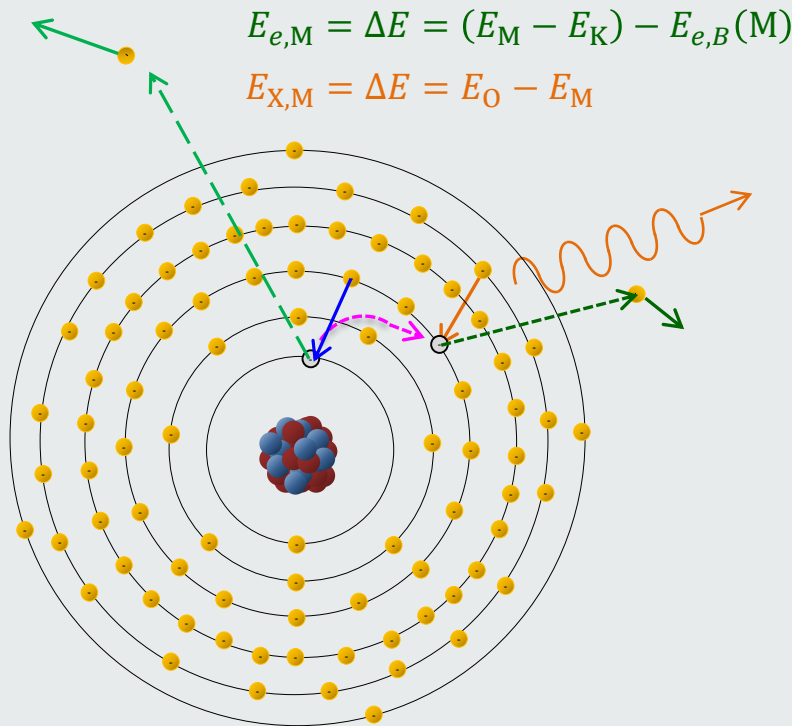


Estrutura electrónica...

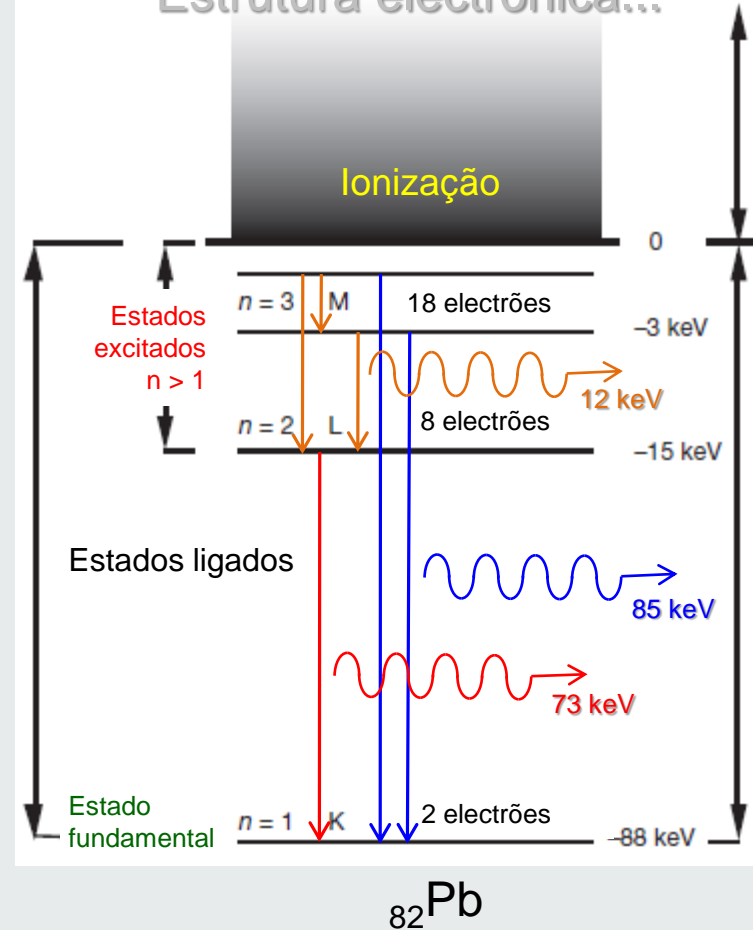


As alterações, espontâneas ou provocadas, das configurações – de nucleões em núcleos ou de electrões em átomos – dão origem à emissão de radiação ionizante...

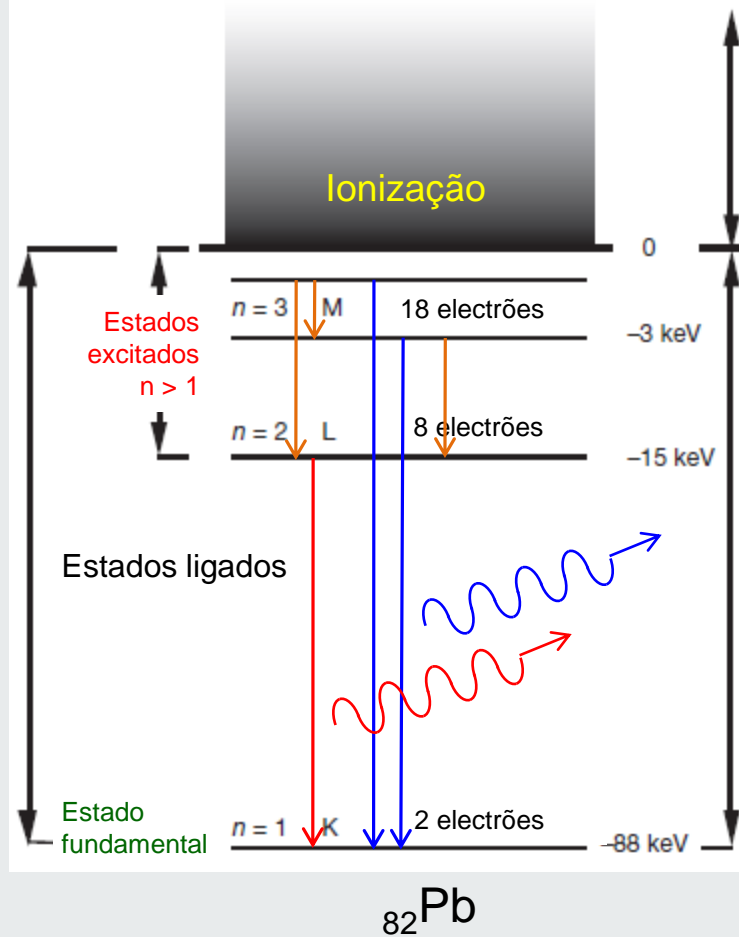
Ionização e emissão de electrões (de Auger) e fotões...



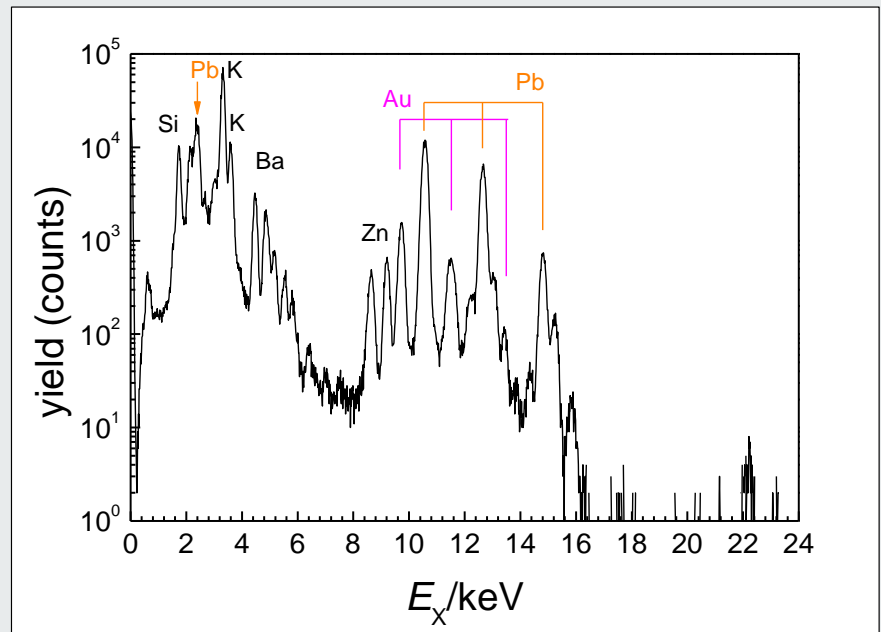
Estrutura electrónica...



As **alterações**, espontâneas ou provocadas, das **configurações** – de nucleões em núcleos ou de electrões em átomos – dão origem à emissão de radiação ionizante...



Espectros discretos...



As **alterações**, espontâneas ou provocadas, **das configurações – de nucleões em núcleos ou de electrões em átomos – dão origem à emissão de radiação ionizante...**



A matéria - núcleos e estrutura nuclear

No núcleo também há níveis de energia...

Os estados energéticos dos nucleões também se distribuem por uma estrutura energética...

Mas o núcleo é mais complicado...

Há prótons - com carga eléctrica - e neutrões (sem carga) simultaneamente presentes...

Entre prótons há repulsões electrostáticas que dominam as interacções electrofracas...

Os neutrões não estão sujeitos às repulsões electrostáticas...

Há dois tipos de nucleões em interacção com interacções mútuas...

Há dois tipos de potenciais em jogo, o potencial coulombiano de longo alcance...

o potencial forte de curto alcance...

Não há um centro de forças definido (o potencial não é central)...



A matéria - núcleos e estrutura nuclear

Energia potencial:

Propriedades da interação (forte) entre nucleões...

Curto alcance

→ só entre vizinhos próximos

Core repulsivo

→ ~ 0,5 fm

→ os nucleões não colapsam uns sobre os outros

→ há uma distância de equilíbrio

→ saturação (proporcional a A)

Simétrica na carga:

$$V_{pp} \approx V_{nn}$$

Independente da carga:

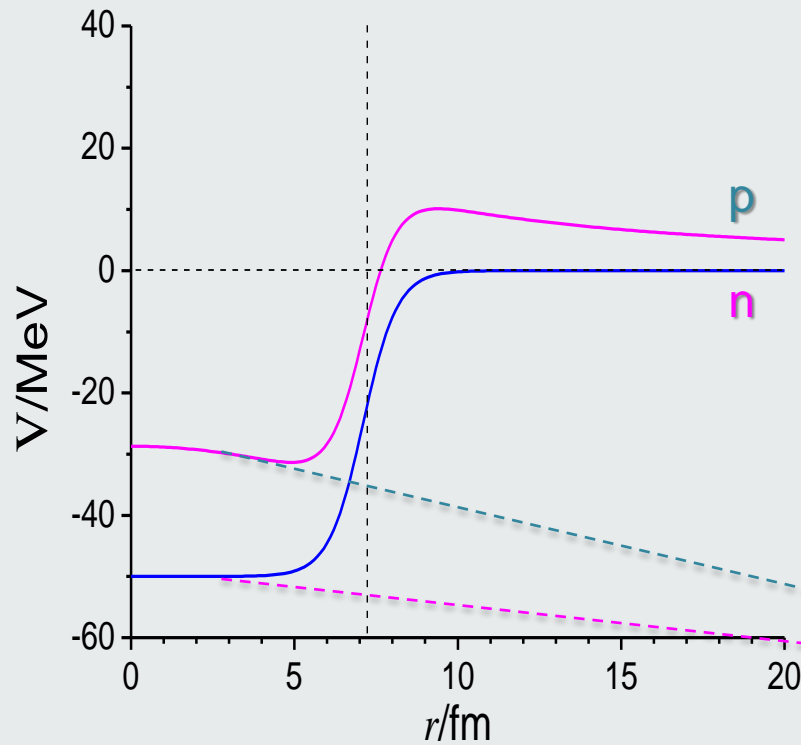
$$V_{pp} \approx V_{nn} \approx V_{pn} \text{ nos mesmos estados de } spin (S = 0)$$

$$V_{pn} > V_{pp} \approx V_{nn} \text{ em estados de } spin S = 1$$

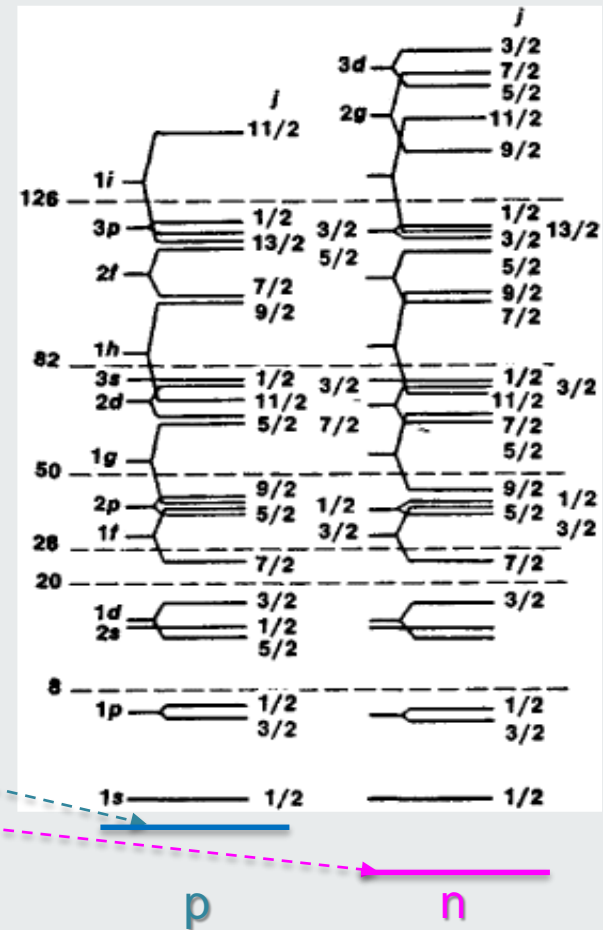
Dependente do *spin*:

atractivas se $\vec{L} \cdot \vec{S} > 0$, repulsivas se $\vec{L} \cdot \vec{S} < 0$

Níveis de energia nucleares



Estrutura nuclear...



Nomenclatura



X – elemento (símbolo químico)

A – número de massa (número de nucleões)

Z – número de protões (carga nuclear)

N – número de neutrões

$$A = Z + N$$

Núclidos – espécie nuclear de um elemento (X) caracterizada por A, Z (e $N = A - Z$)

Para cada elemento X existem núclidos diferentes, com $\neq A$ mas com a mesma carga Z

Isótopos – diferentes núclidos de um mesmo elemento (mesmo Z, $\neq A$) ${}_{26}^{54}\text{Fe}$, ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ e ${}_{26}^{57}\text{Fe}$

Isóbaros – núclidos com o mesmo A ($\neq Z$, N) ${}_{18}^{40}\text{Ar}$, ${}_{19}^{40}\text{K}$ e ${}_{20}^{40}\text{Ca}$

Isótonos – núclidos com o mesmo N ($\neq Z$, A) ${}_{26}^{56}\text{Fe}$, ${}_{28}^{58}\text{Ni}$ e ${}_{30}^{60}\text{Zn}$

Isómeros – núclidos com o mesmo A, N, Z ($\neq E$), com vida "longa" ($T_{1/2} \gtrsim \mu\text{s}$) ${}_{47}^{110}\text{Ag}$ e ${}_{47}^{110m}\text{Ag}$

$$\{E, T_{1/2}\}({}^{108m}_{47}\text{Ag}) \equiv \{109 \text{ keV}, 418 \text{ a}\}$$

$$\{E, T_{1/2}\}({}^{110m}_{47}\text{Ag}) \equiv \{\approx 117 \text{ keV}, 250 \text{ d}\}$$

Estabilidade e instabilidade nucleares

Que núclidos tendem a ser mais estáveis ?...

Os números de prótons e neutrões nos núcleos condicionam a estabilidade nuclear...

Os núcleos com **mais prótons** requerem **mais neutrões** para a coesão e estabilidade...

Os núcleos com **números ímpares de prótons e neutrões tendem a ser instáveis...**

Os núcleos com **números pares de prótons e neutrões tendem a ser mais estáveis...**

Z	N	Estáveis
Par	Par	165
Par	Ímpar	57
Ímpar	Par	53
Ímpar	Ímpar	4

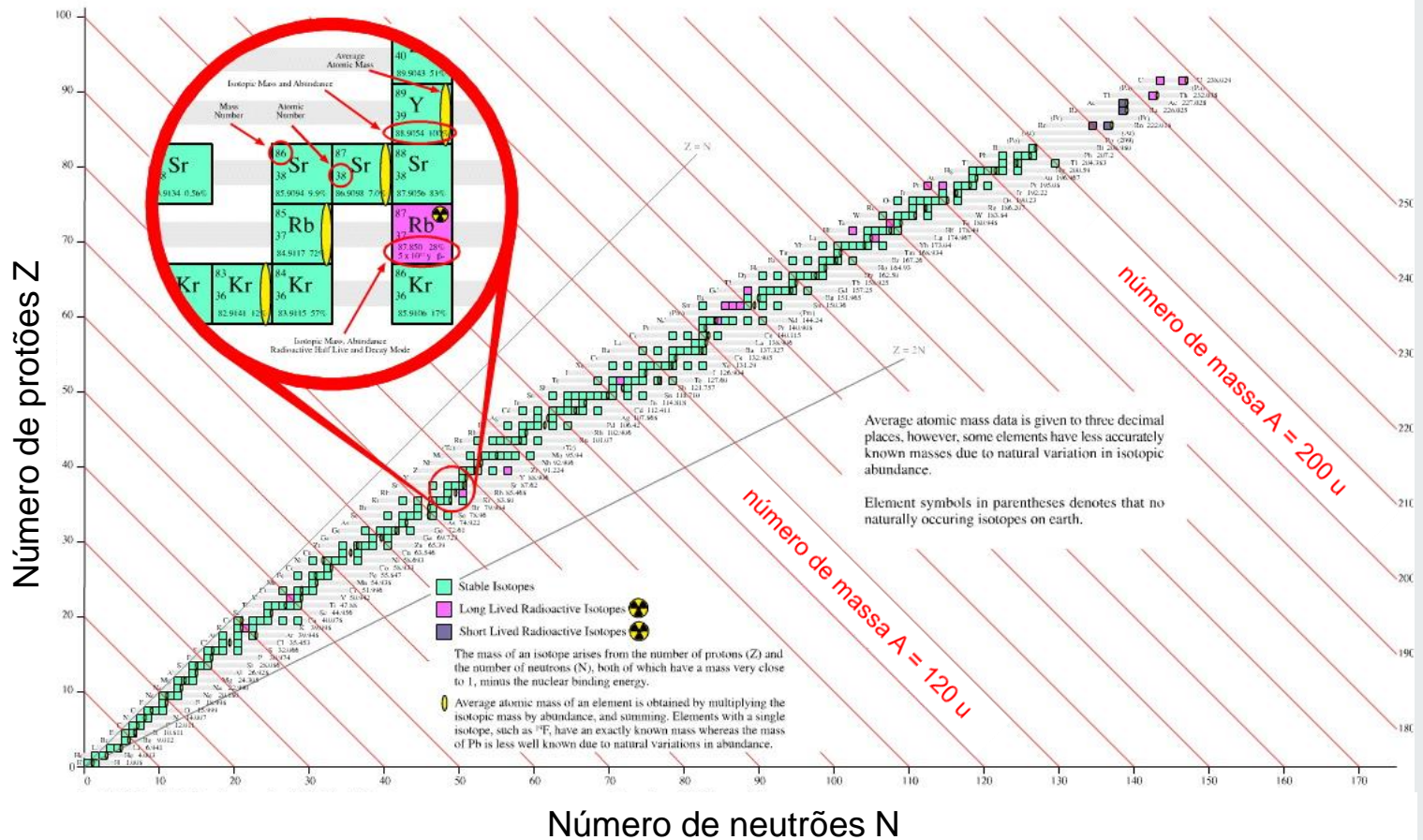
Para núclidos estáveis...

$$Z \approx \frac{A}{2 + 0,01565A^{2/3}}$$

Isótopos naturais

Diagrama de Segré

... os que têm prótons e neutrões em números tais que se localizam na região colorida do diagrama

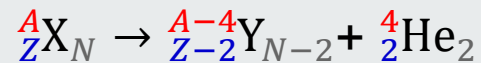




Como transitam para a estabilidade ?

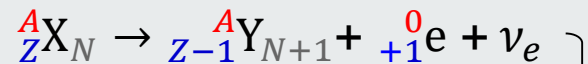
Alterando a configuração nuclear em diferentes tipos de declínios

Declínio α ...



$$\Delta A = -4 \Rightarrow \Delta N = \Delta Z = -2$$

Declínios β ...



β^+, CE

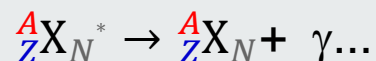
$$\Delta A = 0 \Rightarrow -\Delta N = \Delta Z = -1$$



β^-

$$\Delta A = 0 \Rightarrow -\Delta N = \Delta Z = +1$$

Declínio γ ...

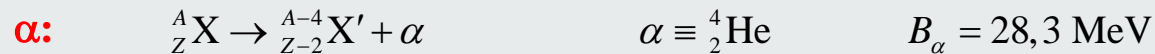


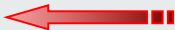
$$\Delta A = 0 \wedge \Delta N = 0 \wedge \Delta Z = 0$$

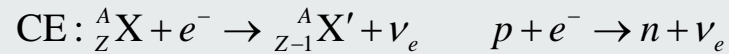
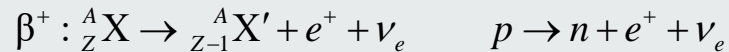
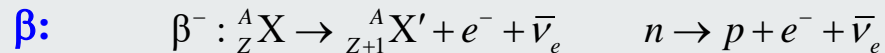
...


Como transitam para a estabilidade ?

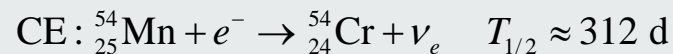
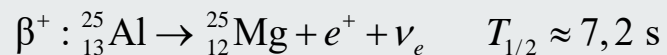
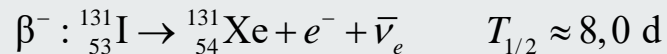
α , β e γ : um núcleo instável "procura" a estabilidade emitindo uma partícula α ou β : transforma-se noutra...



$\Delta A = -4, \quad \Delta Z = -2$ 

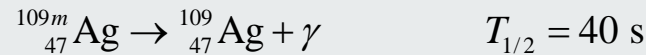
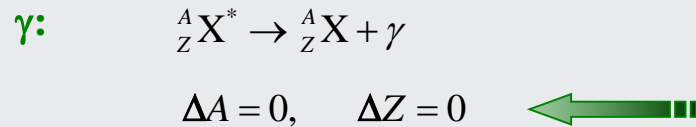


$\Delta A = 0, \quad \Delta Z = \pm 1$ 



Como transitam para a estabilidade ?

... ou emitindo um fotão γ : **desexcita-se para um estado de menor energia**



IC: Processo alternativo (e competitivo): **conversão interna**

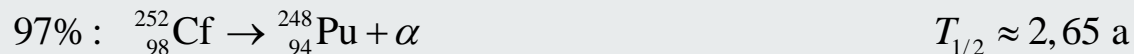


Como transitam para a estabilidade ?

... ou mesmo cindindo-se (fragmentando-se) ou emitindo núcleões: **transforma-se noutro...**

Cisão espontânea

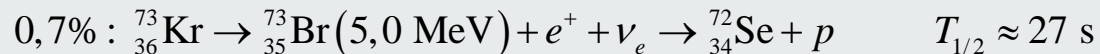
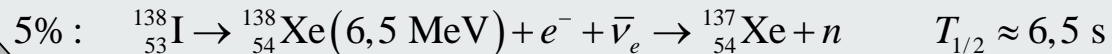
Núcleos pesados (A elevado) com excesso de neutrões fragmentam-se em 2 fragmentos com massas intermédias e excesso de neutrões → emissão imediata de neutrões ($\sim 10^{-16}$ s)



Emissão de nucleões

Isóbaros afastados do equilíbrio → emissão de nucleões

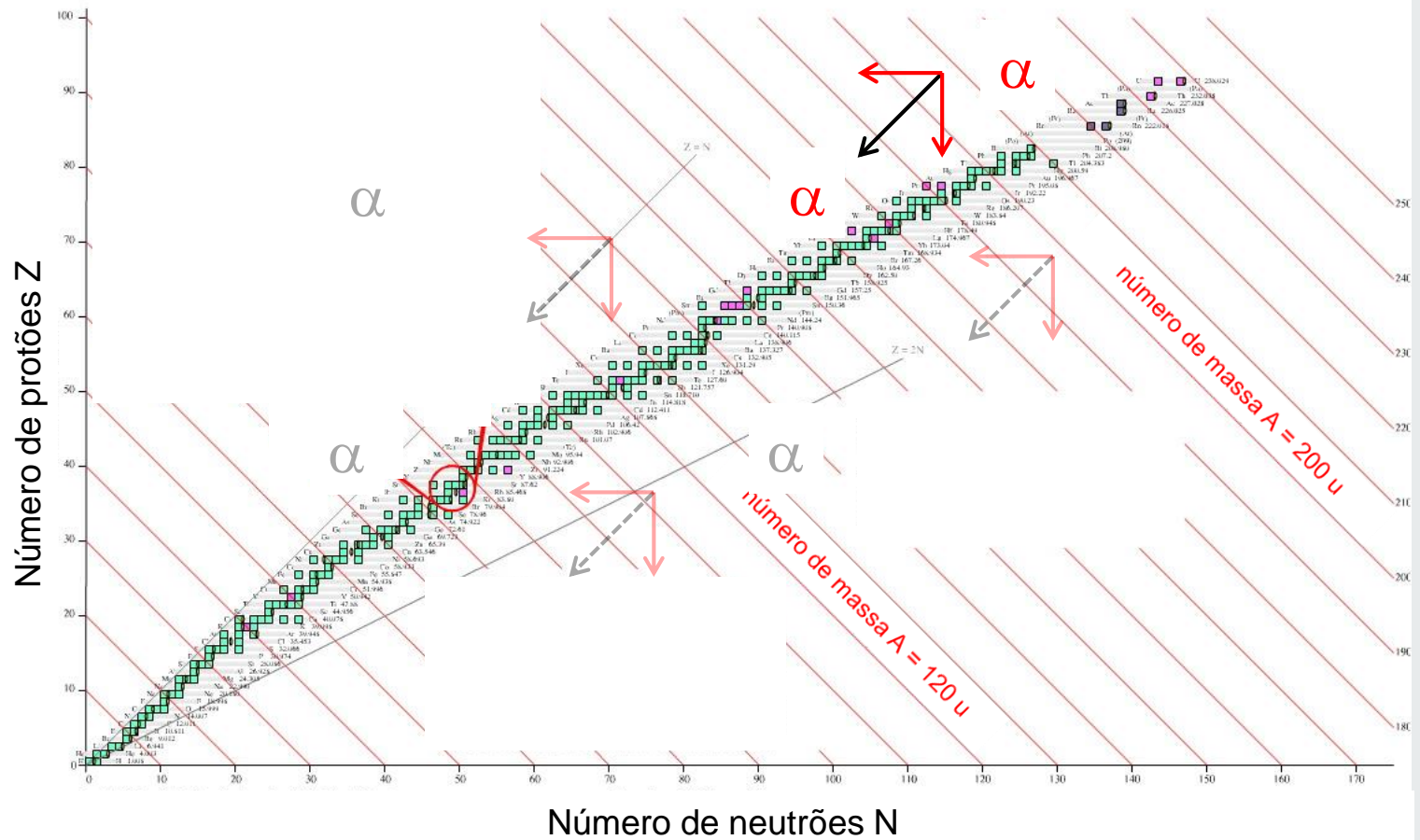
Frequente em produtos de cisão → emissão atrasada de neutrões ($\sim 10\text{-}100$ s)



Isótopos naturais

$$\Delta A = -4 \Rightarrow \Delta N = \Delta Z = -2$$

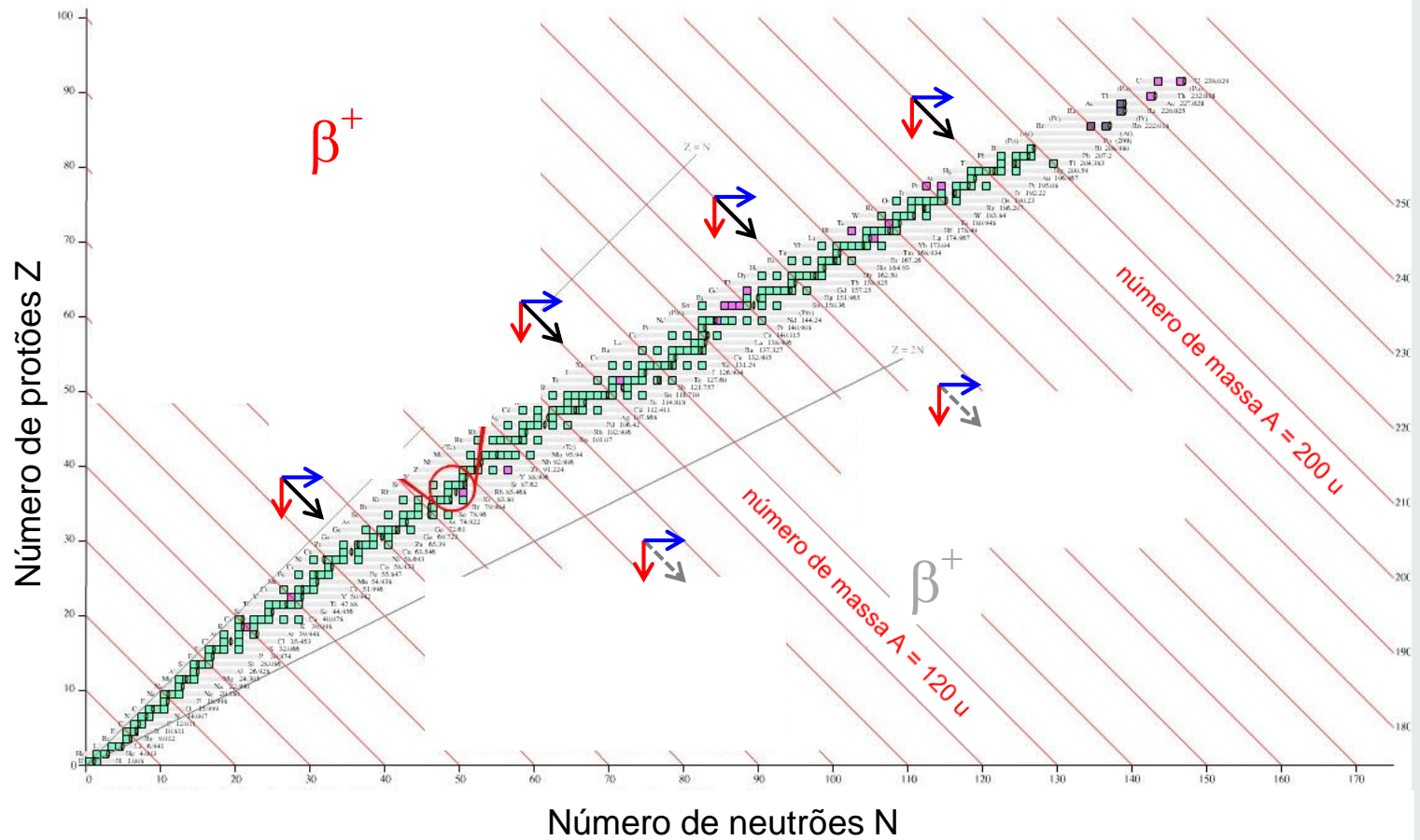
Diagrama de Segré



Isótopos naturais

$$\Delta A = 0 \Rightarrow \Delta N = -\Delta Z = +1$$

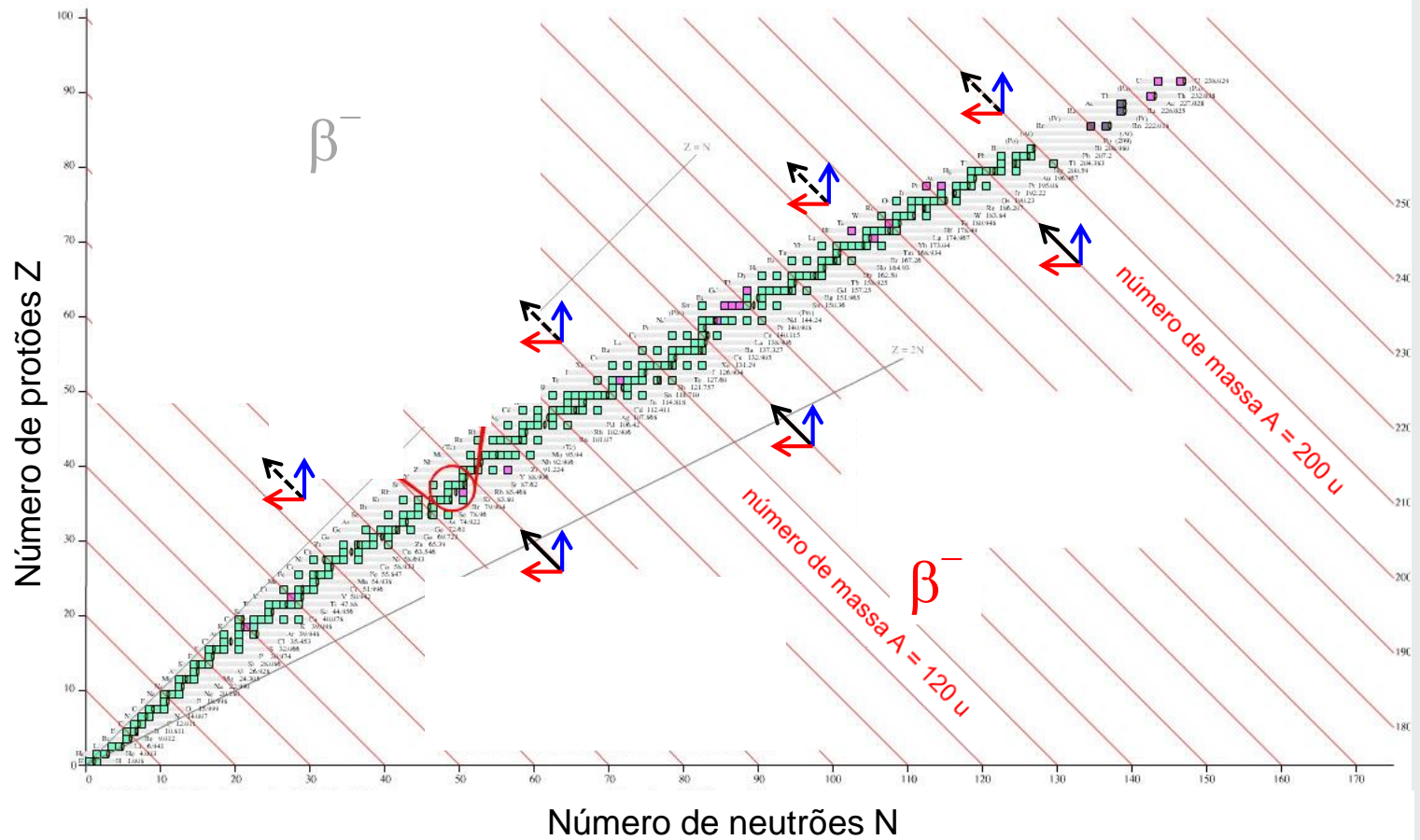
Diagrama de Segré

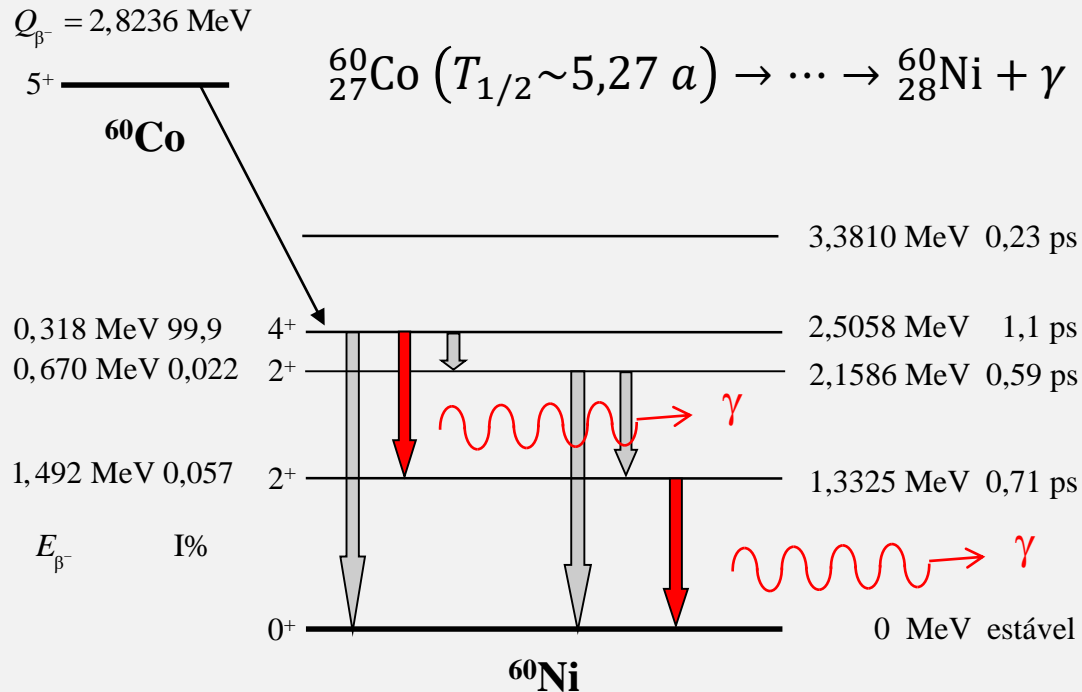


Isótopos naturais

$$\Delta A = 0 \Rightarrow \Delta N = -\Delta Z = -1$$

Diagrama de Segré



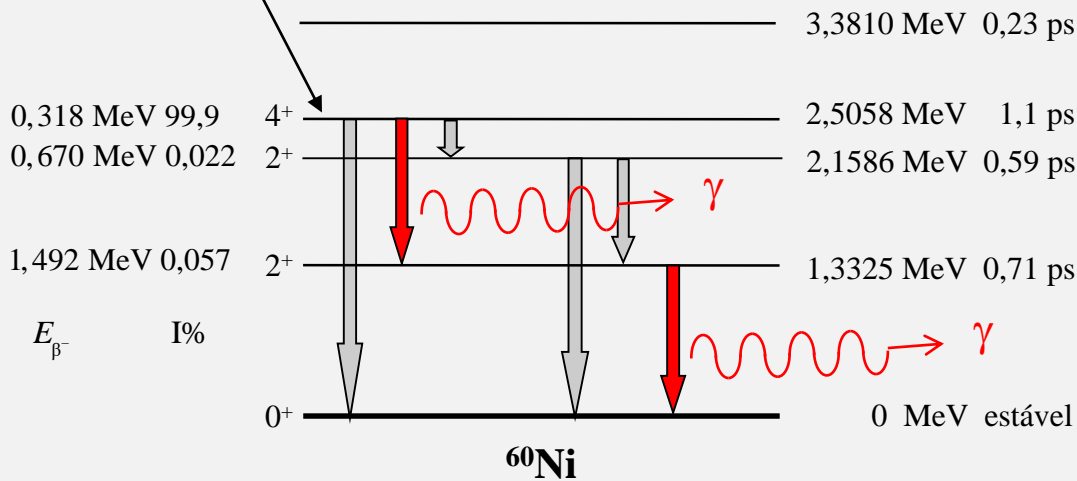
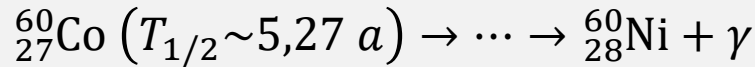


As **alterações**, espontâneas ou provocadas, **das configurações** – de nucleões em núcleos ou de electrões em átomos – **dão origem à emissão de radiação ionizante...**

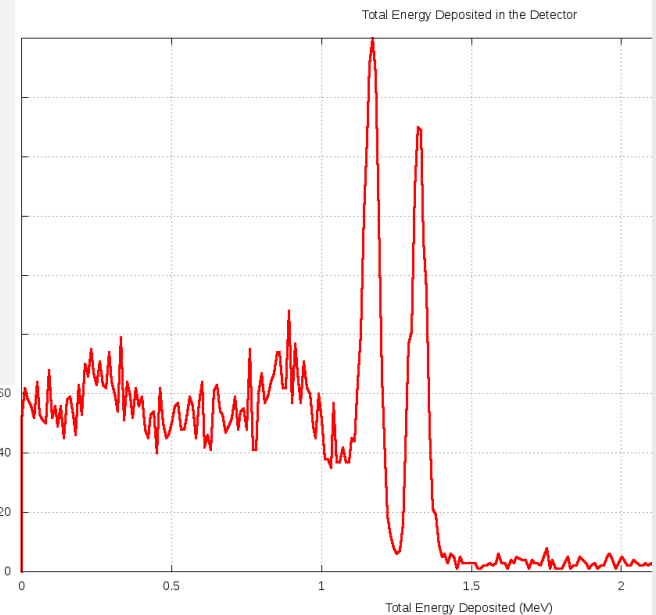
Em particular **a instabilidade nuclear dá origem à emissão de radiação alfa, radiação beta, ou radiação gama (fotões γ)...**

$$Q_{\beta^-} = 2,8236 \text{ MeV}$$

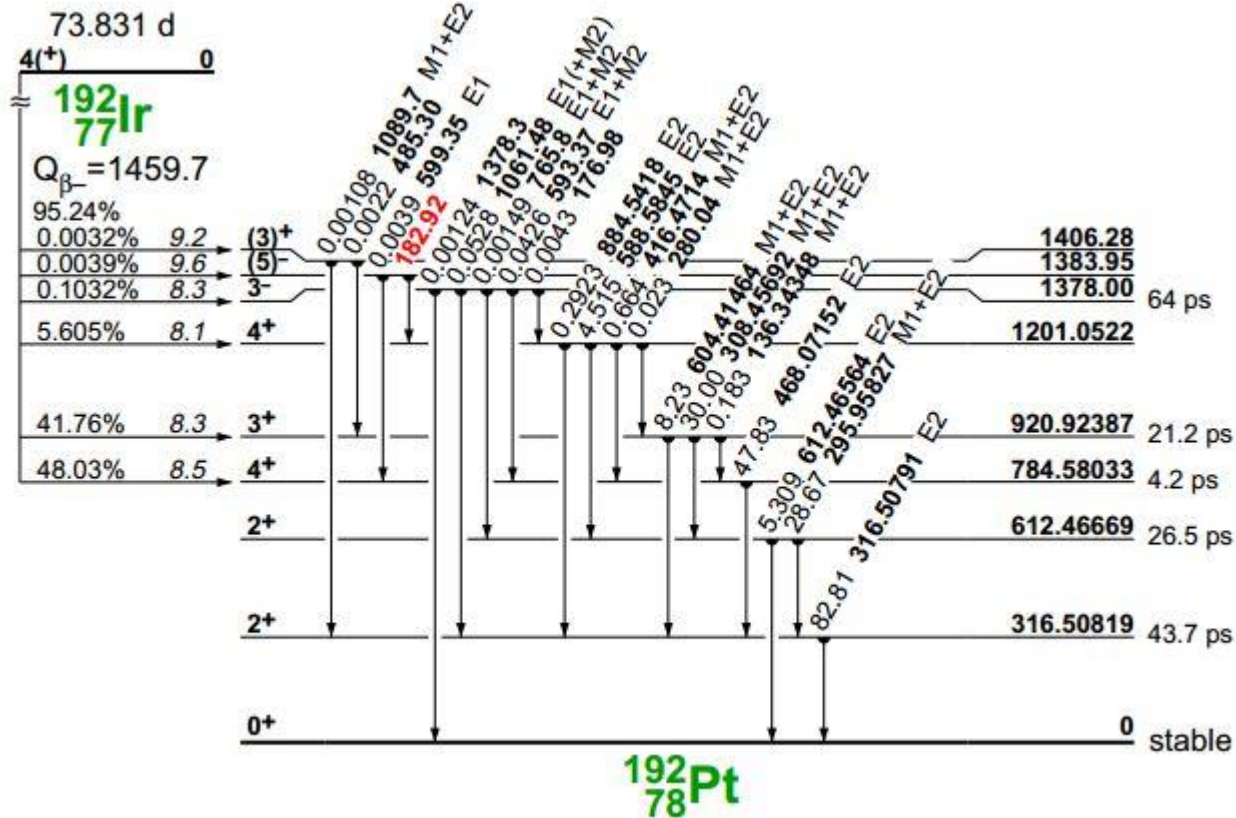
5+ ⁶⁰Co



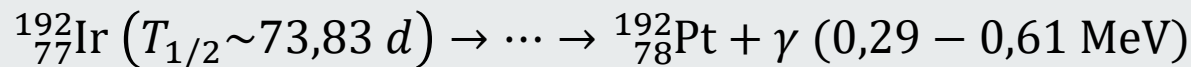
<http://hypernews.slac.stanford.edu/HyperNews/geant4/get/particles/498.html>

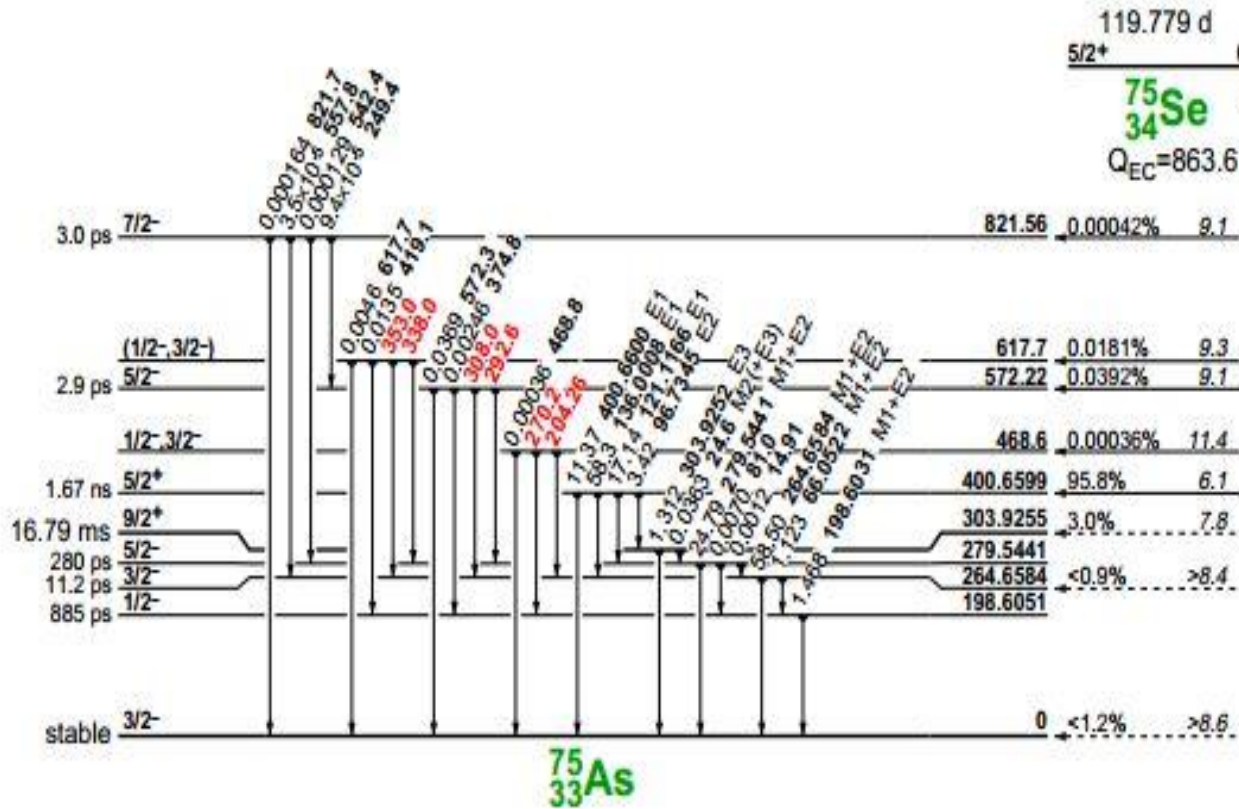


Espectros discretos...



$$\langle E_{\gamma} \rangle \approx 0,38 \text{ MeV}$$





$$\langle E_{\gamma} \rangle \approx 0,21 \text{ MeV}$$

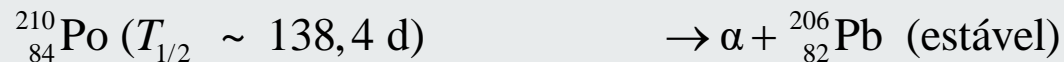
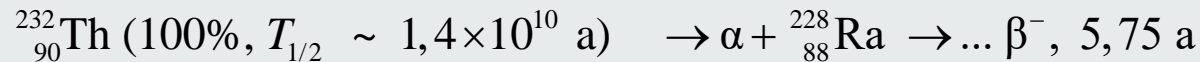
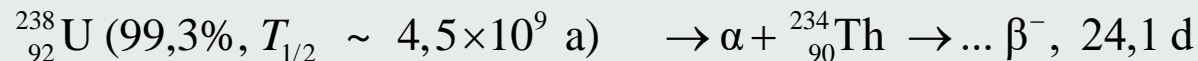
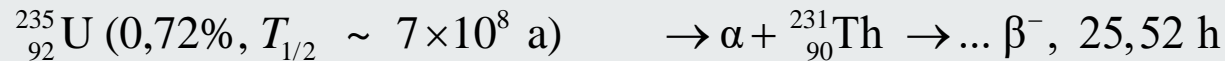




Estabilidade e instabilidade nucleares

Radioactividade: manifestação de instabilidade nuclear ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A'}_{Z'}\text{X}' + \dots$

Desintegração radioactiva \rightarrow transformação (transmutação do núcleo)

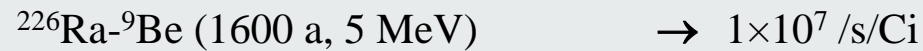
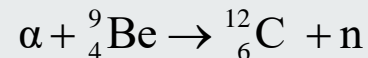




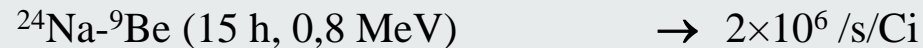
Estabilidade e instabilidade nucleares

Radioactividade: manifestação de instabilidade nuclear ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A'}_{Z'} X' + \dots$

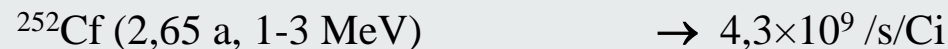
fontes α -n



fontes γ -n



cisão espontânea



aceleradores

reacções nucleares por p, α , ...

reactores nucleares



Estabilidade e instabilidade nucleares

Radioactividade: manifestação de instabilidade nuclear ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A'}_{Z'}\text{X}' + \dots$

Desintegração radioactiva \rightarrow transformação (transmutação do núcleo)

A actividade é
$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N$$

Se em cada declínio a energia média libertada for denotada por $\langle E \rangle$ então a taxa de emissão de energia é

$$\frac{d\langle E \rangle}{dt} = \left| -\frac{dN}{dt} \langle E \rangle \right| = A(t) \langle E \rangle$$

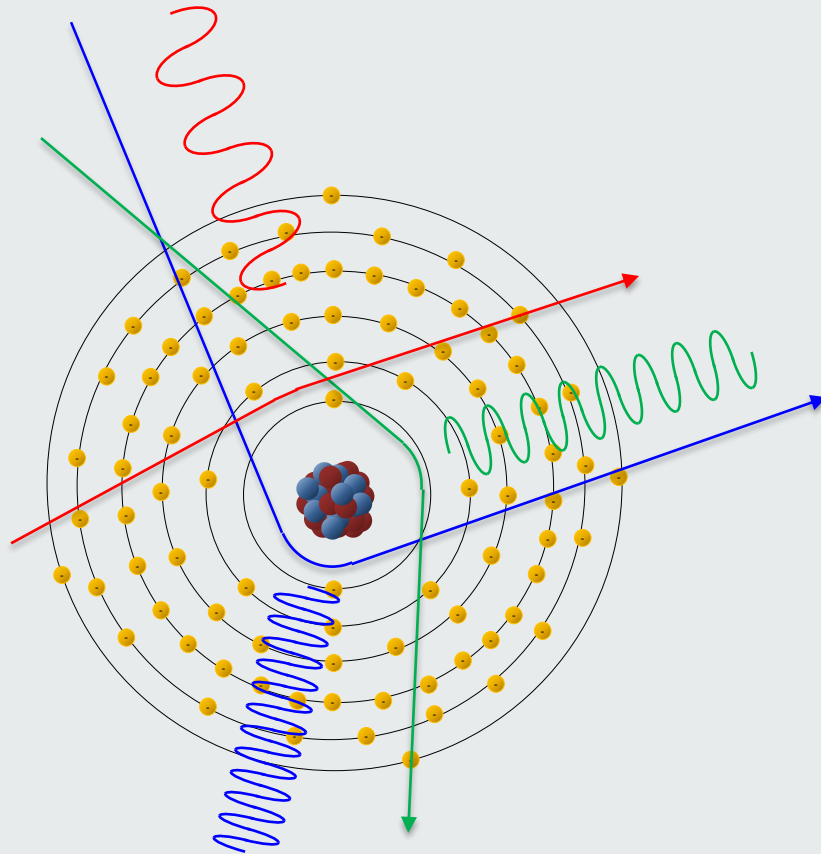


DECN

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
E CIÊNCIAS NUCLEARES

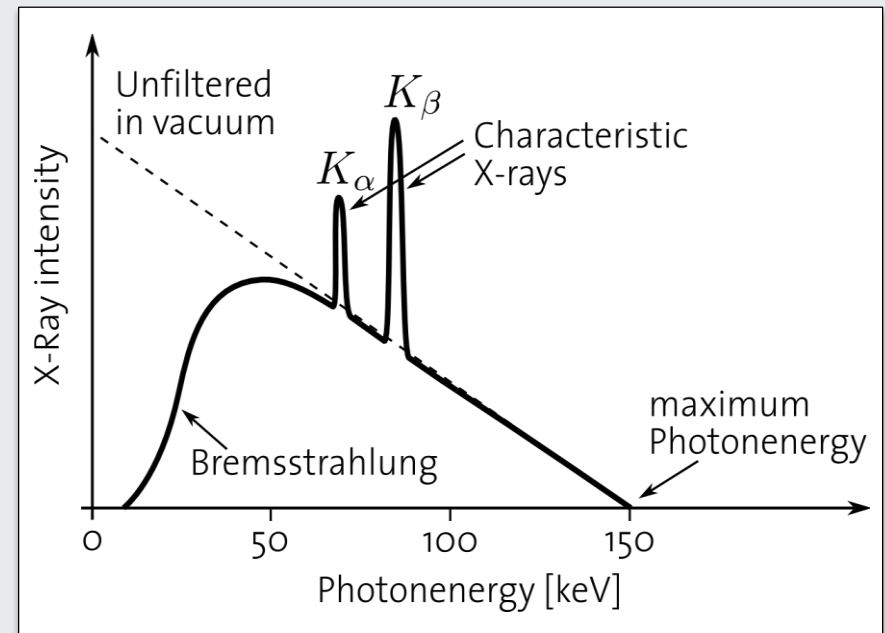
TÉCNICO LISBOA

Mas não há só espectros discretos...

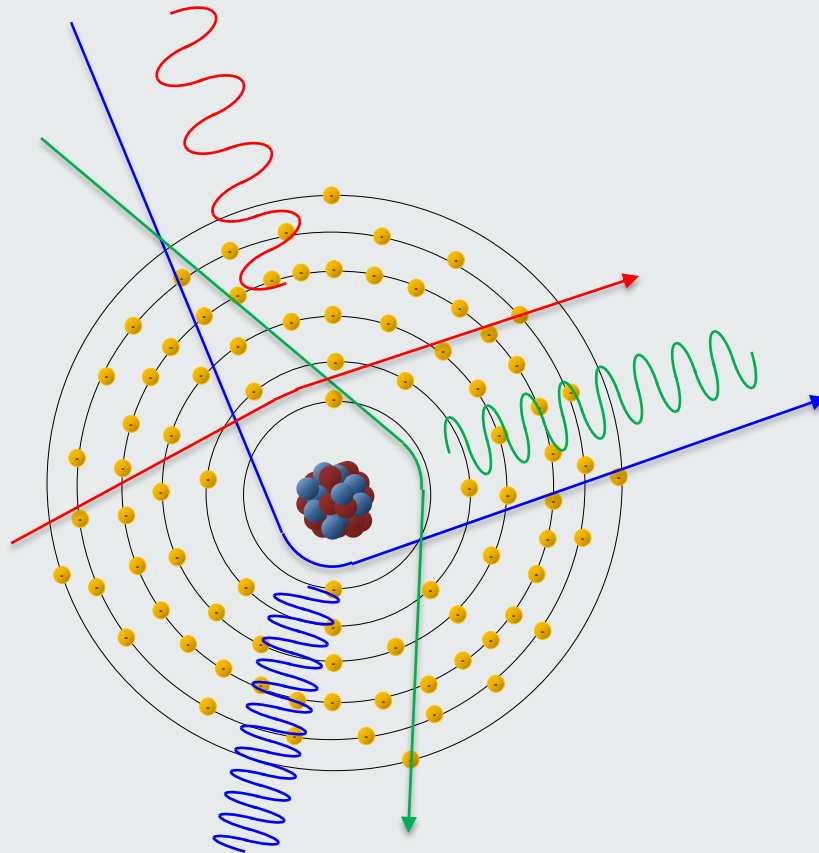


Espectros contínuos...

de <https://miac.unibas.ch/BIA/08-Xray.html>



A "travagem" de partículas carregadas em colisões com electrões e iões do meio, resulta também na emissão de radiação mas com um espectro contínuo... é o **bremstrahlung!**



Espectros contínuos...

Os raios-X de travagem – bremsstrahlung – podem ser gerados por electrões de qualquer energia (tipicamente $> 1 \text{ keV}$ a $\sim 1 \text{ MeV}$)

As energias distribuem-se da energia máxima dos electrões eV até zero

O c.d.o. mínimo é dado por

$$\lambda_{\min} = \frac{eV}{hc}$$

A energia média é 1/3 da energia máxima

As intensidades distribuem-se de zero a zero passando por um máximo

No vácuo a intensidade é

$$I(E) = kZ(E_k - E)$$

Ao espectro contínuo de raios-X sobrepõem-se picos de raios-X característicos

Os raios-X usados geralmente em radiografia de diagnóstico são geralmente os do espectro contínuo.

A "travagem" de partículas carregadas em colisões com electrões e iões do meio, resulta também na emissão de radiação mas com um espectro contínuo... é o bremsstrahlung!



Os raios-X de travagem – bremsstrahlung – podem ser gerados por electrões de qualquer energia (tipicamente $> 1 \text{ keV}$ a $> 1 \text{ MeV}$)

As energias distribuem-se da energia máxima dos elec-trões eV até zero

O c.d.o. mínimo é dado por

$$\lambda_{min} = \frac{eV}{hc}$$

A energia média é 1/3 da energia máxima

As intensidades distribuem-se de zero a zero passando por um máximo

No vácuo a intensidade é

$$I(E) = kZ(E_k - E)$$

Os raios-X usados geralmente em radiografia de diagnóstico são os do espectro contínuo

A potência irradiada por uma carga acelerada é dada por

$$P = \frac{q^2 \gamma^4}{6\pi\epsilon_0 c} \left(\dot{\beta}^2 - \frac{(\vec{\beta} \cdot \dot{\vec{\beta}})^2}{1 - \beta^2} \right) \quad P \approx \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

A energia total da radiação X emitida por um electrão de energia cinética

E_k é

$$E \propto Z E_k^2$$

A energia perdida para raios-X de travagem por um electrão de energia

máxima E_k é

$$-\left(\frac{dE}{dl}\right) \propto Z^2 (E_k + mc^2)$$

$$\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$$

$$v = \beta c; a = \dot{\beta} c$$

$$E_k + mc^2 = \gamma mc^2$$



Interacções das radiações com a matéria

Como transferem energia ?

As partículas transferem energia por

- **colisões elásticas** com outras partículas – electrões, prótons, núcleos, iões, átomos e moléculas;
- **colisões inelásticas** com núcleos, iões, átomos e moléculas.

Os fotões transferem energia por

- **colisões elásticas com electrões (p.ex. efeito Compton);**
- **excitação e ionização atómica e molecular (colisões inelásticas com electrões em átomos e moléculas);**

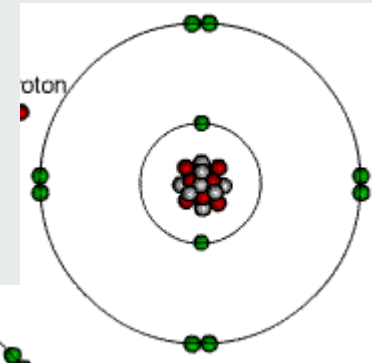
e se tiverem energia suficiente para tal...

- **criação de pares;**
- **excitação nuclear e fotoemissão de nucleões (colisões inelásticas com os núcleos).**

Como se provocam alterações de configurações ?

Interações (colisões)

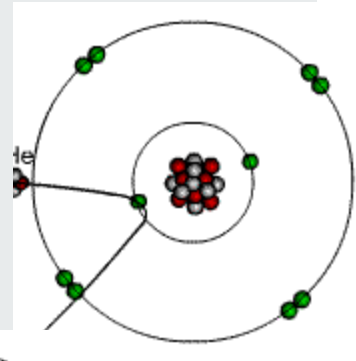
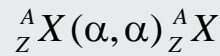
com os electrões dos átomos...



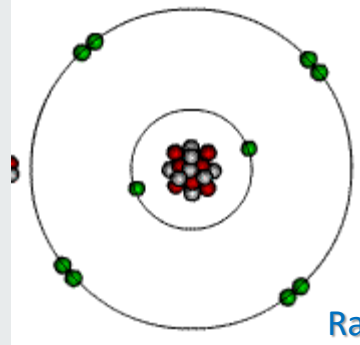
Raios-X

... ou com os núcleos (reações nucleares)...

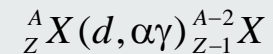
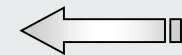
Elásticas...



... ou inelásticas p, d, n, α...



Raios-γ





Interacções das radiações com a matéria

Como transferem energia ?

A energia transferida depende

- do tipo de radiação (fótons, partículas carregadas, partículas neutras...)
- das interacções dominantes
- da energia da radiação
- da natureza do meio...

Exemplos:

Nas figuras seguintes podem apreciar-se gráficos que mostram como a energia é transferida de prótons e partículas alfa com energias 2,2 MeV e 5,5 MeV quando atingem um meio biológico, no exemplo um tipo de pele humana

Ex.: partículas alfa com energia 5,5 MeV incidentes em pele humana:

Da figura a) vê-se que...

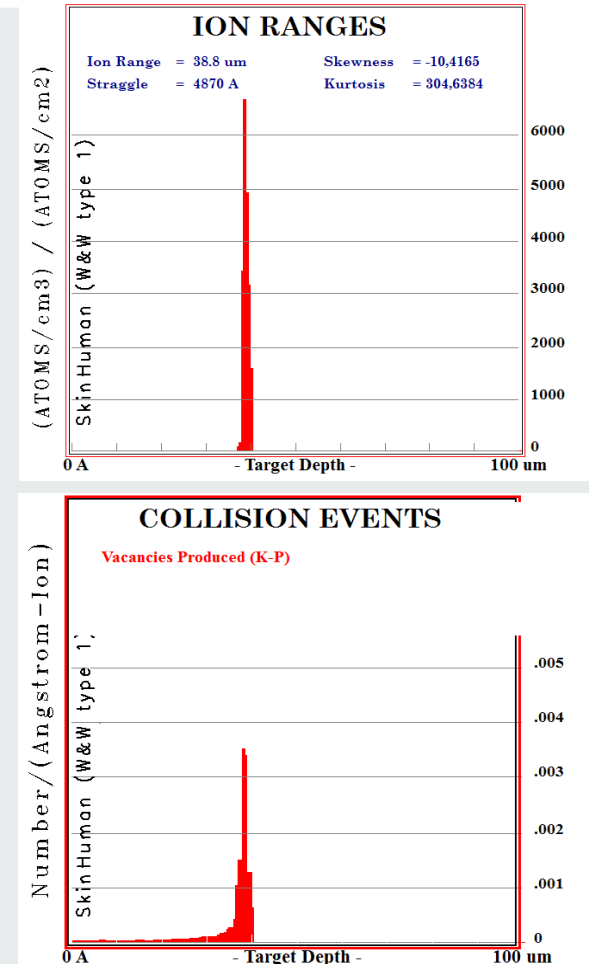
- 50 μm de pele são suficientes para deter completamente estas partículas
- a distribuição de alcances – a distribuição de profundidades atingidas por estas partículas até terem cedido toda a energia e parado – é muito apertada: praticamente todas as partículas param às mesmas profundidades. No ex. mais de 75% das partículas param a menos de 1,5% do alcance médio de $\sim 39 \mu\text{m}$, e $\sim 98\%$ a menos de 3% do mesmo
- os alcances máximos – profundidades máximas de penetração – no meio são bem definidos: no ex. praticamente 100% das partículas param até à profundidade de $\sim 40 \mu\text{m}$

Da figura b) vê-se que...

- todas as colisões ocorrem até à profundidade máxima de penetração

Ora as transferências directas de energia para o meio dão-se precisamente nessas colisões...

... portanto as transferências directas de energia se dão até à profundidade máxima de penetração, $\sim 40 \mu\text{m}$.



Os resultados mostram que 0,10 mm de pele chegam para deter completamente as emissões de partículas alfa de qualquer fonte natural (as energias das partículas alfa emitidas por fontes radioactivas naturais estão compreendidas no intervalo de 4 - 8 MeV)

Ex.: partículas alfa com energia 5,5 MeV incidentes em pele humana:

Das figuras c) e d) vê-se que...

a transferência de energia, quer na forma de ionização provocada no meio – por transferência para os electrões – quer na forma de arranque e deslocação de átomos das suas posições naturais é mínima na parte inicial da trajectória e máxima no final da mesma

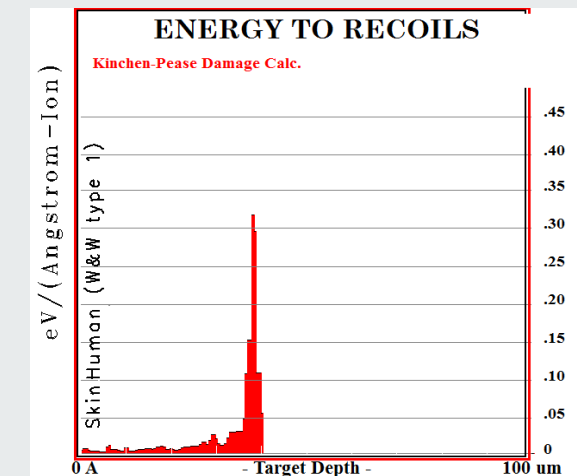
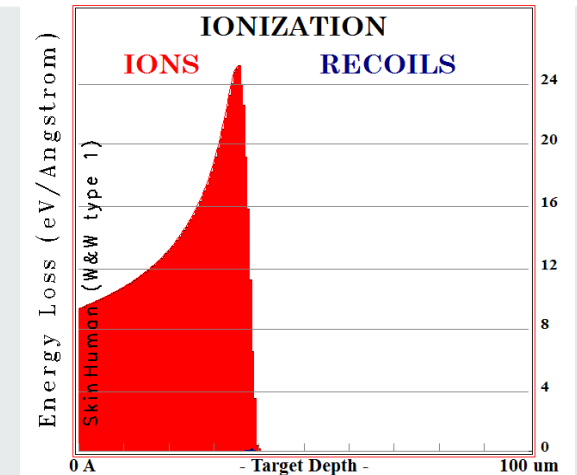
Praticamente a totalidade da energia transportada é transferida para a ionização do meio (integral da curva c))

Toda a transferência directa de energia fica confinada a um limite bem definido, o alcance máximo de penetração da radiação

Como valor indicativo a taxa média de perda de energia é, no exemplo, calculada com o valor $5500 \text{ keV}/39 \mu\text{m} \sim 140 \text{ keV}/\mu\text{m}$

O valor para a energia de 5,5 MeV é de $\sim 90 \text{ keV}/\mu\text{m}$

O valor máximo é de $\sim 250 \text{ keV}/\mu\text{m}$, e ocorre próximo do fim da trajectória



Todas as transferências directas de energia ficam confinada à pro-fundidade de penetração da radiação. Porém alguma dessa energia – p. ex. quando convertida em fotões – e algumas das alterações provocadas poder-se-ão propagar a distâncias maiores

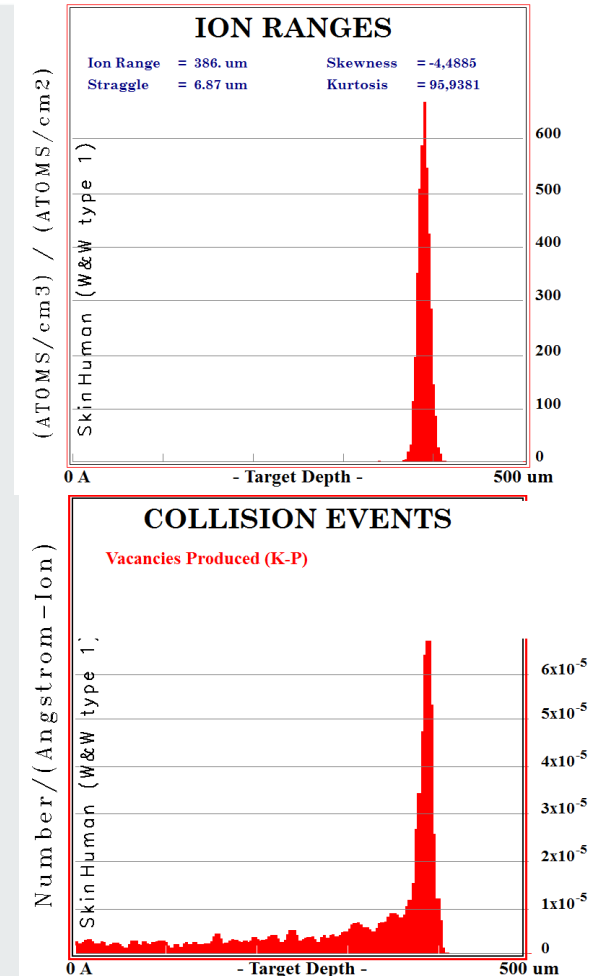
Ex.: prótons com energia 5,5 MeV incidentes em pele humana:

Das figuras a) e b) vê-se que...

- 450 μm de pele são suficientes para deter estes prótons penetram neste meio $\sim 10\text{x}$ mais e com uma distribuição algo mais larga do que as partículas alfa com a mesma energia

As restantes características são semelhantes, em particular:

- a distribuição de alcances é muito apertada, praticamente todos param às mesmas profundidades: mais de 75% dos prótons param a menos de 2,3% do alcance médio ($\sim 0,39\text{ mm}$), e cerca de 98% a menos de 5% do mesmo
- os alcances máximos no meio são bem definidos
- todas as colisões – e assim todas as transferências directas de energia das partículas em movimento para o meio – se dão até à profundidade máxima de penetração



Note-se que é suficiente 0,45 mm de pele para parar completamente os prótons com 5,5 MeV, quase 10x mais do que o necessário para deter partículas alfa com a mesma energia

Ex.: prótons com energia 5,5 MeV incidentes em pele humana:

Das figuras c) e d) vê-se que, como para as partículas alfa...

a transferência de energia, quer por ionização do meio quer por arranque e deslocação de átomos das suas posições naturais é mínima na parte inicial da trajectória e máxima no final da mesma

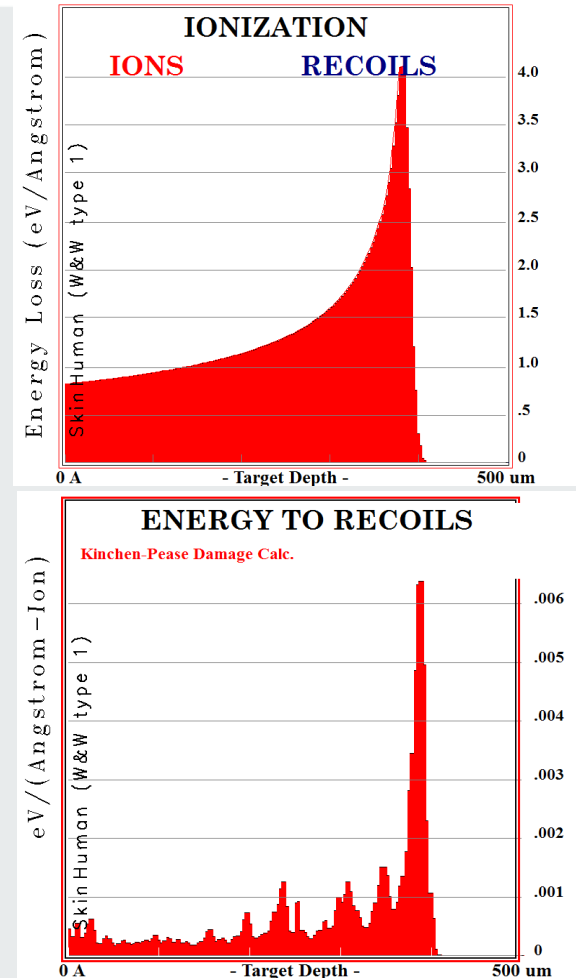
Praticamente a totalidade da energia transportada é transferida para a ionização do meio (integral da curva c))

Toda a transferência directa de energia fica confinada a um limite bem definido, o alcance máximo de penetração da radiação

Como valor indicativo a taxa média de perda de energia é, no exemplo, calculada com o valor de $5500 \text{ keV}/386 \mu\text{m} \sim 14 \text{ keV}/\mu\text{m}$, 10x menor que o do exemplo anterior

O valor para as perdas de energia a 5,5 MeV é $\sim 8 \text{ keV}/\mu\text{m}$

O valor máximo é de $\sim 40 \text{ keV}/\mu\text{m}$, e ocorre já próximo do fim da trajectória

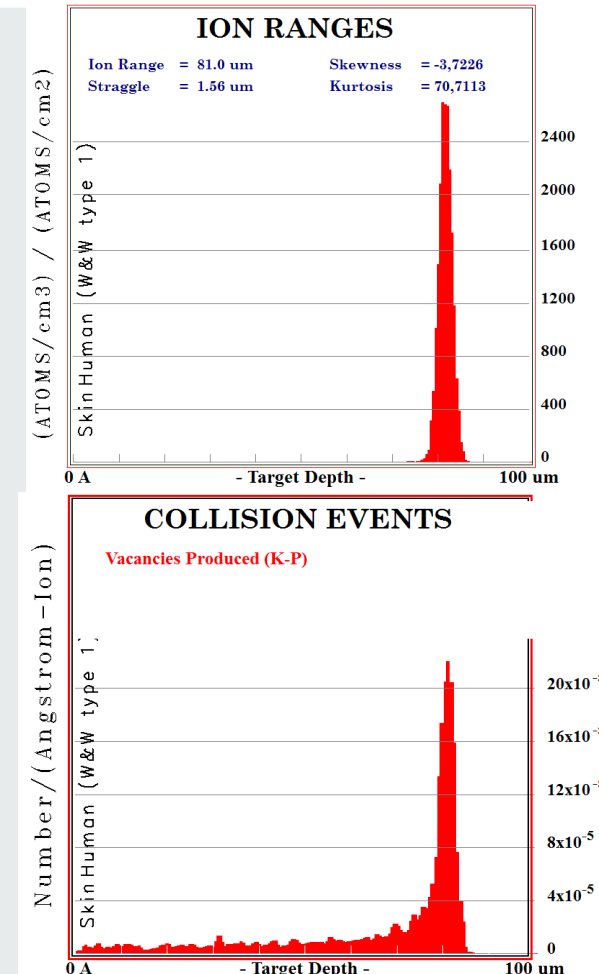


Todas as transferências directas de energia ficam confinada à profundidade de penetração da radiação. Porém alguma dessa energia – p. ex. quando convertida em fotões – e algumas das alterações provocadas poder-se-ão propagar a distâncias maiores.

Ex.: prótons com energia 2,2 MeV incidentes em pele humana:

Das figuras *a)* e *b)* vê-se que...

- 85 μm de pele detêm completamente prótons com esta energia. Penetram neste meio quase 5x menos do que prótons com 5,5 MeV, e aproximadamente 2x mais do que as partículas alfa com 5,5 MeV
- a distribuição de alcances é muito apertada: praticamente todos os prótons com 2,2 MeV param às mesmas profundidades. Tal como anteriormente mais de 75% destes prótons param a menos de 2,3% do alcance médio ($\sim 81 \mu\text{m}$), e cerca de 98% a menos de 5% do mesmo
- os alcances máximos no meio são bem definidos: neste exemplo praticamente 100% das partículas param até $\sim 85 \mu\text{m}$ de profundidade
- todos os choques – e assim todas as transferências directas de energia das partículas em movimento para o meio – ocorrem até à profundidade máxima de penetração



Note-se que bastam 85 μm de pele para parar completamente os prótons com 2,2 MeV, quase 2x mais do que o necessário para deter partículas alfa com a mesma energia

Ex.: prótons com energia 2,2 MeV incidentes em pele humana:

Das figuras c) e d) vê-se que, como para as partículas alfa...

a transferência de energia, quer por ionização do meio quer por arranque e deslocação de átomos das suas posições naturais é mínima na parte inicial da trajectória e máxima no final da mesma

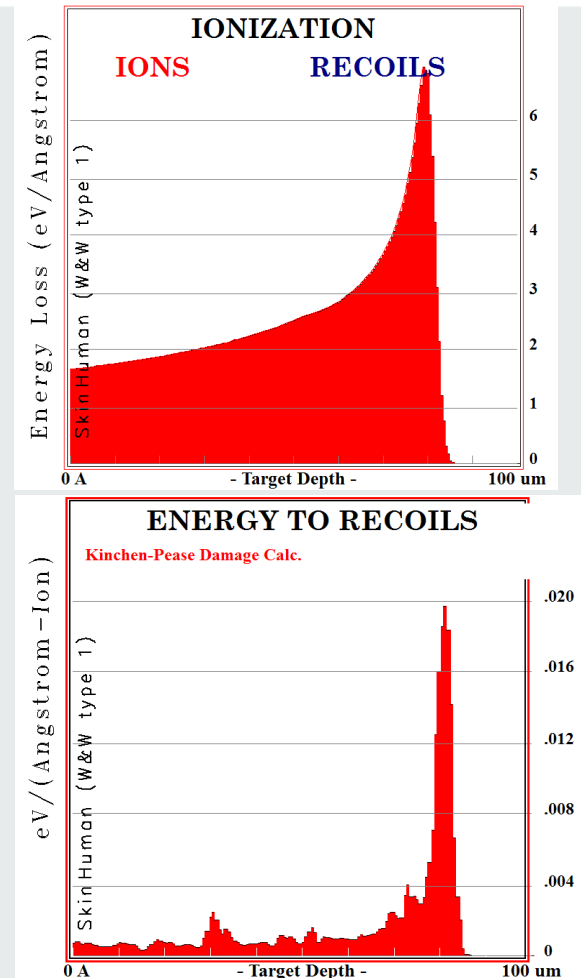
Praticamente a totalidade da energia transportada é transferida para a ionização do meio (integral da curva c))

Toda a transferência directa de energia fica confinada a um limite bem definido, o alcance máximo de penetração da radiação

Como valor indicativo a taxa média de perda de energia é, neste exemplo, calculada como $2200 \text{ keV}/81 \mu\text{m} \sim 27 \text{ keV}/\mu\text{m}$.

O valor para a energia de 5,5 MeV é de $\sim 16 \text{ keV}/\mu\text{m}$

O valor máximo é de $\sim 70 \text{ keV}/\mu\text{m}$



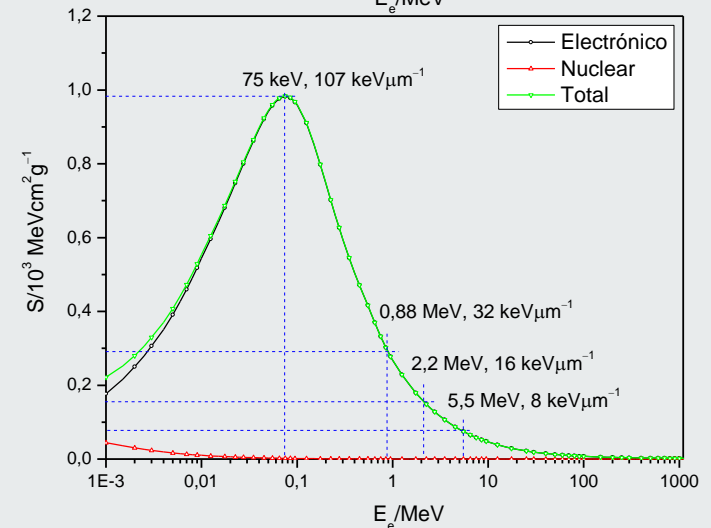
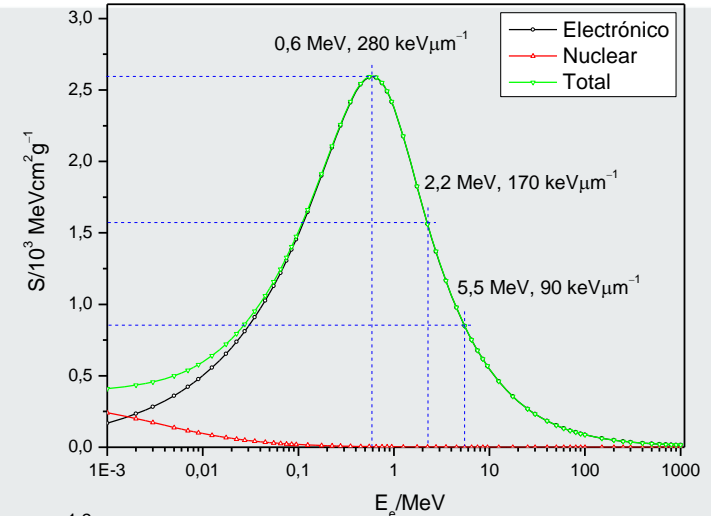
Todas as transferências directas de energia ficam confinadas à profundidade de penetração da radiação. Porém alguma dessa energia – p. ex. quando convertida em fótons – e algumas das alterações provocadas poder-se-ão propagar a distâncias maiores

Ex.: partículas alfa e prótons incidentes em matéria orgânica

O comportamento de partículas carregadas como os prótons e as partículas alfa quando se movem através da matéria – as transferências de energia para o meio – podem também ser percebidos pela análise de curvas como as das figuras *a*) e *b*) que mostram as perdas de energia em função da energia: estas curvas permitem determinar as taxas de perda de energia, *i.e.* a energia perdida por unidade de comprimento do caminho percorrido no meio, à medida que as partículas – partículas alfa, *a*) ou prótons, *b*) – se movem no meio e a sua energia vai diminuindo. No exemplo, o meio é um plástico cujas composição e propriedades são, para efeitos das perdas de energia, semelhantes às da pele humana

Note-se:

- As curvas a preto representam as perdas de energia para os electrões (*i.e.* em colisões com os electrões), a vermelho as perdas para os iões (em colisões nucleares) e a verde o total das perdas de energia
- Os eixos das energias apresentam-se em escala logarítmica
Esta realça a semelhança geral dos comportamentos de perda de energia das partículas pesadas carregadas, prótons, partículas alfa, etc.



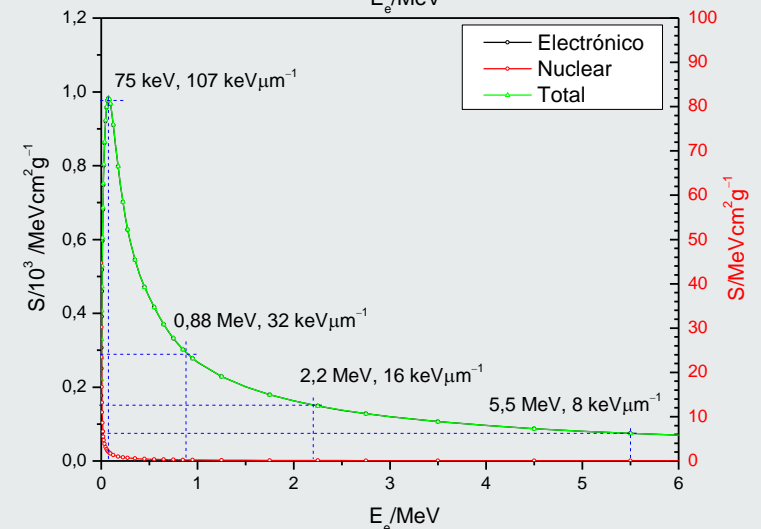
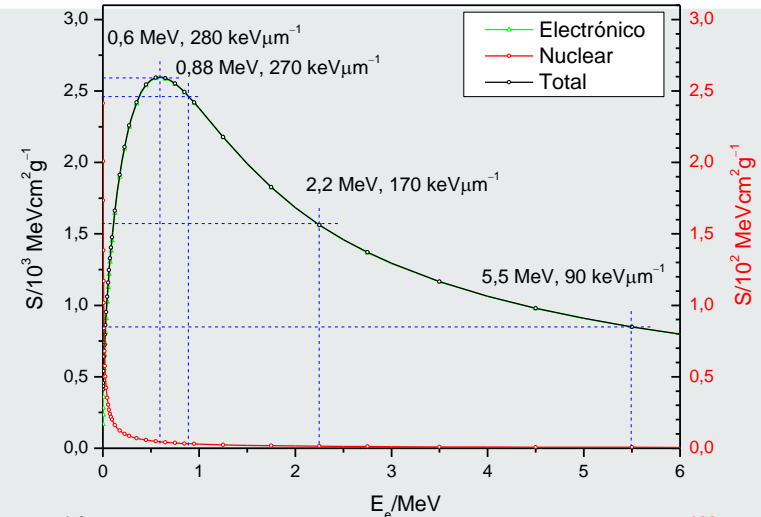
Ex.: partículas alfa e prótons incidentes em matéria orgânica

O comportamento de partículas carregadas como os prótons e as partículas alfa quando se movem através da matéria podem também ser percebidos pela análise de curvas como as das figuras *c*) e *d*): estas (a verde) permitem determinar as taxas de perda de energia, à medida que as partículas se movem no meio e a sua energia vai diminuindo

Em ambos os casos, tanto para as partículas alfa como para os prótons, as taxas de perda de energia vão aumentando à medida que a energia diminui, até se atingir um máximo, a partir do que as taxas de perda de energia diminuem até à paragem das partículas

Note-se:

- A representação das curvas em escala linear acentua as diferenças específicas entre os comportamentos de perda de energia dos diferentes tipos de partículas pesadas carregadas, os prótons, as partículas alfa, iões, etc.
- As taxas de perda de energia de partículas alfa e prótons são, no exemplo dado, inicialmente igualmente relativamente pequenas; porém, e porque os máximos ocorrem a energias diferentes e com valores diferentes – mais elevados no caso dos prótons – na aproximação ao máximo as taxas de perda de energia variam mais rapidamente para os prótons do que para as partículas alfa...



Comparem-se estas curvas *c*) e *d*) com as curvas *c*) dos exemplos apresentados anteriormente.



Da apresentação destes elementos pode concluir-se que embora os valores específicos sejam diferentes as tendências que aqui se encontraram são as mesmas para outras partículas pesadas carregadas – p.ex. iões – e para outros materiais. **As transferências de energia por partículas carregadas pesadas** – como prótons e partículas alfa – para a matéria com que interactivam **apresentam propriedades comuns**, nomeadamente

- **as distribuições de alcances são bem definidas**: as partículas param a profundidades que correspondem a intervalos característicos, localizados em torno de valor médio, determinado pela partícula em movimento, energia e meio em que a partícula se move
- **os alcances máximos** – as profundidades máximas de penetração no meio – **são bem definidos** e sempre determinados pela combinação partícula, energia e meio
- **a transferência de energia é localizada** e relativamente confinada: as colisões responsáveis pelas transferências directas de energia dão-se até profundidades da ordem da profundidade de máxima penetração
- **a transferência de energia**, quer por ionização do meio quer por arranque e deslocação de átomos das suas posições naturais, **é mínima na parte inicial da trajectória e máxima no final da mesma**

Este comportamento é consequência do **tipo dominante de interacções** entre estas partículas e a matéria:

- **colisões ião-electrão**, que são predominantes (e responsáveis pelas trajectórias serem quase rectilíneas)
- **colisões ião-ião** (em geral muito menos numerosas, responsáveis por grandes alterações nas trajectórias)

E para os electrões?...

E para os fotões?...

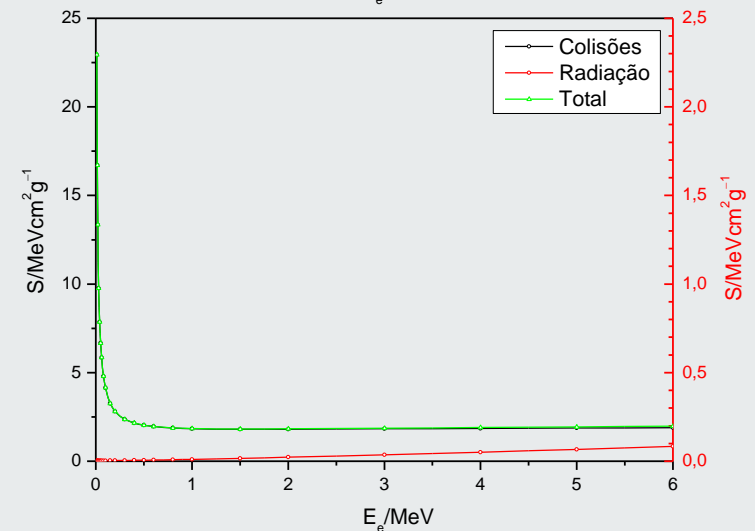
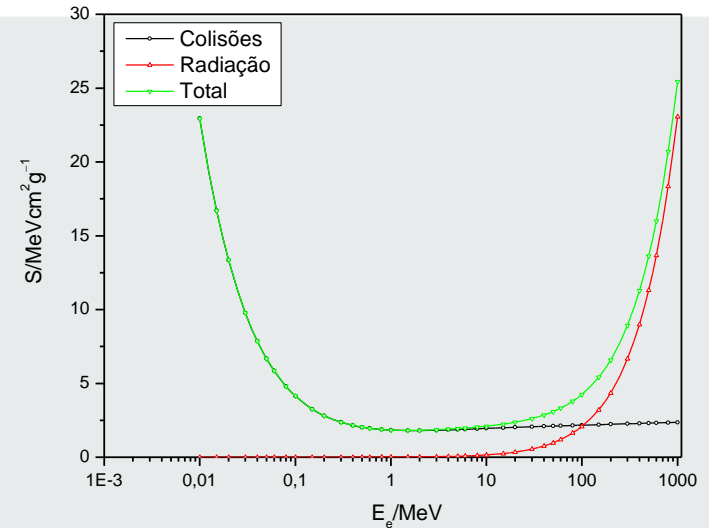
Ex.: electrões incidentes no mesmo meio que nos exemplos anteriores

O comportamento dos electrões quando se movem através da matéria pode ser percebido pela análise de curvas como as das figuras e) e f): estas (a verde) permitem determinar as taxas de perda de energia, à medida que os electrões se movem no meio e a sua energia vai diminuindo

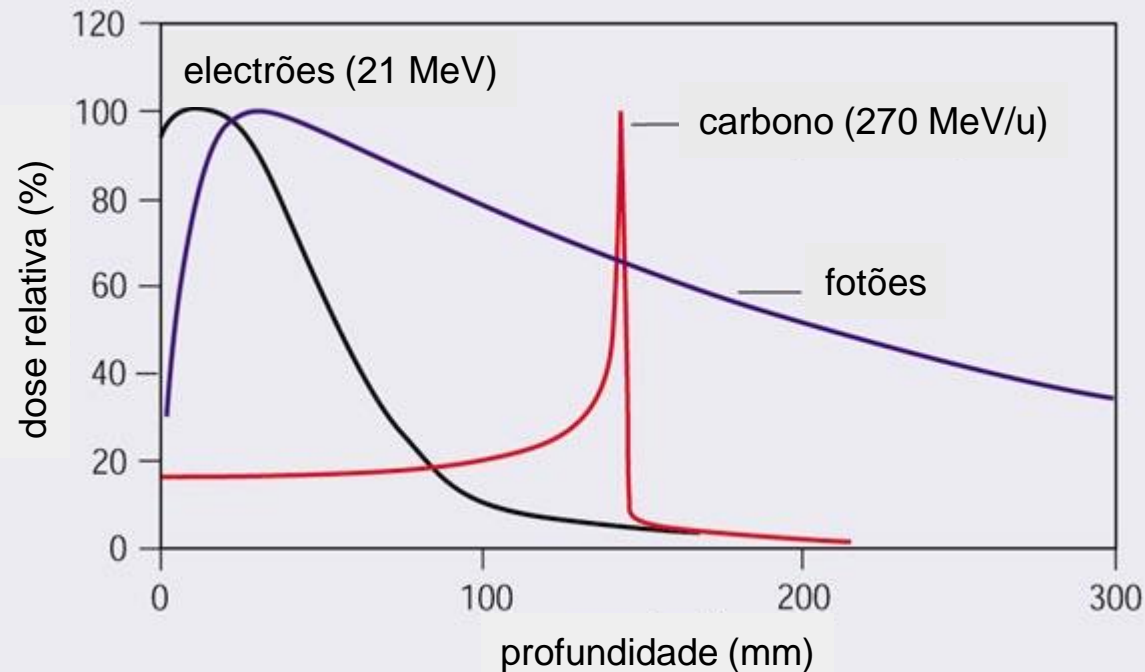
Para energias 1-10 MeV as taxas de perda de energia são essencialmente constantes, e para energias < 1 MeV as taxas de perda de energia aumentam à medida que a energia diminui.

Note-se:

- As curvas a preto representam as perdas de energia em colisões com outros electrões, as curvas a vermelho as perdas radiativas (radiação de travagem ou bremsstrahlung), e as curvas a verde o total das perdas de energia.
- As perdas de energia por radiação só se tornam dominantes a energias muito elevadas, que normalmente não se encontram em equipamentos comuns.



Estes comportamentos diferentes podem ilustrar-se na seguinte figura que mostra como ocorre a deposição de energia pelos diferentes tipos de radiações ionizantes, partículas carregadas pesadas, electrões e fotões



Note-se que

- para electrões e fotões a deposição de energia não é mínima na parte inicial da trajectória e máxima no final;
- para os electrões a deposição de energia é ainda maioritariamente confinada a uma profundidade máxima de penetração;
- para fotões não há uma deposição localizada, não há estritamente uma profundidade máxima de penetração.



Os mecanismos de perda de energia...

Os mecanismos de transferência de energia dependem das radiações envolvidas, do seu tipo e energia

As transferências de energia efectuam-se em processos de colisão...

As partículas pesadas em movimento na matéria sofrem **colisões com outras partículas pesadas e com electrões...**

Para partículas como os prótons e as partículas alfa – p.ex. emitidas por fontes radioactivas naturais ou por aceleradores de partículas – **as colisões com os electrões são mais prováveis do que as colisões com os núcleos...**

Os electrões são mais numerosos do que os núcleos ...

Assim, **as colisões com os electrões são muito mais frequentes do que as colisões com os núcleos...** e são as responsáveis por uma fracção significativa das perdas de energia e da transferência de energia para o meio... (as colisões com os núcleos são responsáveis pela criação de danos no meio, deslocações e outros tipos de defeitos)



Os mecanismos de perda de energia...

Os mecanismos de transferência de energia dependem das radiações envolvidas, do seu tipo e energia

As transferências de energia efectuam-se em processos de colisão...

As partículas pesadas em movimento na matéria sofrem colisões com outras partículas pesadas e com electrões...

Para partículas como os prótons e as partículas alfa – p.ex. emitidas por fontes radioactivas naturais ou por aceleradores de partículas – as colisões com os electrões são mais prováveis do que as colisões com os núcleos...

Os electrões são mais numerosos do que os núcleos ...

Assim, as colisões com os electrões são muito mais frequentes do que as colisões com os núcleos... e são as responsáveis por uma fracção significativa das perdas de energia e da transferência de energia para o meio... (as colisões com os núcleos são responsáveis pela criação de danos no meio, deslocações e outros tipos de defeitos)

Em cada colisão com uma partícula (muito) mais leve (como os electrões) as partículas pesadas

- perdem uma fracção muito pequena da sua energia
- praticamente não são desviadas da sua trajectória

Em consequência as perdas são quase contínuas, muito distribuídas e as trajectórias praticamente rectilíneas...

Porque há muitas colisões deste tipo a densidade de ionização e excitação é muito elevada...

As transferências de energia por partículas pesadas carregadas para os electrões...

Tratemos então as colisões com os electrões!

Pretende calcular-se as perdas de energia, na forma de taxas de perda $-\frac{dE}{dl} = ?$

Em cada colisão com um electrão, sendo a trajectória rectilínea, a perda de energia é $-\Delta E_1 \approx \frac{(\Delta p)^2}{2m}$

- a transferência de momento é $\Delta p \propto F \Delta t$

- para um parâmetro de impacto b , tem-se $-\Delta E_1 \propto \left(\frac{Z_1 e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \times \frac{1}{2mv^2}$

No percurso Δl há $N_{e1}\Delta l$ electrões: o número de colisões e a transferência de energia serão proporcionalmente maiores, esperando-se que...

$$-\frac{dE}{dl} \propto \left(\frac{Z_1 e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{Z_2 \rho N_A}{A m v^2}$$

que deve ser calculada para todas as colisões possíveis, *i.e.* para todos os parâmetros de impacto. Estes estão entre um mínimo b_{\min} (nas colisões frontais) e um máximo b_{\max} (em que há somente quase que uma “raspagem” pelos átomos, *i.e.* pelos cortejos electrónicos dos átomos). Para todas estas colisões, tem-se então, para todas as direcções em torno da direcção de propagação (a trajectória), resulta...

$$-\frac{dE}{dl} = \left(\frac{Z_1 e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \times \frac{1}{mv^2} \times \left(\frac{Z_2 \rho N_A}{A}\right) \times 4\pi \left[\ln\left(\frac{2mv^2}{I}\right) - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right]$$

As transferências de energia por partículas pesadas carregadas para os electrões...

A expressão obtida com esta abordagem, para partículas pesadas carregadas na sua interacção com o meio, é designada de expressão de Bethe-Bloch: só é válida para energias elevadas (p.ex. para partículas alfa com energias > 600 keV em pele humana, ou para protões com energias > 80 keV no mesmo meio)

Identifiquemos as “contribuições” para as perdas de energia...

$$-\frac{dE}{dl} = \underbrace{\left(\frac{Z_1 e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2}_1 \times \underbrace{\frac{1}{mv^2}}_2 \times \underbrace{\left(\frac{Z_2 \rho N_A}{A}\right)}_3 \times 4\pi \underbrace{\left[\ln\left(\frac{2mv^2}{I}\right) - \ln(1-\beta^2) - \beta^2\right]}_4$$

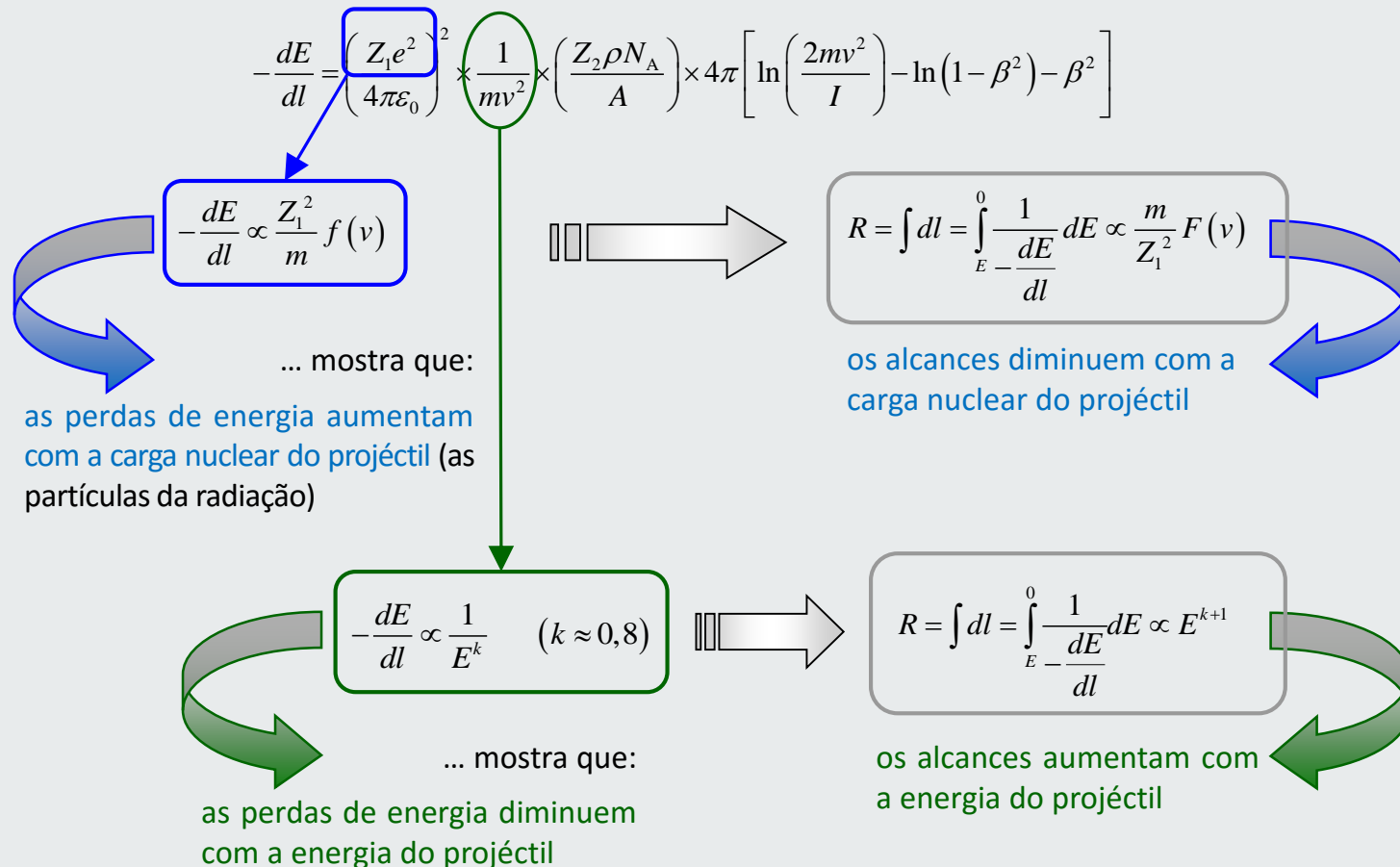
Termo 1: depende da **intensidade da interacção**, é tanto maior quanto maior a carga nuclear da partícula: **partículas com maior carga nuclear perdem mais energia**

Termo 2: depende dos **tempos de interacção**, é tanto menor quanto mais rápida for a partícula: **partículas com maior energia perdem menos energia**

Termo 3: depende da **densidade electrónica do meio**, é tanto maior quanto mais denso for o meio: as partículas **perdem mais energia em meios com maior densidade electrónica** (maior número atómico e maior densidade)

Termo 4: contabiliza o resultado de nem todas as transferências de energia nas colisões serem idênticas e variarem entre um mínimo e um máximo (inclui ainda a correcção relativista para os electrões)

As transferências de energia por partículas pesadas carregadas para os electrões...



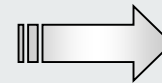
As transferências de energia por partículas pesadas carregadas para os electrões...

$$-\frac{dE}{dl} = \left(\frac{Z_1 e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \times \frac{1}{mv^2} \times \left(\frac{Z_2 \rho N_A}{A} \right) \times 4\pi \left[\ln \left(\frac{2mv^2}{I} \right) - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right]$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl} \propto \frac{Z_2}{A} \ln \left(\frac{2mv^2}{I} \right)$$

... mostra que:

as perdas de energia dependem do meio: em meios mais densos as perdas de energia são maiores



$$\frac{R_1}{R_2} \approx \frac{\rho_2 \sqrt{A_1}}{\rho_1 \sqrt{A_2}}$$

os alcances dependem do meio: em meios mais densos os alcances são menores

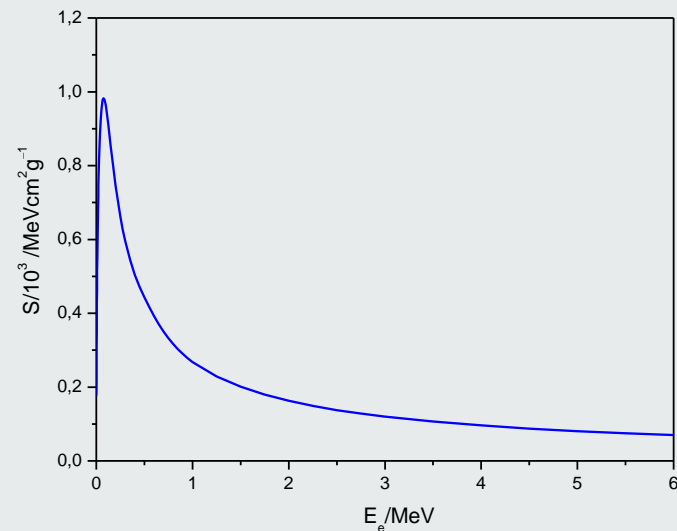
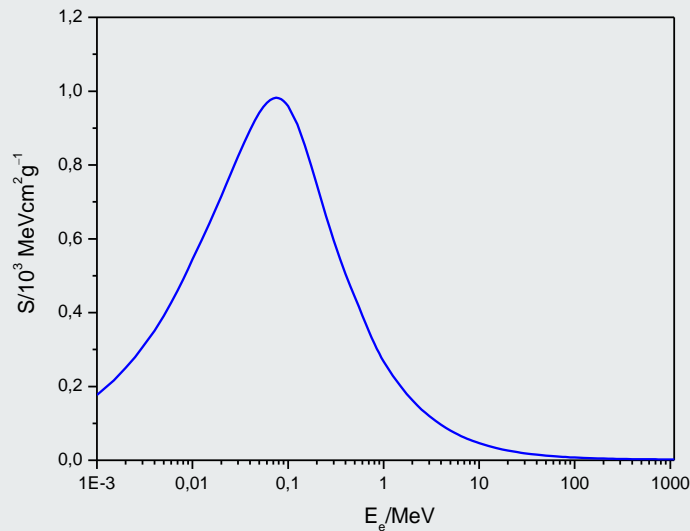
As transferências de energia por partículas pesadas carregadas para os electrões...

para energias elevadas (expressão de Bethe-Bloch)...

$$-\frac{dE}{dl} \propto \frac{1}{E^k} \quad (k \approx 0,8) \quad \dots \text{diminuem com a energia}$$

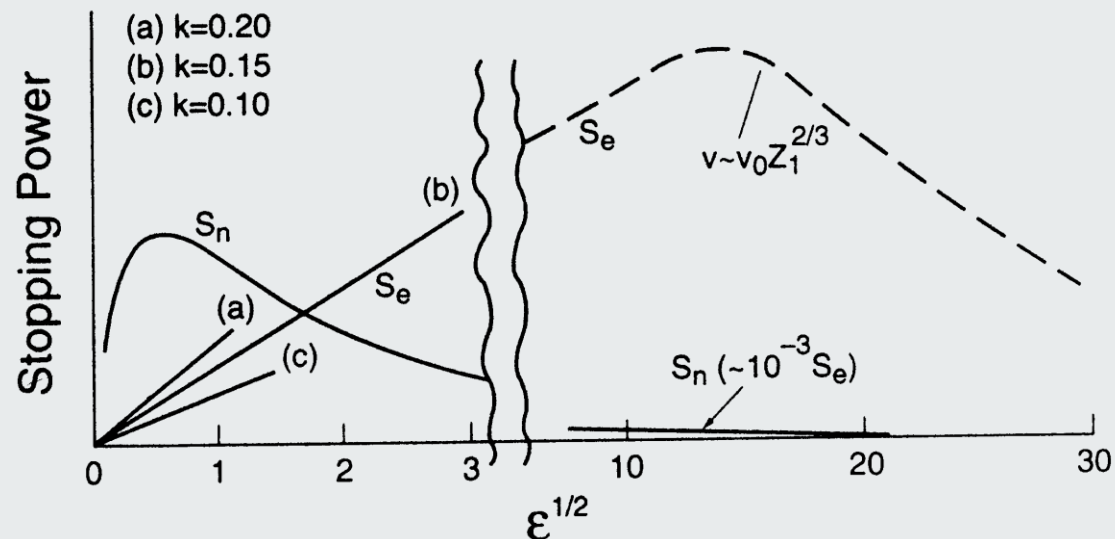
Mas, para energias elevadas... $-\frac{dE}{dl} \propto E^{k'} \quad (k' \approx 0,5) \quad \dots \text{aumentam!}$

As transferências de energia por partículas pesadas carregadas têm um máximo!...



As transferências de energia por partículas pesadas carregadas para os electrões...

Se se incluírem as transferências de energia para os núcleos...



... a situação não se altera fundamentalmente, excepto para energias muito baixas. Em geral **as perdas de energia para os electrões são as mais significativas, dominantes**. As perdas para os núcleos são muito menores e só têm importância para energias muito reduzidas, próprias de situações próximas da paragem, i.e. próximas do fim das trajectórias...



As transferências de energia por partículas pesadas carregadas para os electrões...

Fica justificado assim o comportamento antes apresentado para as transferências de energia por partículas carregadas pesadas – como prótons e partículas alfa – para a matéria com que interactivam:

- **as distribuições de alcances bem definidas:** as partículas param a profundidades que correspondem a intervalos característicos, em torno de valor médio, determinado pela partícula em movimento, energia e meio em que a partícula se move
- **os alcances máximos bem definidos,** sempre determinados pela combinação partícula, energia e meio: a transmissão é praticamente nula além destes alcances
- **os maiores alcances de partículas com energias mais elevadas:** p.ex. as maiores penetrações de prótons com 5,5 MeV relativamente a prótons com 2,2 MeV, no mesmo meio (pele humana, nos exemplos dados)
- **os maiores alcances de partículas com menor carga nuclear Z:** p.ex. as maiores penetrações de prótons com 5,5 MeV relativamente a partículas alfa com a mesma energia, no mesmo meio
- **a energia depositada tem um máximo, próximo do fim da trajectória:** a densidade de ionização e excitação têm um máximo próximo do fim da trajectória

As transferências de energia por electrões para os electrões do meio...

Os electrões em movimento na matéria sofrem **colisões com outros electrões...**

Em cada colisão a transferência de energia pode ser significativa (uma fracção muito importante da energia inicial)

Os desvios da trajectória inicial podem também ser muito grandes: **as trajectórias não são rectilíneas**, e portanto os alcances são mal definidos

As taxas de perda de energia são menores do que para partículas pesadas: os volumes de interacção são assim maiores e as densidades de ionização e excitação correspondentemente menores

As perdas de energia dos electrões por colisões elásticas (com outros electrões) podem expressar-se por

$$\left(-\frac{dE}{dl}\right)_c = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \times \frac{1}{mc^2\beta^2} \times \left(\frac{Z_2\rho N_A}{A}\right) \times 2\pi \left[\ln\left(\frac{T(T+mc^2)^2\beta^2}{2I^2mc^2}\right) - \ln(1-\beta^2) - \left(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2\right) \ln 2 + \frac{1}{8}\left(1-\sqrt{1-\beta^2}\right)^2 \right]$$

Há ainda que considerar as perdas por radiação:

$$\left(-\frac{dE}{dl}\right)_r = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \times \frac{T+mc^2}{137m^2c^4} \times \left(\frac{Z_2^2\rho N_A}{A}\right) \times \left[4\ln\left(\frac{2(T+mc^2)}{mc^2}\right) - \frac{4}{3} \right]$$

As transferências de energia por partículas carregadas para os electrões...

De uma forma geral as perdas de energia de partículas carregadas para um meio material são **dominadas pelas colisões com os electrões do meio e por radiação (bremsstrahlung)** podendo descrever-se pela perda específica de energia - a perda de energia por unidade de comprimento (por vezes também designada impropriamente por taxa de perda de energia) - ou **poder de paragem S** , escrevendo-se

$$S = -\frac{dE}{dl} = \underbrace{\left[-\frac{dE}{dl} \right]_{\text{colisões}}}_{\rho, \alpha, e^-} + \underbrace{\left[-\frac{dE}{dl} \right]_{\text{bremsstrahlung}}}_{e^-}$$

O primeiro termo tem expressão tanto para partículas pesadas carregadas quanto para electrões

O segundo termo só é significativo para electrões

O **poder de paragem mássico** define-se como $\frac{S}{\rho} = -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl}$



Paragem de neutrões na matéria...

Porquê? Porque nas suas interacções com os núcleos atómicos – nas reacções nucleares que provocam – dão origem a

- emissão imediata de radiação, *e.g.* ejeção de partículas, cisão nuclear, emissão de fotões (radiação gama)
- estados nucleares excitados, em geral efémeros, de que resultam a emissão de nucleões, fotões ou electrões
- formação de núclidos radioactivos – processo designado por **activação** – de cujo declínio resulta a emissão de diferentes radiações ionizantes: electrões (radiação beta), partículas alfa e/ou fotões (radiação gama)

Conforme a energia dos neutrões, as várias interacções podem dar lugar à emissão de diferentes **radiações ionizantes**:

0,025 eV – 100 eV: reacções de captura (n, γ), com **emissão de fotões γ com energias até 5-10 MeV**
processos de excitação molecular;

100 eV – 20 keV: reacções de captura (n, γ), com **emissão de fotões γ com energias até 5-10 MeV**
ejeção de protões com energias elevadas em reacções (n,p), com p.ex. C, N, O...

> keV: colisões elásticas (reemissão de neutrões)
ejeção de protões com energias elevadas em reacções (n,p), com p.ex. C, N, O...

Os processos de emissão de radiação que ocorrem em consequência das colisões com neutrões com energias entre ~100 eV e dezenas de keV **resultam em elevadas densidades de ionizações e excitações no meio**



As transferências de energia por fotões...

Com fotões os principais tipos de interacção que levam à transferência de energia para o meio são:

- **Absorção fotoeléctrica:** os fotões cedem toda a sua energia a electrões e desaparecem, desligando-se os electrões do átomo. O átomo fica ionizado e os electrões movem-se no meio inicialmente com energias iguais às energias dos fotões absorvidos subtraídas das energias de ligação dos electrões. Pode tomar-se a absorção fotoeléctrica como **uma colisão inelástica** com um electrão.
- **Dispersão de Compton:** os fotões sofrem **colisões elásticas** com electrões fracamente ligados (quase livres) e cedem uma fracção da sua energia aos electrões. Destas colisões resultam fotões com menor energia e electrões em movimento no meio, com energias determinadas pela diferença entre as energias dos fotões iniciais e as energias dos fotões emitidos.
- **Criação de pares:** fotões com energias elevadas (sempre > 1022 keV) sofrem colisões com “campos materiais” – p.ex. núcleos, átomos, etc. – e a sua energia é convertida na criação de um par partícula-antipartícula, em geral e mais frequentemente um electrão e um antielectrão (também chamado positrão). A criação de pares é também um fenómeno de **colisão inelástica**.
- **Dispersão de Rayleigh:** os fotões sofrem **interacções** com o conjunto dos electrões do átomo sendo reemitidos com igual energia mas em diferentes direcções de propagação.
- **Reacções foto-nucleares:** o fotão incidente, de energia elevada, é capturado pelo núcleo de absorvedor que emite uma partícula, p.ex. um neutrão. Ocorre para energias $>$ energias de separação de nucleões (e.g. neutrões).



As transferências de energia por fotões...

Com fotões os principais tipos de interacção que levam à transferência de energia para o meio são:

- **Absorção fotoeléctrica:** os fotões cedem toda a sua energia a electrões e desaparecem, desligando-se os electrões do átomo. O átomo fica ionizado e os electrões movem-se no meio inicialmente com energias iguais às energias dos fotões absorvidos subtraídas das energias de ligação dos electrões. Pode tomar-se a absorção fotoeléctrica como **uma colisão inelástica** com um electrão.
- **Dispersão de Compton:** os fotões sofrem **colisões elásticas** com electrões fracamente ligados (quase livres) e cedem uma fracção da sua energia aos electrões. Destas colisões resultam fotões com menor energia e electrões em movimento no meio, com energias determinadas pela diferença entre as energias dos fotões iniciais e as energias dos fotões emitidos.
- **Criação de pares:** fotões com energias elevadas (sempre > 1022 keV) sofrem colisões com “campos materiais” – p.ex. núcleos, átomos, etc. – e a sua energia é convertida na criação de um par partícula-antipartícula, em geral e mais frequentemente um electrão e um antielectrão (também chamado positrão). A criação de pares é também um fenómeno de **colisão inelástica**.

Conforme a energia dos fotões assim predominam determinados tipos de interacção:

- < 40 keV: **absorções fotoeléctricas** e excitações moleculares;
- 40 keV – 10 MeV: **dispersões de Compton**, originando electrões com energias elevadas
- > 10 MeV: **criação de pares**, originando electrões e positrões com energias elevadas

Da emissão de electrões (e positrões) com energias elevadas resultam elevadas densidades de ionizações e excitações

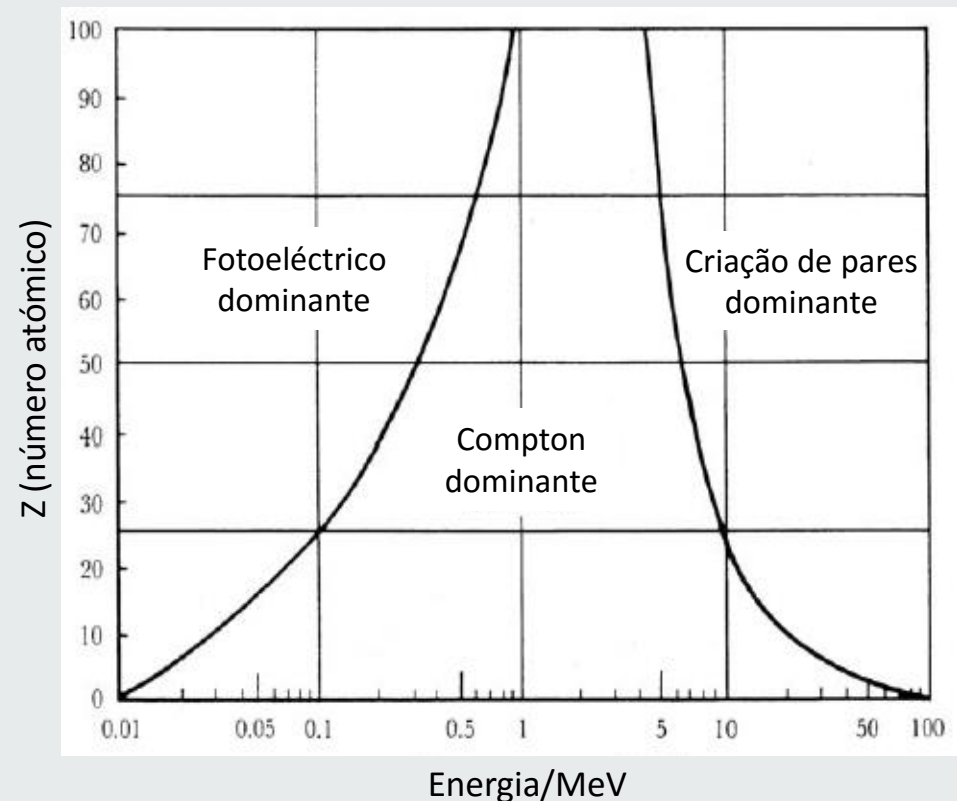
As transferências de energia por fotões...

Conforme a energia dos fotões assim predominam os diferentes tipos de interacção. As fronteiras ou limites dos intervalos de energia indicados não são rígidos nem bem definidos: dependem dos números de electrões que constituem os cortejos electrónicos dos átomos – depende do número atómico Z de cada átomo – como se ilustra na figura

Note-se que de facto assim é:

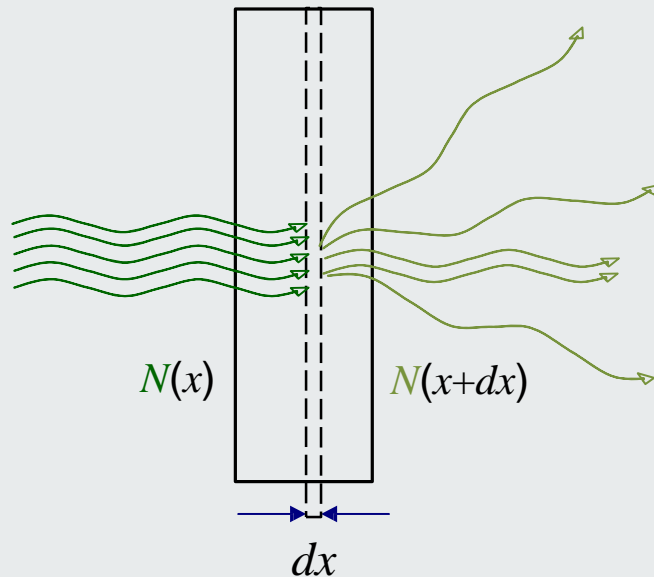
recorrendo aos limites indicativos dados, para fotões com ~ 40 keV a absorção fotoeléctrica domina as restantes interacções mas apenas para átomos com $Z > 56$ (*i.e.* o Ba ou mais pesados). Por exemplo para o Fe ($Z = 26$) e elementos mais leves ($Z < 26$) as interacções dominantes a estas energias (~ 40 keV) são – conforme indica a figura – as dispersões de Compton

se se tomar o outro limite dado, *i.e.* fotões com energias de ~ 10 MeV as interacções dominantes são a criação de pares para todos os elementos com $Z > 24$ (*i.e.* para o Cr, Fe e elementos mais pesados). Mas para elementos com $Z < 24$, como o Ca e mais leves a estas energias as dispersões de Compton são ainda dominantes



As transferências de energia por fotões...

Na lâmina fina de espessura infinitesimal dx à profundidade x incidem $N(x)$ fotões que nela interactivam por diferentes processos, com uma probabilidade μ de cada um ser removido do feixe - dependente apenas da interacção específica mas independente da história passada (i.e. se houve ou não alguma outra interacção anterior) - de forma que em dx o número de fotões removidos do feixe é proporcional ao número de fotões $N(x)$ e a dx , sobrevivendo assim, em $x + dx$, o número de fotões $N(x + d)$ dado por



$$N(x + dx) = N(x) - \mu N(x)dx$$

i.e.

$$N(x + dx) - N(x) = -dN = \mu N(x)dx$$

do que se espera um comportamento do tipo...

$$N(x) = N(0)e^{-\mu x}$$

ou

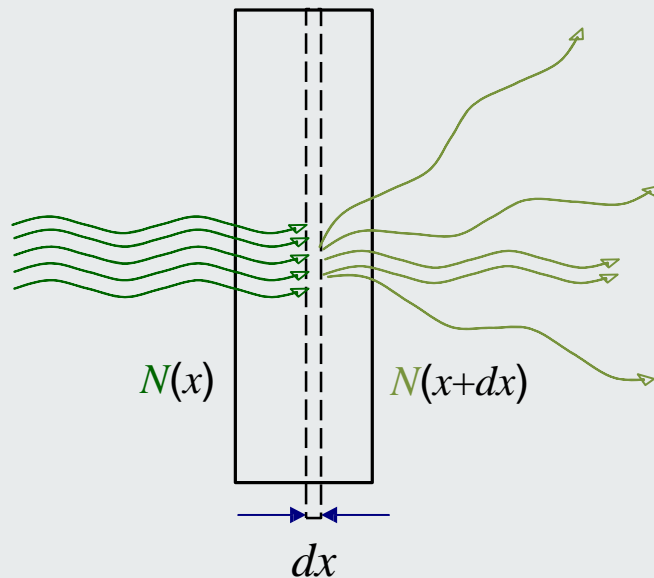
$$N(x) = N(x')e^{-\mu(x-x')}$$

sendo μ um coeficiente de atenuação linear

Representações gráficas da atenuação exponencial com indicação das localizações das espessuras hemi-redutora e deci-redutora.

As transferências de energia por fotões...

Na lâmina fina de espessura infinitesimal dx à profundidade x incidem $N(x)$ fotões que nela interactivam por diferentes processos, com uma probabilidade μ de cada um ser removido do feixe - dependente apenas da interacção específica mas independente da história passada (i.e. se houve ou não alguma outra interacção anterior) - de forma que em dx o número de fotões removidos do feixe é proporcional ao número de fotões $N(x)$ e a dx , sobrevivendo assim, em $x + dx$, o número de fotões $N(x + d)$ dado por



O coeficiente de atenuação para uma energia e um dado material, contém as contribuições individuais de cada tipo de interacção, para o desaparecimento (**atenuação**) dos fotões do feixe, que, tratando como independentes permitem escrever

$$N(x) = N(0)e^{-\left(\frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho} + \frac{R}{\rho}\right)(\rho x)}$$

↑
fotoeléctrico

↑
Compton

↑
Cr. pares

↑
Rayleigh

Representações gráficas da atenuação exponencial com indicação das localizações das espessuras hemi-redutora e deci-redutora.

As transferências de energia por fotões...

Para todos estes tipos de interações **a atenuação da intensidade da radiação é exponencial:**

$$I(x) = I_0 e^{-\mu(E,Z) \cdot x}$$

Os coeficientes de absorção relacionam-se por

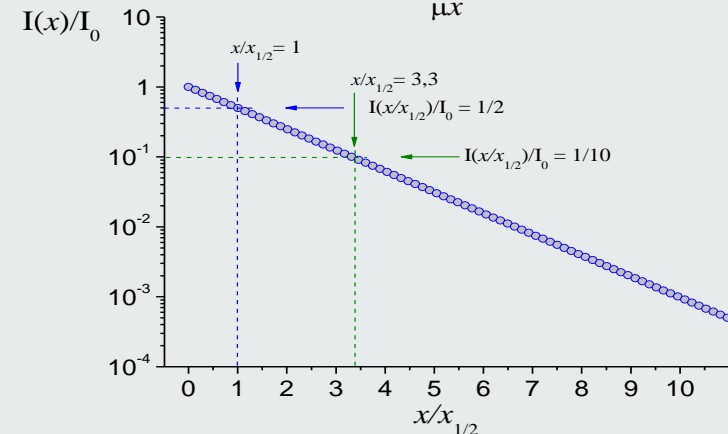
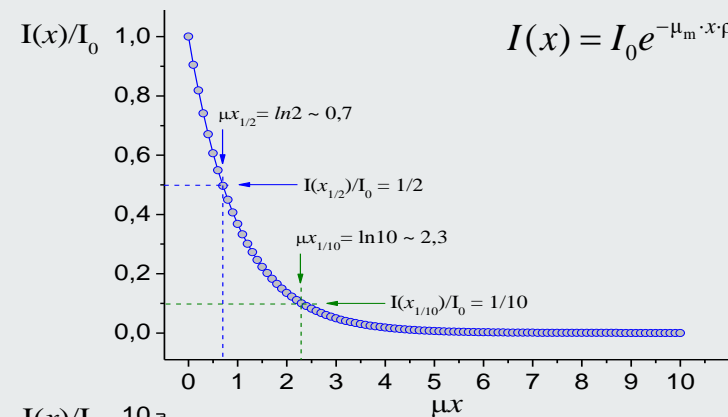
$$\mu_m \cdot \rho = \mu(E, Z)$$

O coeficiente mássico expressa-se em unidades do inverso de uma densidade superficial, p.ex. g^{-1}cm^2 , e o coeficiente linear em unidades do inverso de um comprimento, em cm^{-1} (com estas a densidade ρ é expressa em gcm^{-3})

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_m \cdot x \cdot \rho}$$

Com atenuações de intensidades com este comportamento a penetração da radiação e a energia efectivamente transferida não têm um confinamento bem definido. É por isso costume definirem-se as espessuras de material ou profundidades no meio que provocam atenuações de factores 2 e 10, que se podem designar respectivamente por espessuras semi-redutoras (ou hemi-redutoras) e deci-redutoras (do inglês “*half-value layer*”, HVL e “*tenth-value layer*”, TVL, respectivamente):

$$\begin{aligned} x_{1/2} &= \text{HVL} = \ln 2 / \mu \\ x_{1/10} &= \text{TVL} = \ln 10 / \mu \end{aligned} \Rightarrow \frac{x_{1/10}}{x_{1/2}} = \frac{\ln 10}{\ln 2} \approx 3,322$$



Absorção fotoeléctrica

Sendo $E_\gamma = h\nu$ a energia dos fótons, a energia cinética dos electrões ejectados de uma camada interior, p.ex. a camada K, é dada por

$$E_K = E_\gamma - E_B(K) = h\nu - E_B(K)$$

A energia transferida para estes electrões (na forma de energia cinética) é em média

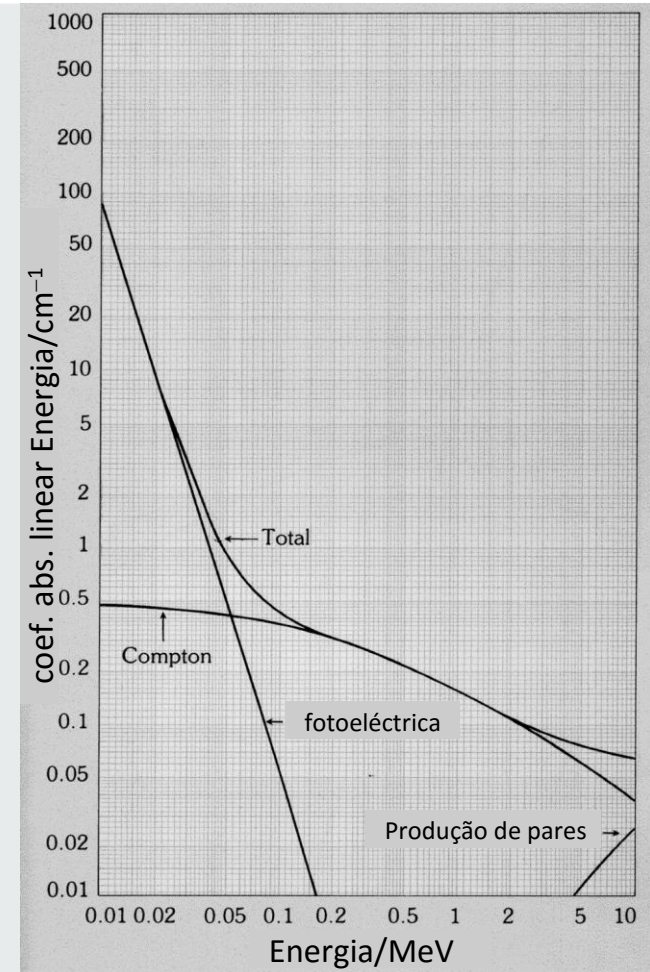
$$\langle E_K \rangle = h\nu - P_K \omega_K E_B(K)$$

P_K representa a fracção de ionizações (aqui na camada K, que é tipicamente de 1 a 0,8), e ω_K representa o rendimento de fluorescência (nas transições para, no caso, esta camada K)

Estes fenómenos de absorção fotoeléctrica **contribuem para as transferência de energia e também para a atenuação de intensidade do feixe**

A secção eficaz – a probabilidade de ocorrência – destas interações depende dos átomos com os quais se dão, *i.e.* do número de electrões Z (a dependência difere consoante se trata de calcular coeficientes lineares ou mássicos ou de atenuação), e pode expressar-se como proporcional a uma potência de Z :

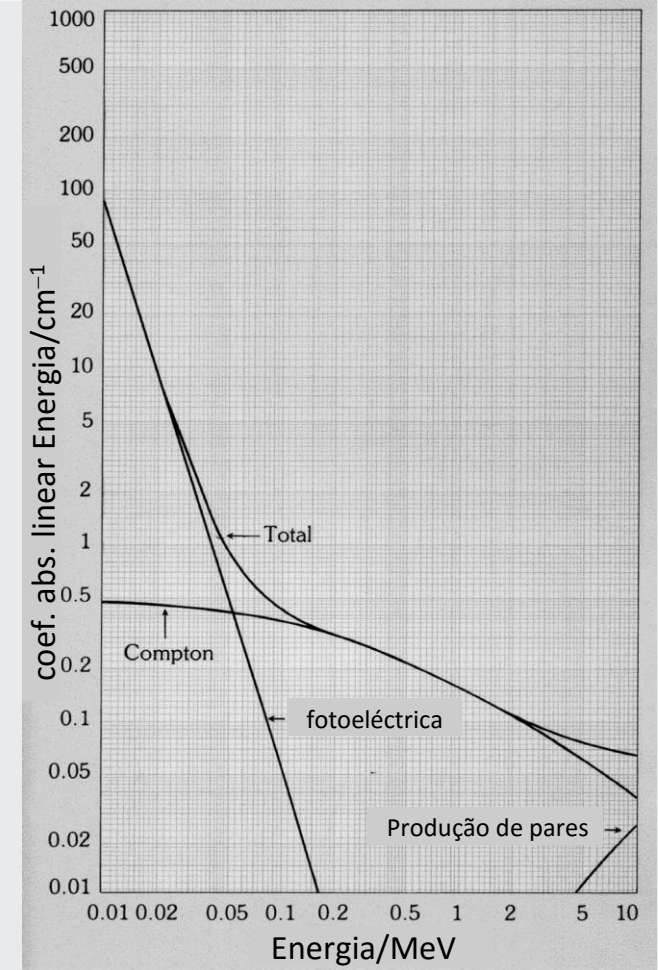
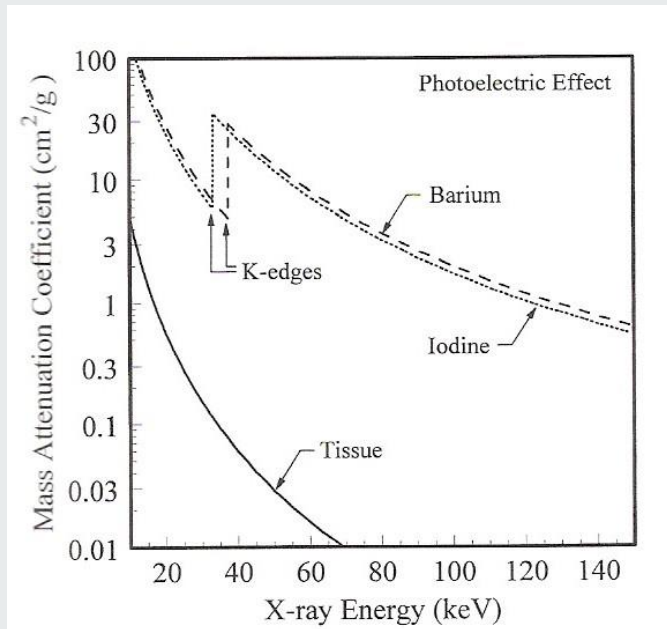
$$\sigma_{\text{lin}}^{\text{fel}} \propto Z^4 \quad \left[\sigma_{\text{m}}^{\text{fel}} \propto Z^3 \right]$$



Representação gráfica ilustrativa das contribuições de cada um dos tipos de interações para a atenuação da radiação incidente, em função da sua energia .

Absorção fotoelétrica

A probabilidade da interacção aumenta:
em função do número atómico do absorvedor
quando a energia do fóton é próxima da do nível K, L, ... do absorvedor



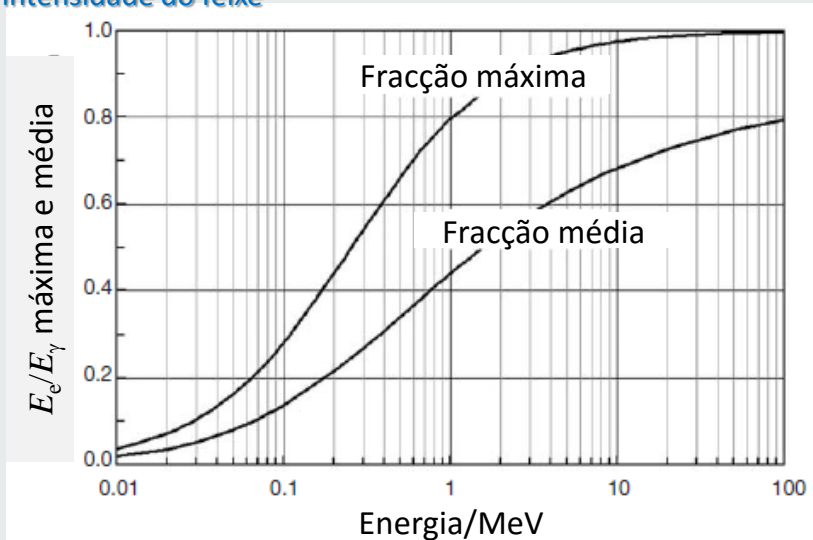
Representação gráfica ilustrativa das contribuições de cada um dos tipos de interacções para a atenuação da radiação incidente, em função da sua energia .

Dispersão de Compton

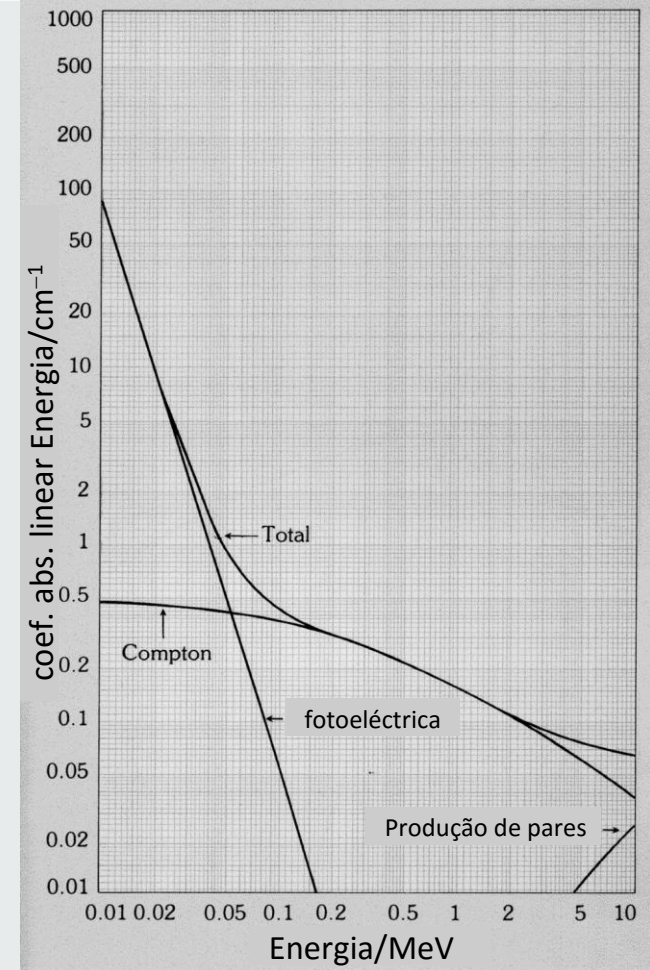
Sendo $E_\gamma = h\nu$ a energia dos fótons, depois de uma colisão (elástica) com um electrão (fracamente ligado) o fóton é desviado de um ângulo θ e fica com uma energia $E'_\gamma = h\nu' < E_\gamma$, o electrão adquire uma energia cinética E_e

$$E'_\gamma = E_\gamma \frac{1}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad \text{e} \quad E_e = E_\gamma \frac{\frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

Estes fenómenos **contribuem para a transferência de energia e atenuação de intensidade do feixe**



Variação das fracções máxima e média das energias dos fótons transferidas para os electrões em colisões de Compton, em função da energia dos fótons



Produção de pares

Sendo $E_\gamma = h\nu > 1,022 \text{ MeV}$ a energia dos fótons, estes poderão dar origem à criação de um par electrão-positrão, ficando as duas partículas do par com energia cinética total igual ao excesso relativamente ao valor de $1,022 \text{ MeV}$.

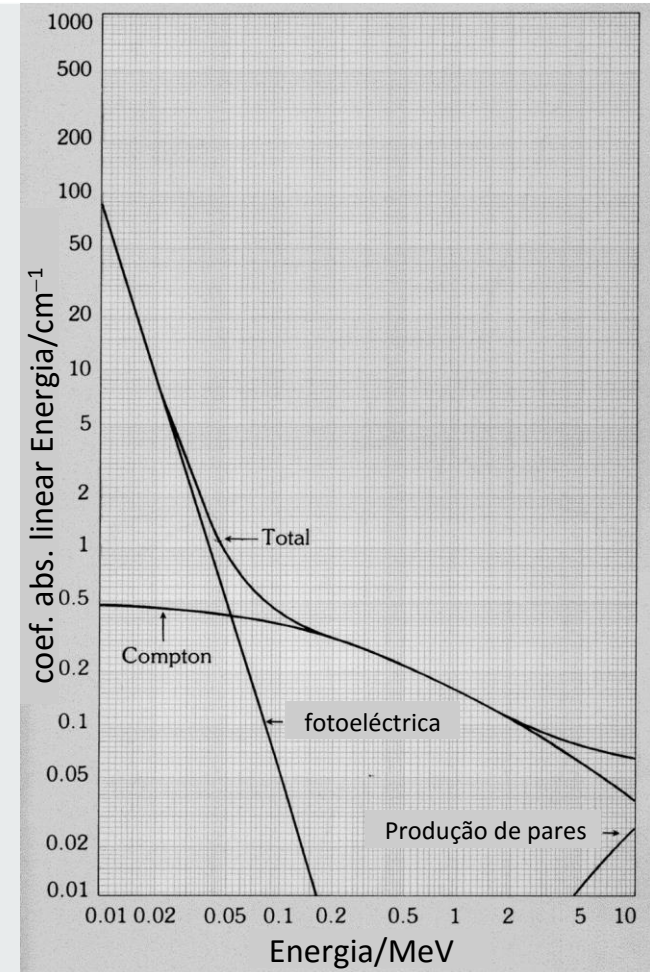
$$E_\gamma > 2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$$

$$E_e = h\nu - 2m_e c^2$$

A criação de pares **contribui para a transferência de energia e atenuação de intensidade do feixe**. É o principal mecanismo a energias muito elevadas.

A secção eficaz – a probabilidade de ocorrência – destas interações depende dos átomos com os quais se dão, *i.e.* do número de electrões Z (a dependência difere consoante se trata de calcular coeficientes lineares ou mássicos ou de atenuação), e pode expressar-se como proporcional a uma potência de Z :

$$\sigma_{\text{lin}}^{\text{par}} \propto Z^2 \quad \left[\sigma_{\text{m}}^{\text{par}} \propto Z \right]$$



Representação gráfica ilustrativa das contribuições de cada um dos tipos de interações para a atenuação da radiação incidente, em função da sua energia .

Dispersão coerente (dispersão de Rayleigh)

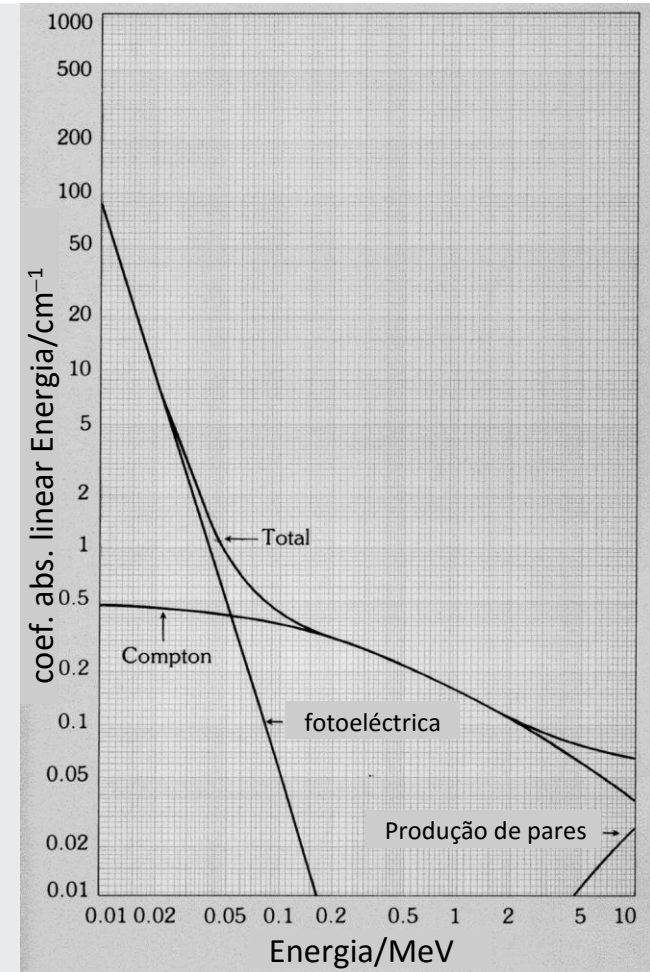
Na dispersão coerente – ou dispersão de Rayleigh – a energia dos fotões não é alterada:

$$E'_\gamma \approx E_\gamma$$

A dispersão de Rayleigh **não contribui para a transferência de energia, contribui para a atenuação da intensidade do feixe**

A secção eficaz destas interações depende dos átomos com os quais se dão, *i.e.* do número de electrões Z (a dependência difere consoante se trata de calcular coeficientes lineares ou mássicos ou de atenuação), e pode expressar-se como proporcional a uma potência de Z :

$$\sigma_{\text{lin}}^R \propto \left(\frac{Z}{E_\gamma} \right)^2 \quad \left[\sigma_{\text{m}}^R \propto \frac{Z}{E_\gamma^2} \right]$$



Representação gráfica ilustrativa das contribuições de cada um dos tipos de interações para a atenuação da radiação incidente, em função da sua energia .

Total

O efeito total dos vários processos de interação expressa-se pela soma de todos os coeficientes intervenientes, os coeficientes de absorção e de atenuação – no que respeita à transferência de energia e redução de intensidade do feixe – que se designarão por μ_{tr} e μ respectivamente:

$$\mu = \sigma^{fel} + \sigma^C + \sigma^{par} + \sigma^R$$

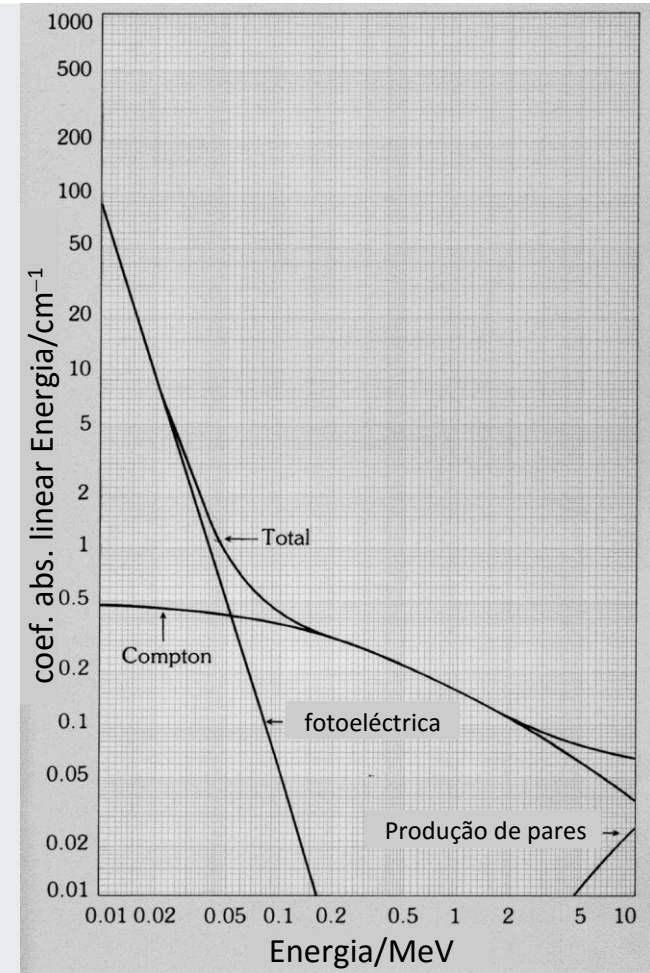
$$\mu_{tr} = \sigma_{tr}^{fel} + \sigma_{tr}^C + \sigma_{tr}^{par} = \sigma^{fel} \frac{\bar{E}_K}{h\nu} + \sigma^C \frac{\bar{E}_e^C}{h\nu} + \sigma^{par} \frac{\bar{E}_e^{par}}{h\nu}$$

No que respeita à energia transferida para o meio este último pode escrever-se como:

$$\mu_{tr} = \sigma^{fel} \frac{h\nu - P_K \omega_K E_B(K)}{h\nu} + \sigma^C \frac{\bar{E}_e^C}{h\nu} + \sigma^{par} \frac{h\nu - 2m_e c^2}{h\nu}$$

Evidentemente os coeficientes mássicos escrevem-se a partir destes dividindo pela densidade. No caso do cálculo da energia transferida para o sistema e nele absorvida tem que ter-se em conta a energia que se possa perder por radiação. Se essa contribuição radiativa for uma fracção f_{rad} do total, então finalmente

$$\frac{\mu_{abs}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1 - f_{rad})$$



Representação gráfica ilustrativa das contribuições de cada um dos tipos de interações para a atenuação da radiação incidente, em função da sua energia .

No que respeita às **perdas de energia pelos fótons** pode-se resumir com o seguinte quadro:

	Absorção fotoeléctrica	Dispersão de Compton	Criação de pares	Dispersão de Rayleigh
Tipo de interacção	Com o átomo (electrão ligados)	Com os electrões (quase) livres	Com o (campo do) núcleo	Com os electrões (ligados)
Destino do fóton	Aniquilação	Dispersão (incoerente)	Aniquilação	Dispersão (coerente)
Dependência em E	$(h\nu)^{-3}$	Diminui com E	Aumenta com E	$(h\nu)^{-2}$
Limiar	Não tem	Não tem	$2m_e c^2$	Não tem
Atenuação linear μ				
Partículas emitidas	fotoelectrão	electrão de recuo	par electrão-positrão	–
Dependência de μ em Z	Z^4	Z	Z^2	Z^2
Dependência de μ/ρ em Z	Z^3	independente	Z	Z
Energia média transferida				0
Efeito subsequente	Raios-X característicos Electrões de Auger	Raios-X característicos Electrões de Auger	Radiação de aniquilação	Nenhum

Exemplos de aplicação

Exercício: qual a espessura necessária de betão e de chumbo para reduzir o número de fótons de um feixe de 500 keV para um quarto do valor inicial?

Compare as espessuras em cm e em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. Repita o exercício para fótons de 1.5 MeV.

		Betão	Chumbo
ρ/gcm^{-3}		2,35	11,40
$(\mu/\rho)/\text{gcm}^{-3}$	500 keV	0,089	0,150
$(\mu/\rho)/\text{g}^{-1}\text{cm}^2$	1500 keV	0,052	0,051

Resolução:

Use $N(x) = N_0 e^{-\frac{\mu}{\rho}(\rho x)}$ na forma $x = -\frac{\frac{1}{\rho} \ln\left(\frac{N}{N_0}\right)}{\frac{\mu}{\rho}}$ com os valores dados para 500 keV, para betão

e obtenha:

$$x = -\frac{\frac{1}{2,35 \text{ gcm}^{-3}} \ln(0,25)}{8,089 \text{ g}^{-1}\text{cm}^2} = 6,63 \text{ cm} \quad \text{e} \quad (x\rho) = -\frac{\ln(0,25)}{8,089 \text{ g}^{-1}\text{cm}^2} = 15,6 \text{ gcm}^{-2}$$

Repita para o chumbo

Exemplos de aplicação

Exercício: qual a espessura necessária de betão e de chumbo para reduzir o número de fótons de um feixe de 500 keV para um quarto do valor inicial?

Compare as espessuras em cm e em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. Repita o exercício para fótons de 1.5 MeV.

		Betão	Chumbo
ρ/gcm^{-3}		2,35	11,40
$(\mu/\rho)/\text{gcm}^{-3}$	500 keV	0,089	0,150
$(\mu/\rho)/\text{g}^{-1}\text{cm}^2$	1500 keV	0,052	0,051

Resolução:

500 keV	Betão	Chumbo
x/cm	6,83	0,811
$(x\rho)/\text{gcm}^{-2}$	15,6	9,25

Repita para o chumbo para 1500 keV:

$$x = -\frac{1}{11,40 \text{ gcm}^{-3}} \frac{\ln(0,25)}{0,051 \text{ g}^{-1}\text{cm}^2} = 2,38 \text{ cm} \quad \text{e} \quad (x\rho) = -\frac{\ln(0,25)}{0,051 \text{ g}^{-1}\text{cm}^2} = 27,2 \text{ gcm}^{-2}$$

Repita para o betão



Exemplos de aplicação

Exercício: qual a espessura necessária de betão e de chumbo para reduzir o número de fótons de um feixe de 500 keV para um quarto do valor inicial?

Compare as espessuras em cm e em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. Repita o exercício para fótons de 1.5 MeV.

		Betão	Chumbo
ρ/gcm^{-3}		2,35	11,40
$(\mu/\rho)/\text{gcm}^{-3}$	500 keV	0,089	0,150
$(\mu/\rho)/\text{g}^{-1}\text{cm}^2$	1500 keV	0,052	0,051

Resolução:

500 keV	Betão	Chumbo
x/cm	6,83	0,811
$(x\rho)/\gamma\text{cm}^{-2}$	15,6	9,25

1500 keV	Betão	Chumbo
x/cm	11,4	2,38
$(x\rho)/\gamma\text{cm}^{-2}$	26,8	27,2



Em física das radiações e dosimetria o conhecimento das interações, como se processam que consequências têm e sobretudo como ocorrem as transferências de energia para o meio são, evidentemente, muito importantes.

A medida quantitativa desses efeitos é igualmente importante

Essa medida pode exprimir-se de diferentes modos, um dos mais informativos é concretizado através da grandeza dose. Esta grandeza expressa a quantidade de energia depositada no meio pela radiação que nele incide por unidade de massa do mesmo

Para essa expressão recorre-se à taxa ou razão de transferência de energia da radiação – i.e. às perdas de energia por unidade de comprimento - para o meio, precisamente a grandeza que se tem vindo a calcular, na forma

$$\frac{1}{\rho} \left(- \frac{dE}{dl} \right)_{\text{col.}}$$
 (em unidades de em $\text{MeVcm}^2\text{g}^{-1}$ ou em $\text{Jcm}^2\text{g}^{-1}$) pertinente às colisões (i.e. excluindo processos radiativos que conduzam à transferência de energia para fora do meio).

A dose – a energia depositada por unidade de massa no meio pela radiação – é assim expressa como:

$$D = \Phi \times \frac{1}{\rho} \left(- \frac{dE}{dl} \right)_c$$

e tem unidades de Jkg^{-1} (no SI).

A dose, como o mostra a expressão, é proporcional à fluência da radiação (em cm^{-2} ou equivalente).

Este conceito e a sua expressão mostram e consolidam a importância do conhecimento das perdas de energia – que dependem da natureza e energia da radiação, e da natureza do meio – mas também da intensidade da radiação.