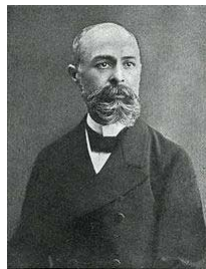


RADIOKÉMIA

László Krisztina,
F ép. I. lh., I. emelet, 135
klaszlo@mail.bme.hu

Nagy Lajos György és LK: Radiokémia és izotóptechnika
Műegyetemi Kiadó 1997



Antoine Henri Becquerel
(1852 - 1908)

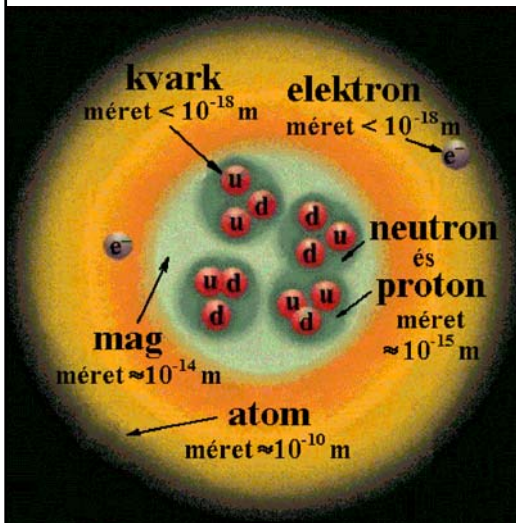


Maria Skłodowska-Curie
(1867 - 1934)

1903: AHB, MSC és PC - megosztott fizikai Nobel-díj
a radioaktivitás felfedezéséért

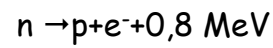
1911: MSC kémiai Nobel-díj
a rádium és polónium felfedezéséért, a rádium sikeres izolálásáért

Az atommag felépítése



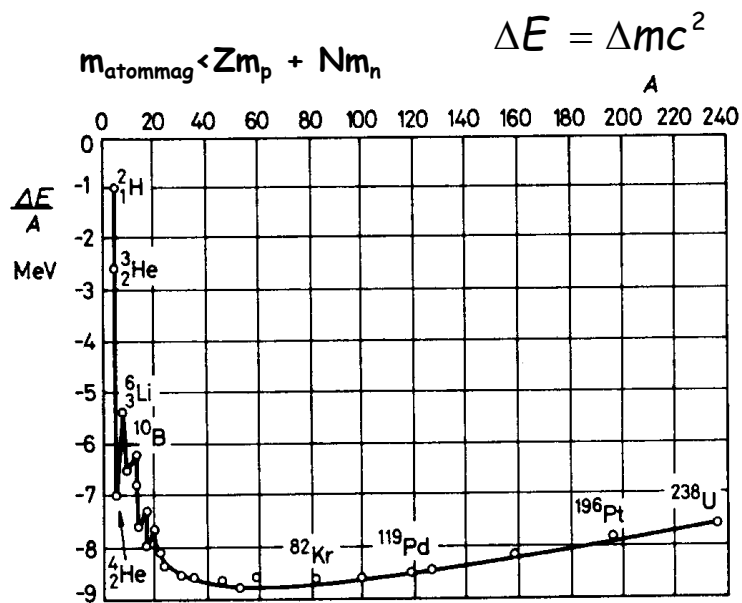
	m	E, MeV
p	$1,6726 \times 10^{-24} \text{g}$	938,27
n	$1,6749 \times 10^{-24} \text{g}$	939,55
e^-	$9,109 \times 10^{-28} \text{g}$	0,51

$$\Delta E = \Delta mc^2$$



3

A magok (nuklidok) kötési energiája

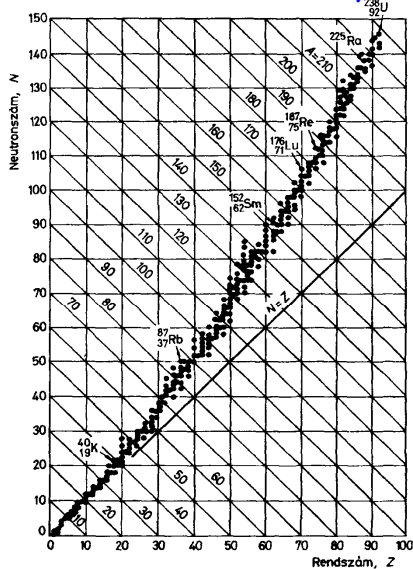


4

A nuklidok

Jelölések $A=N+Z$
 Z X

Stabilis nuklidok N/Z aránya



A neutronok szerepe

Stabilis
Instabilis

Természetes
Mesterséges

Izotóp: Z azonos
Izobár: A azonos
Izotón: N azonos

5

Izotópeffektus alkalmazások

i Radioaktív izotóp !

spektroszkópia (pl. rezgési, MS)
oldószer (H/D, NMR, neutronszórás)
izotópdúsítás
CSIA: compound specific isotope analysis



elhanyagolás?
nyomjelzés
„rendhagyó” szerves szintézis
radioanalitika

6

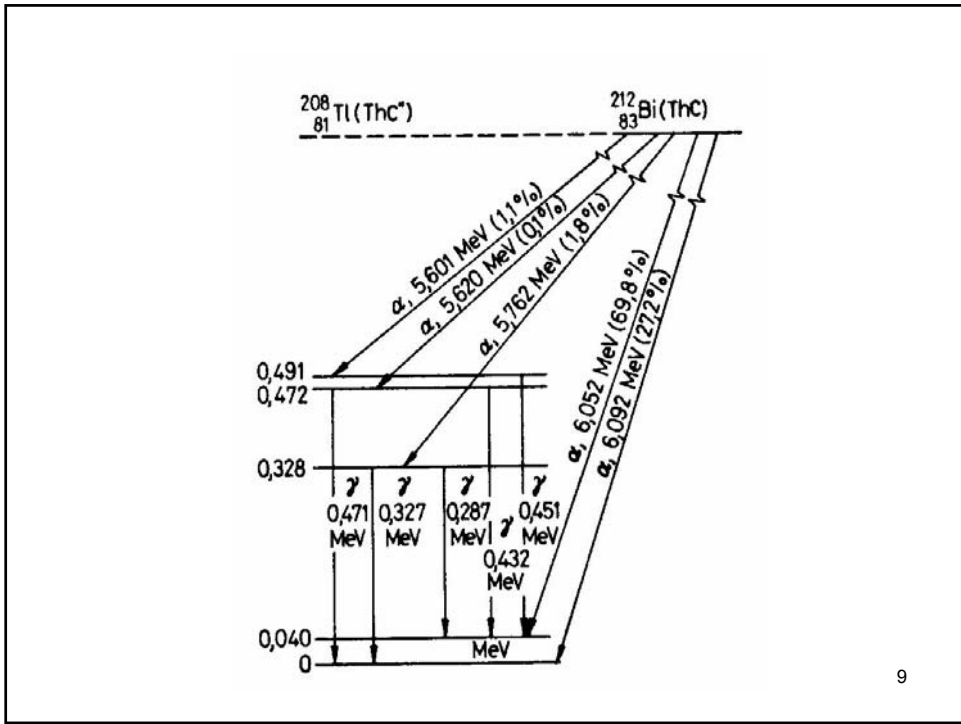
Radioaktivitás

A mag energiafeleslege spontán magátalakulással szűnik meg, miközben a mag tulajdonságai időben változnak és energia szabadul fel.
Megmaradási elvek

7

Spontán magátalakulások

8

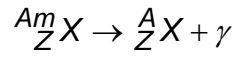


9

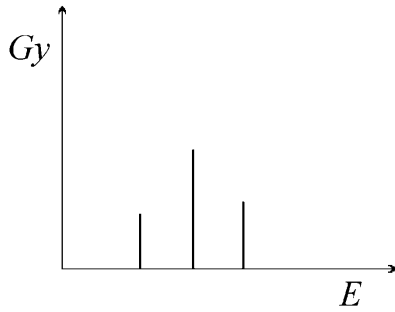
Z	Izotóp	$T_{1/2}$	Bomlási mód	Részecskeenergia, MeV	γ -energia, MeV	η , %	Előállítás	$\sigma' = f\sigma \cdot 10^{28}, \text{m}^2$	Leányelem
27					2,02 2,60 2,99 3,25 3,47	11 % 16 % 1 % 12 % 1 %			
	^{57}Co	270 d	$E.X.$	100 %	0,014 0,122 0,136	6 % 88 % 10 %	83 % 1 % 1 %	$^{56}\text{Fe}(d,n)$ $^{60}\text{Ni}(p,\alpha)$	0,9
	^{58}Co	71,3 d	$E.X.$ β^+	85 % 15 %	0,81 1,62 0,51 (β^+)	100 % 0,5 %		$^{58}\text{Ni}(n,p)$	
	^{60m}Co	10,5 min	I	100 %	0,059	0 %	$\approx 100\%$	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)$	19
	^{60}Co	5,27 a	β^-	$\approx 100\%$ 0,01 %	1,17 1,33	100 % 100 %		$^{59}\text{Co}(n,\gamma)$	37
28	^{63}Ni	92 a	β^-	0,067 100 %				$^{62}\text{Ni}(n,\gamma)$	0,77
	^{65}Ni	2,521 h	β^-	0,60 1,01 2,10	$\approx 23\%$ $\approx 8\%$ $\approx 69\%$	0,37 1,11 1,49	5 % 13 % 18 %	$^{64}\text{Ni}(n,\gamma)$	0,016
	^{64}Cu	12,9 h	β^- β^+ $E.X.$	0,57 0,66 43 %	38 % 19 %	0,51 (β^+) 1,34	0,6 %	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)$	3,0
^{66}Cu	5,10 min	β^-	0,76 1,59 2,63	$< 0,2\%$ $\approx 9\%$ $\approx 91\%$	0,83 1,04	0,2 % 9 %	$^{65}\text{Cu}(n,\gamma)$	0,56	

10

Izomer átalakulás



$$\Delta E = h \cdot \nu$$

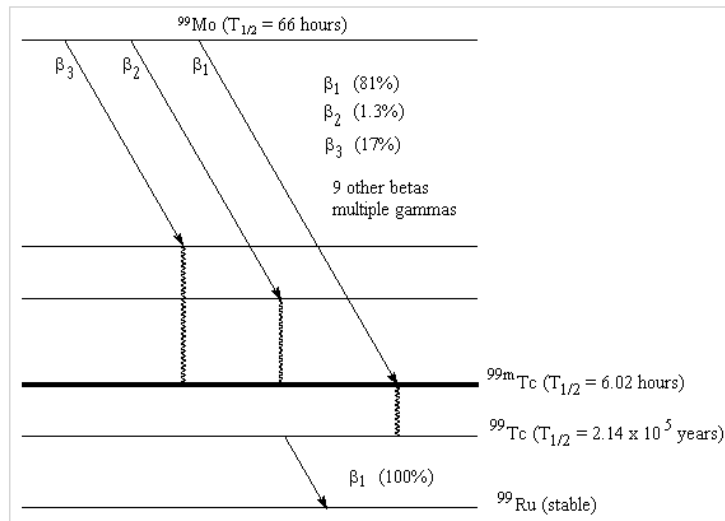


vonalas spektrum

Izomer átalakulással
bomló izotópok

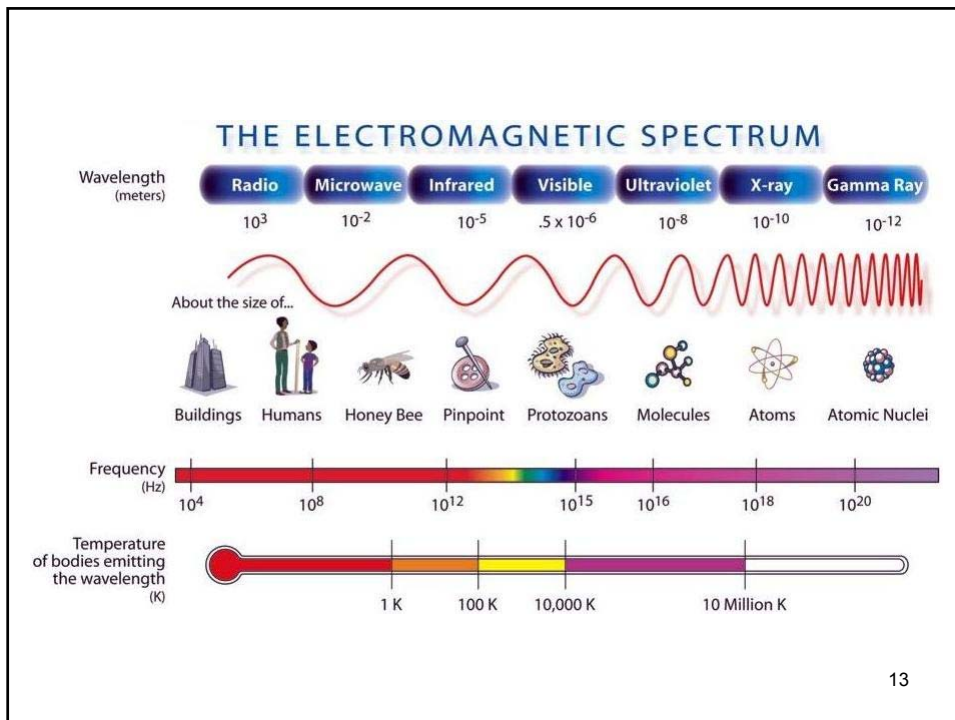
nuklid	$T_{1/2}$	$E_\gamma, \text{ MeV}$
${}^{60m}\text{Co}$	10,5 min	0,059
${}^{99m}\text{Tc}$	6,0 h	0,143

11



The decay of ${}^{99}\text{Mo}$ to ${}^{99}\text{Ru}$ via ${}^{99m}\text{Tc}$ and ${}^{99}\text{Tc}$ presented as a simplified energy level diagram.

12



β - bomlások

közös tulajdonságok
 $A = \text{állandó}$
 $\Delta Z = \pm 1$
 ν vagy $\bar{\nu}$

β⁻-bomlás

$${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z+1}^A Y + \beta^- + \bar{\nu} + [\gamma]$$

$$n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu} \quad \text{exoterm}$$

β⁺-bomlás

$${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-1}^A Y + \beta^+ + \nu + [\gamma]$$

$$p \rightarrow n + \beta^+ + \nu \quad \text{endoterm}$$

elektronbefogás

$$e^- + {}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-1}^A Y^* + \nu + [\gamma]$$

$$e^- + p \rightarrow n + \nu \quad \text{endoterm}$$

Karakt. X-foton

14

Neutrino kutatásokért díjazott fizikai Nobel-díjasok

Frederick Reines (1956, Science) az első közvetlen detektálásért	1995
Leon M. Lederman, Melvin Schwartz and Jack Steinberger (1962) többfajta neutrino létezik	1988
Raymond Davis, Jr., Masatoshi Koshiba a kozmikus neutrino vizsgálataik eredményéért	2002
Takaaki Kajita, Arthur B. McDonald neutrino oszcilláció felfedezése: nyugalmi tömeggel bíró részecskék	2015

15

Tiszta β^- -sugárzó izotópok

nuklid	energia, MeV	$T_{1/2}$
^3H	0,018	12,26 a
^{14}C	0,159	5730 a
^{32}P	1,71	14,3 d
^{35}S	0,167	88 d
^{90}Sr	0,54	28,1 a
^{90}Y	2,25	64 h

Kevert ($\beta+\gamma$) sugárzó izotópok

nuklid	$T_{1/2}$	β -energia, MeV	γ -energia, MeV
^{60}Co	5,27 a	0,31	1,17/1,33
^{131}I	8,07 d	0,61	0,36
^{137}Cs	30,23 a	0,51	0,662

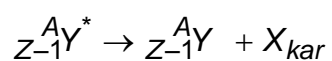
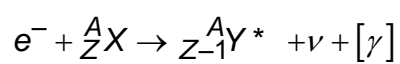
16

Pozitron bomló izotópok

nuklid	$T_{1/2}$	E_{β^+} MeV
^{11}C	20,3 min	0,97
^{13}N	9,97 min	1,2
^{15}O	124 s	1,7
^{18}F	109,7 min	0,064

17

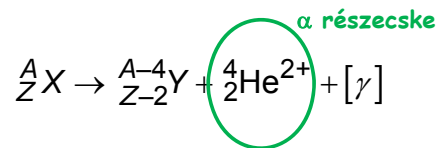
Elektronbefogással stabilizálódó (EX) izotópok



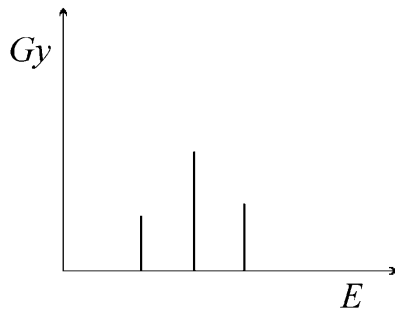
nuklid	$T_{1/2}$	E_{β} MeV
^{54}Mn	303 d	0,84
^{125}I	60 d	0,035

18

α -bomlás



4-9 MeV



vonalas spektrum

nuklid	$T_{1/2}$
${}^{235}\text{U}$	7,1E8 a
${}^{226}\text{Ra}$	1600 a
${}^{222}\text{Rn}$	3,8 d

19

Radioaktív mag és bomlásterméke

Izomer átalakulás:

azonos tömegűek, kémiai azonosak

Béta-bomlások:

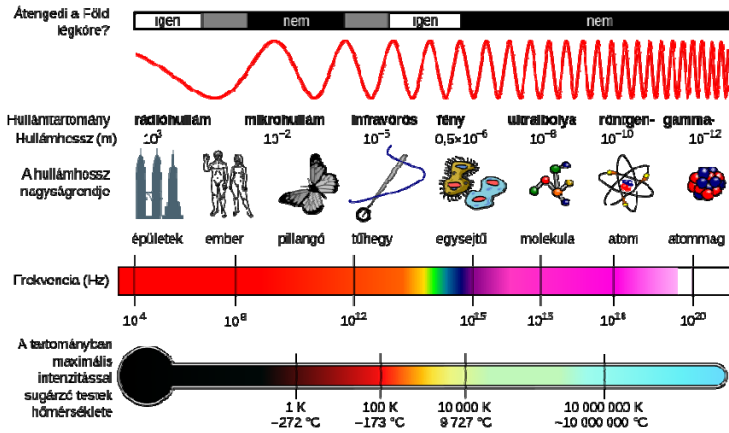
azonos tömegűek, de kémiai különbözőek

Alfa-bomlás:

tömegük és kémiai tulajdonságaik is különböznek

20

Elektromágneses sugárzás



γ : az atommagból kilépő elektromágneses sugárzás (foton) vonalas spektrumú
 X: elektronhéj eredetű

21

A radioaktív bomlások kinetikája

22

Egylépéses egyszerű magátalakulás

$$A \equiv -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

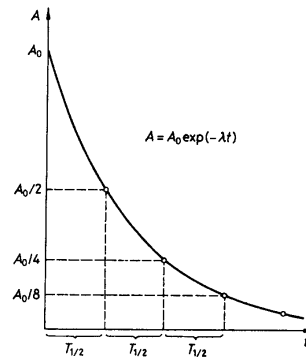
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad A = A_0 e^{-\lambda t}$$

λ bomlási állandó

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad [A] = \frac{1}{\text{idő}}$$

$$\frac{1 \text{ bomlás}}{\text{másodperc}} = 1 \text{ becquerel} = 1 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$



23

Radioszén kormeghatározás

Libby 1946, 1960

Jégbefagyott mamut-tetemet találtak Szibériában.
Testében a ^{14}C mennyisége 21 %-a volt csak a ma

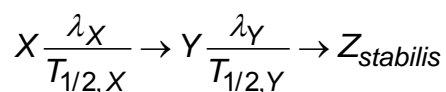
élő állatokhoz képest. (Ma élő állatokban $\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}} = 10^{-12}$).

Milyen régi a tetem?

A radioszén felezési ideje 5730 év.

24

Bomlási sorok



$$A = A_X + A_Y$$

$$A_X = \lambda_X N_X = A_{X,0} e^{-\lambda_X t}$$

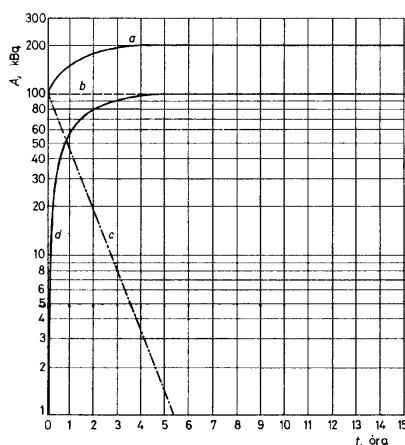
$$A_Y = \lambda_Y N_Y = A_{X,0} \frac{\lambda_Y}{\lambda_Y - \lambda_X} [\exp(-\lambda_X t) - \exp(-\lambda_Y t)],$$

$$A_Y = A_X \frac{\lambda_Y}{\lambda_Y - \lambda_X} \{1 - \exp[-(\lambda_Y - \lambda_X)t]\}.$$

λ_X és λ_Y viszonya a meghatározó

25

Teoretikus példa



$$T_{1/2,A} \gg T_{1/2,B}$$

legyen

$$T_{1/2,A} = 8 \cdot 10^7 \text{ h}$$

$$T_{1/2,B} = 0,8 \text{ h}$$

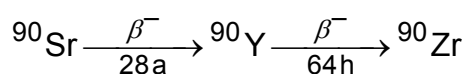
a görbe: $A_A + A_B$

b: A_A

c: A_B ha az anyaelem nem lenne jelen

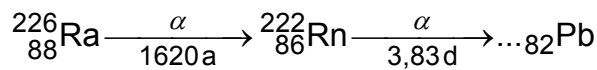
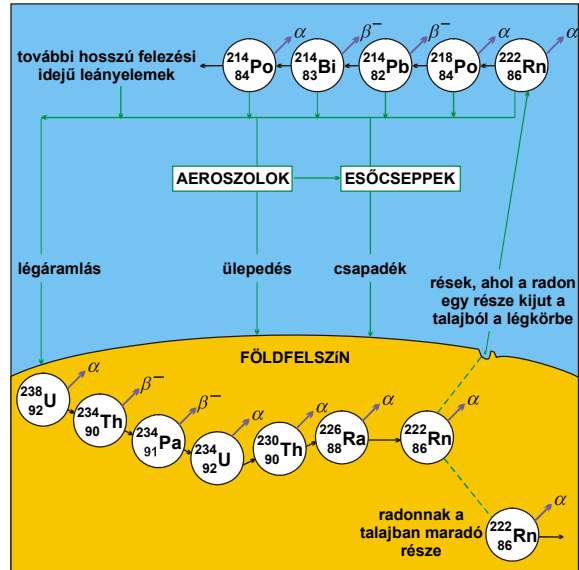
d: A_B amikor az anyaelem termeli

Valós pl. 1



26

Valós pl. 2



27

A sugárzás kölcsönhatása az anyaggal

Az elnyelődés mértéke/az áthatolóképeség mitől függ?
 Mi történik a sugárzással/anyaggal?
 Radioaktív lesz-e egy anyag, ha nukleáris sugárzás éri?
 Előállíthatók-e mesterséges radioaktív magok?

28

Részecskék (m, töltés)

	<u>I.</u>	<u>II.</u>	<u>III.</u>
a	b		
p	e ⁺	n	γ
α	e ⁻		X

Partner

1. Molekulák
2. Elektromos erőtér **ionizáló sugárzás**
3. Elektron
4. Atommag erőtere **magreakció**
5. Atommag

Mechanizmus

A) Elnyelődés (abszorpció)	sugárzás: anyag:	$\Delta I, \Delta E$ E_{kin}, E^*
B) Koherens szórás (csak irányváltozás)	sugárzás: anyag:	ΔI -
C) Inkohereus szórás (energicseré is) rugalmas (nincs gerjesztés) rugalmatlan	sugárzás: anyag:	$\Delta I, \Delta E$ E_{kin}, E^* 29

1. Ionizáló sugárzások

Az ionizációs kölcsönhatás a DETEKTÁLHATÓSÁG ALAPJA

1. Semleges gerjesztés



2. Külső ionizáció



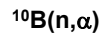
3. Belső ionizáció



4. Fékezési röntgensugárzás



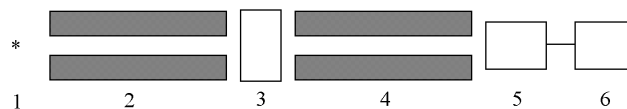
NEUTRON-DETEKTÁLÁS: Közvetett ionizáció



31

Az intenzitásgyengülés mennyiségi leírása

A méréselrendezés



- 1 Pontszerű sugárforrás (a tér minden irányába lép ki a sugárzás)
- 2,4 Kollimátor (a sugárzás párhuzamosítására)
- 3 Az ANYAG
 - vastagsága x
 - rendszáma Z
 - atomi sűrűsége ρ_A : az atomok száma egységnyi térfogatban
- 5 Érzékelő (detektor)
- 6 Jelfeldolgozó

32

Az anyagba t idő alatt bejutó részecskék száma n
 Az x úton ρ_A -nak megfelelő számú részecskével léphetnek kölcsönhatásba
 Nem minden „találkozás” eredményes:
 a valószínűséget a σ HATÁSKERESZTMETSZET veszi figyelembe
 $\sim 10^{-28} \text{ m}^2$ nagyságrendű
 függ a részecske (sugárzás) energiájától

Így a tényleges kölcsönhatások száma $v = \sigma(E)n x \rho_A$

A dx úthosszon elnyelődő részecskék száma $-dn = \sigma(E)n \rho_A dx$

Ha $x=0$, minden részecske eljut a detektorig: $n = n_0 e^{-\sigma(E)\rho_A x}$

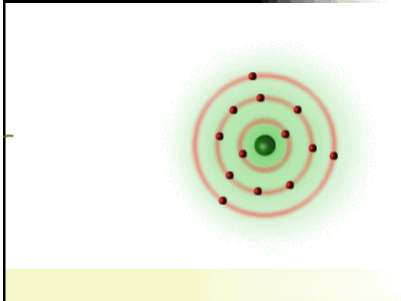
$I = I_0 e^{-\mu' x}$ $\mu' = \sigma(E)\rho_A$ lineáris gyengülési együttható, pl. $1/\text{cm}$

$I = I_0 e^{-(\mu'/\rho)x \cdot \rho} = I_0 e^{-\mu \cdot d}$
 $\mu = \sigma(E)\rho_A/\rho$ tömeggyengülési együttható, pl. cm^2/g
 $d = \rho x$ felületi sűrűség, pl. g/cm^2

$x_{1/2} = \ln 2 / \mu'$ Felezési rétegvastagság $d_{1/2} = \ln 2 / \mu$ ³³

γ -sugárzás

1. Fotoeffektus



$$A + \gamma \longrightarrow A^{*+} + e_f^-$$

$$A^{*+} \begin{cases} \longrightarrow A^+ + X_k \\ \longrightarrow A^{2+} + e_A^- \end{cases}$$

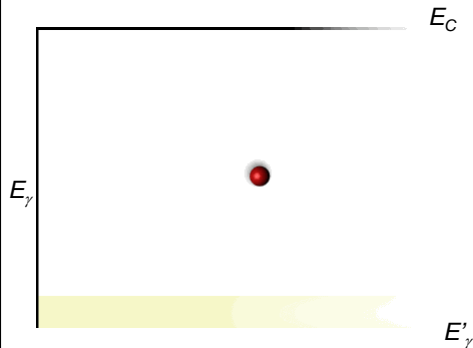
$$\sigma_f \approx \text{konst.} \frac{Z^4}{(h\nu)^3}$$

$n(E) = 4 - 5$

34

2. Compton-szórás

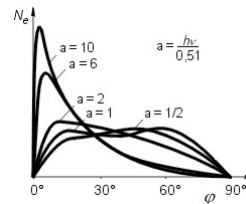
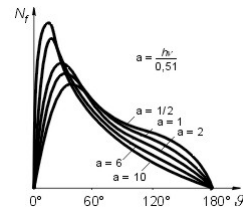
$$E'_r = \frac{E_r}{\frac{E_r}{0,51}(1 - \cos \vartheta) + 1} \text{ MeV}$$



Az egyenletekben szereplő ϑ a foton eltérülésének szöge (az ábrán v).

$$E_C = E_r - E'_r = \Delta E = \frac{E_r E'_r}{0,51} (1 - \cos \vartheta) \text{ MeV}$$

Nagy γ energia: kisebb eltérülési szög preferált



35

$$\sigma_C = \sigma_s + \sigma_a$$

szórás + abszorpció

$$\sigma_s = \frac{8\pi r^2}{3} (1 - 3a + 9,4a^2 - 28a^3)$$

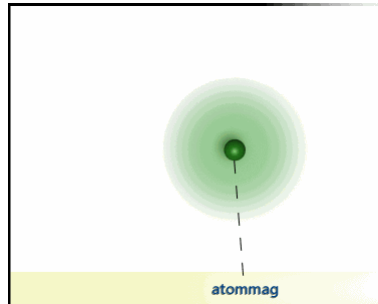
$$a = \frac{E_\gamma}{0,51}$$

$$\sigma_a = \frac{8\pi r^2}{3} (a - 4,2a^2 + 14,7a^3)$$

$$\mu_c = \frac{\mu'_c}{\rho} = \sigma_c \frac{\rho_k}{\rho} = \sigma_c \frac{N_k Z}{A}$$

34

3. Párképzés



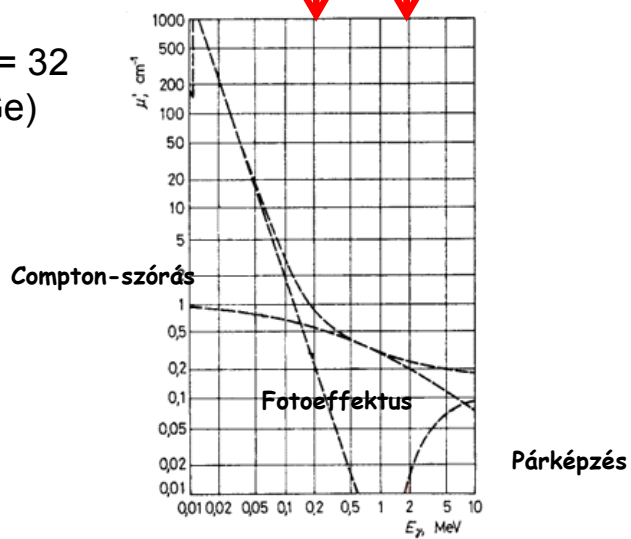
$$\sigma_P = K(E_f - 1,02)^{2,2} Z^2$$

37

A kölcsönhatásokra jellemző gyengülési együtthatók összeadódnak:

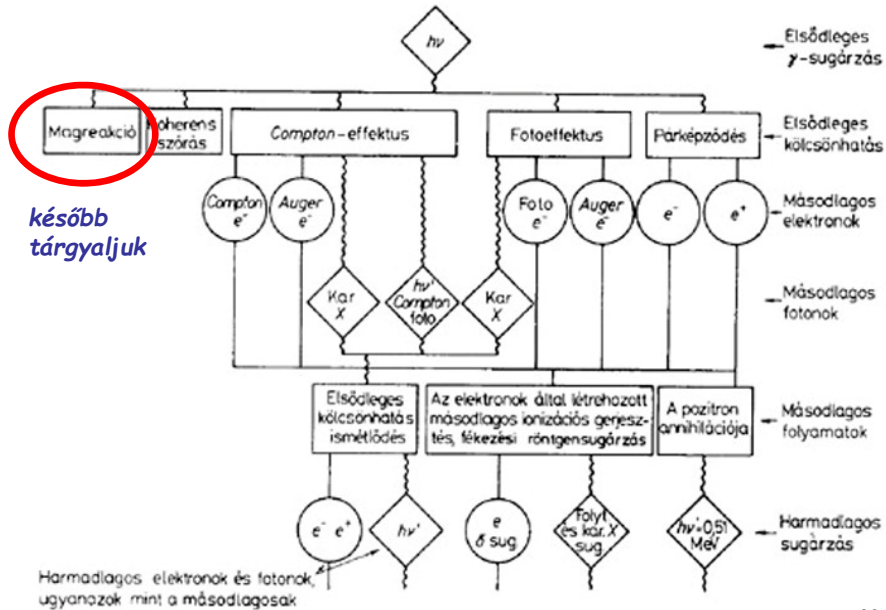
$$I = I_0 e^{-\mu' x} = I_0 e^{-(\mu'_C + \mu'_f + \mu'_p) x}$$

Z = 32
(Ge)



38

A képződő másodlagos részecskék továbbhaladnak az anyagban



39

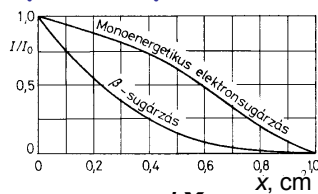
β-sugárzás

nyugalmi tömeg 0,51 MeV

-/+ töltés

folytonos spektrumú

! folytonos (fékezési) röntgensugárzás !



Elektronnal (azonos a tömegük)

-inkohérens szórás

ionizáció (külső és **belső**) és gerjesztés

energia- és irányváltozás

(pozitron: annihiláció)

A mag erőterével

-inkohérens szórás

$$I = I_0 e^{-\mu' x}$$

Fékezés (r) és ionizáció (ion) során leadott energia:

$$\frac{\left(\frac{dE}{dx}\right)_r}{\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion}} = \frac{EZ}{800}$$

40

α -sugárzás

nyugalmi tömeg ~ 4.931 MeV

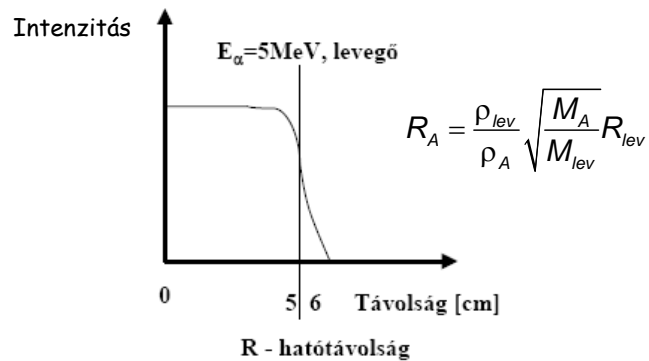
töltés: $2+$! Folytonos (fékezési) röntgensugárzás !

vonalas spektrumú (4-9 MeV)

Elektronnal inkoherens szórás

ionizáció és gerjesztés (50-50 %)
energia- és irányváltozás

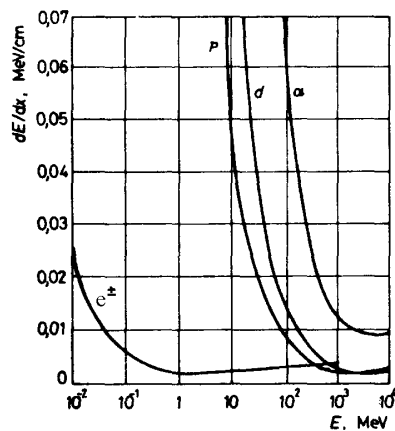
Maggal magátalakítás (később), Rutherford-féle szórás



41

Hasonlítsuk össze néhány részecske gyengülését azonos közegben: levegő

Lineáris energiaátadás (LET)



elektron/pozitron
proton, p (${}^1\text{H}^+$)
deuteron, d (${}^2\text{H}^+$)
alfa részecske, α (${}^4\text{He}^{2+}$)

$$dE/dx \approx 1/v^2$$

42