

Sugárzások kölcsönhatása az anyaggal

Madas Balázs

Bevezető

- Mi a sugárzás?
- Mi az anyag?
- Mi az, hogy kölcsönhatás?

Nukleáris sugárzások

1896 - Becquerell:==> RADIOAKTIVITÁS

-Léteznek nem stabil atomok, amelyek spontán bomlanak

Hogyan jellemezhetjük a stabilitás mértékét?

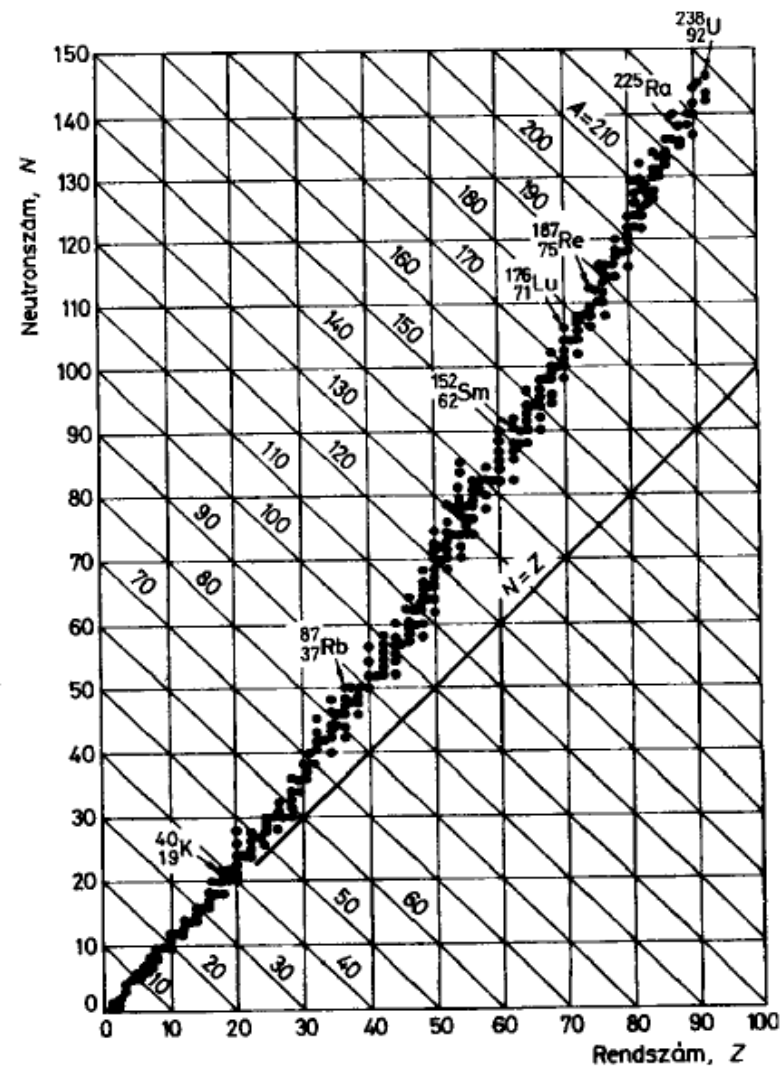
Az atommag kötési energiája:

$$Z \cdot m_p + N \cdot m_n > m_A$$

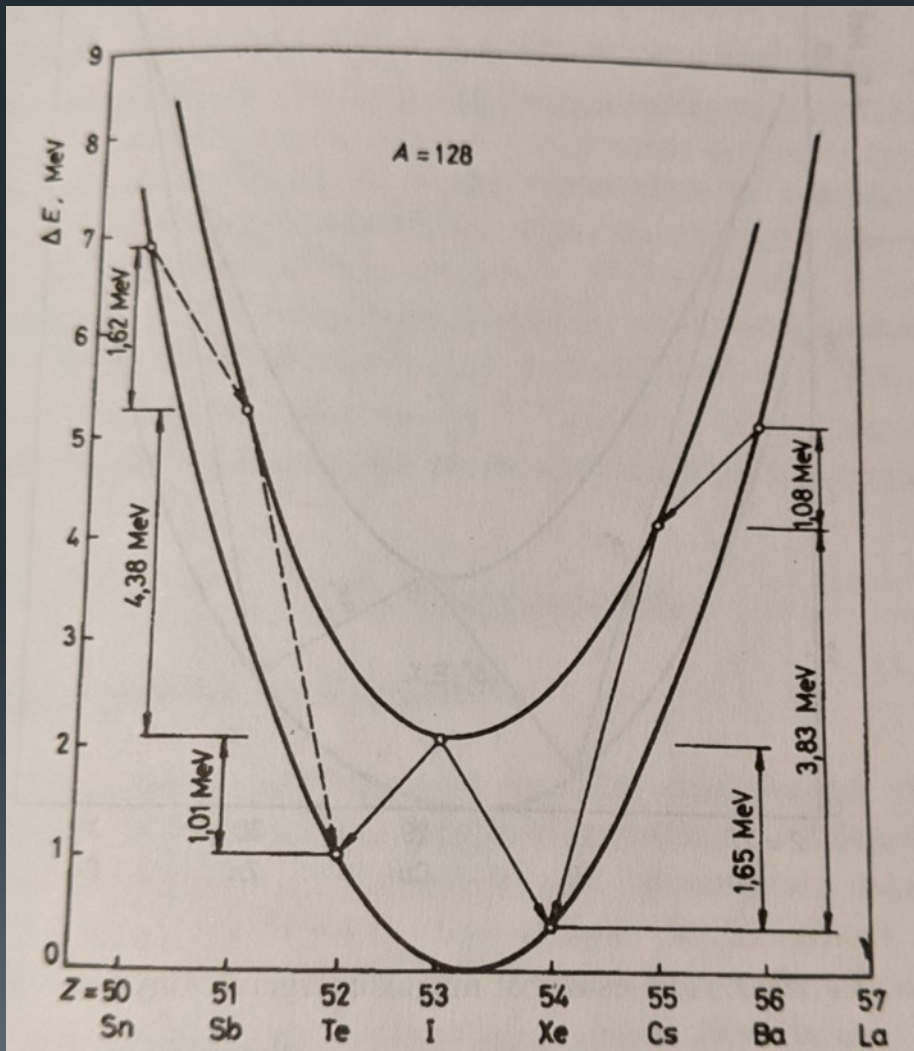
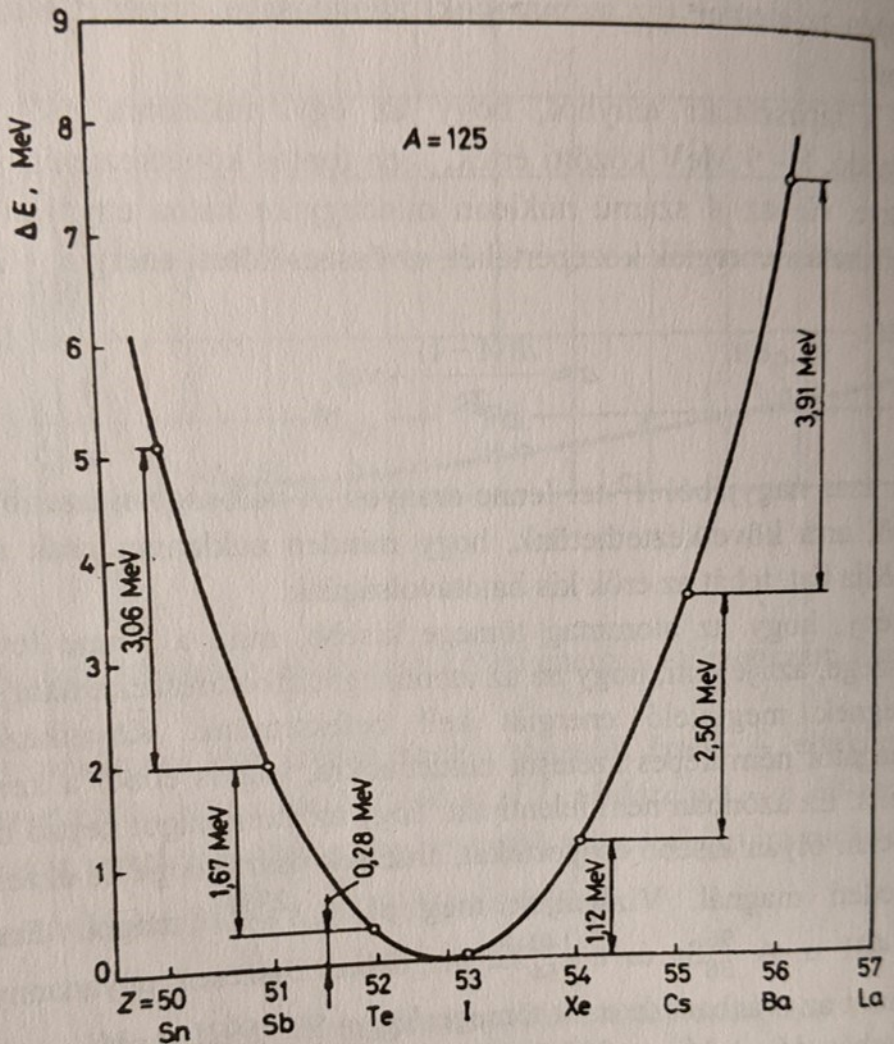
$$\Delta m = m_A - (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - \text{tömegdefektus}$$

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 - \text{kötési energia}$$

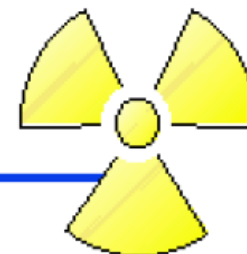
Neutron-proton arány stabil magokban a rendszer szám függvényében



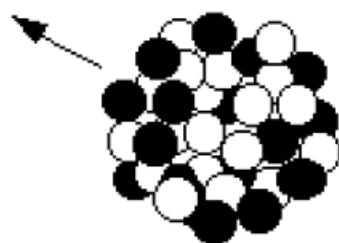
Izobár magok energiája a rendszám függvényében



Béta sugárzás



^{40}Ca



^{40}K

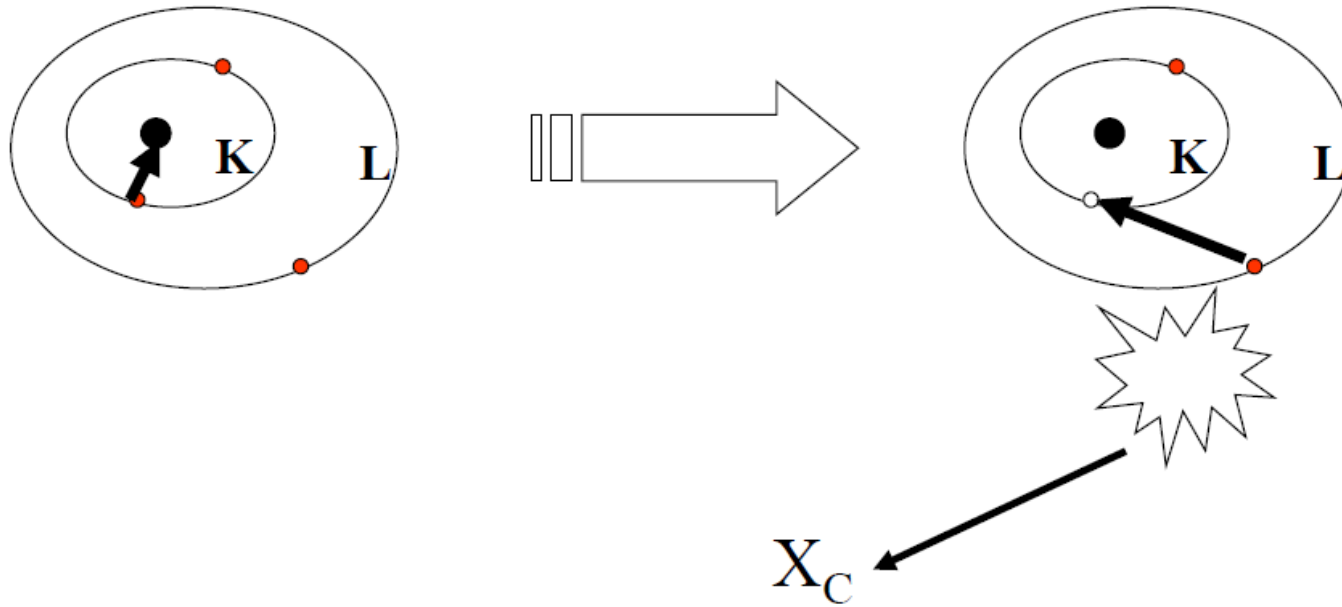
$^0_0\nu$

Antineutrino

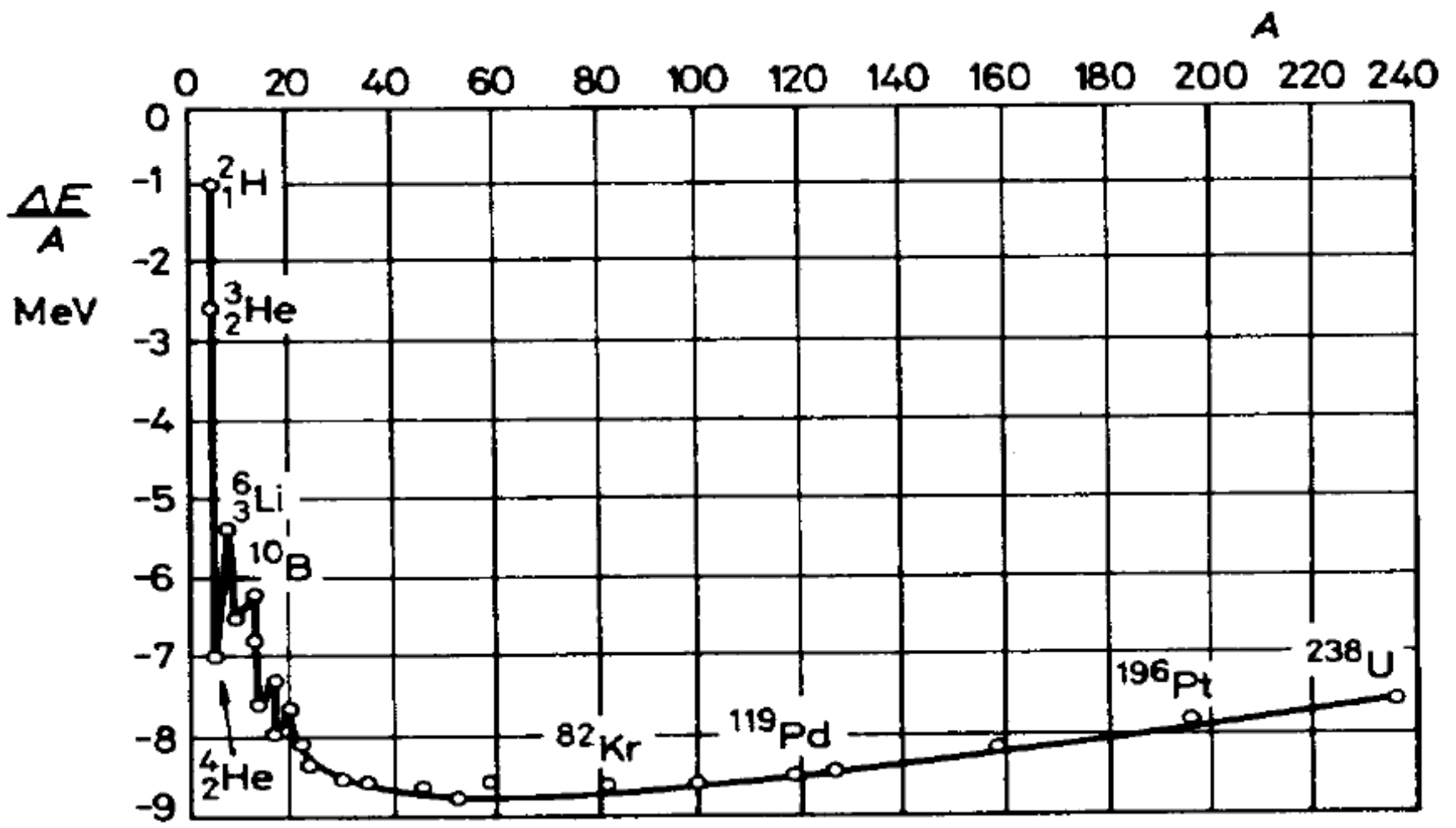
$^0_{-1}\beta^-$

Béta negatív részecske (elektron)

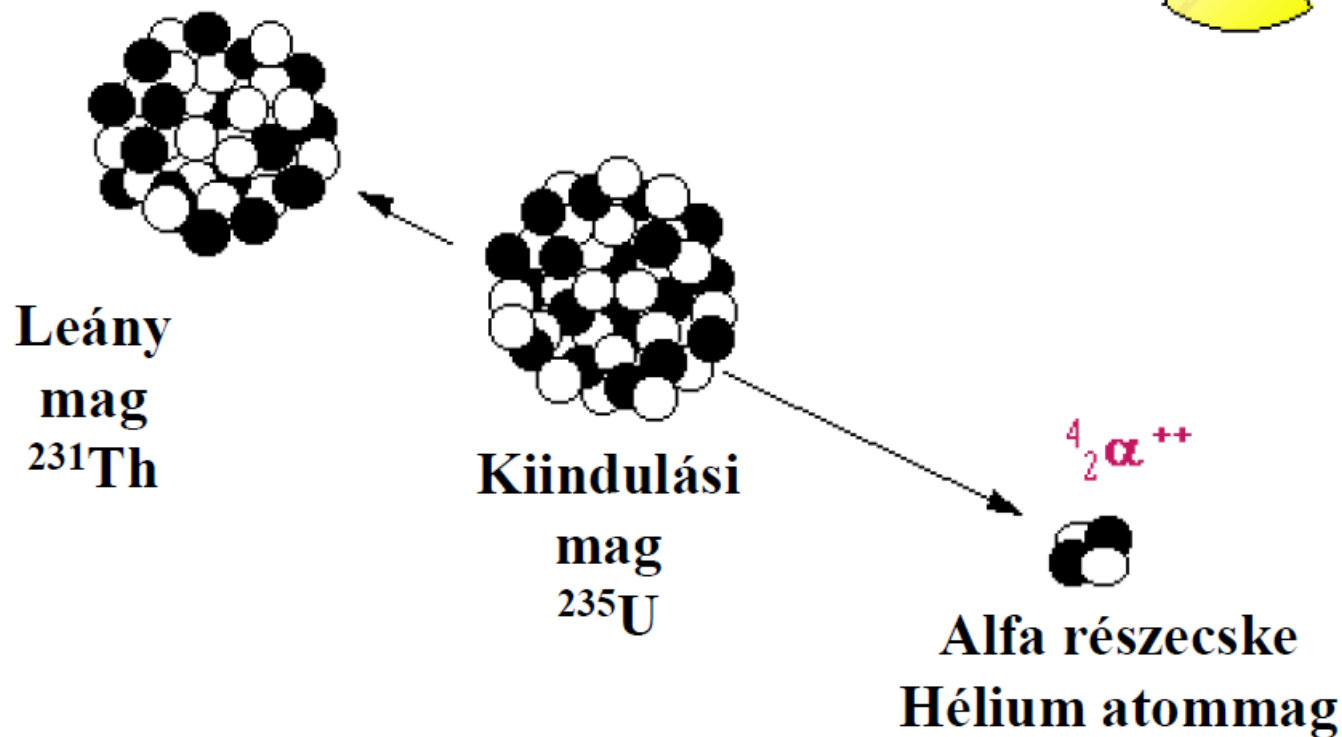
Elektron befogás



Az egy nukleonra jutó átlagos kötési energia a tömegszám függvényében



Alfa Sugárzás



Neutron sugárzás

Forrásai:

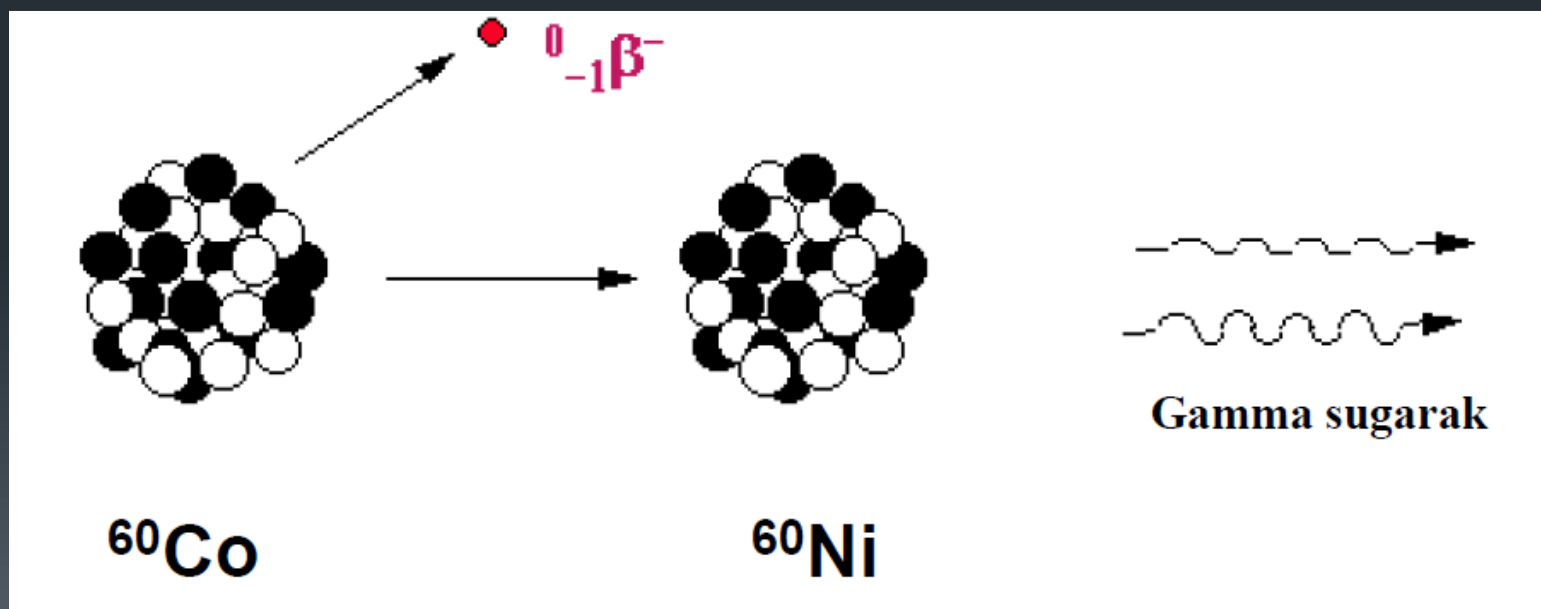
- spontán neutronbomlás (^{137}Xe)--> reaktormérgek
- maghasadás (spontán, atomreaktorok)
- (α ,n) magreakciók (hordozható neutronforrások)

Neutrínó sugárzások

Forrásai:

- radioaktív bomlások
- kozmikus (nap)

Kísérő gamma sugárzás

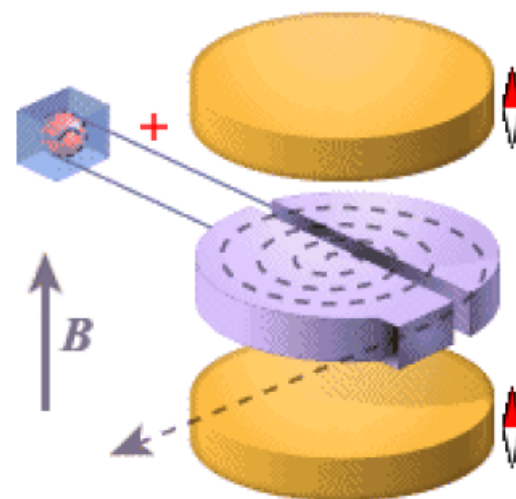
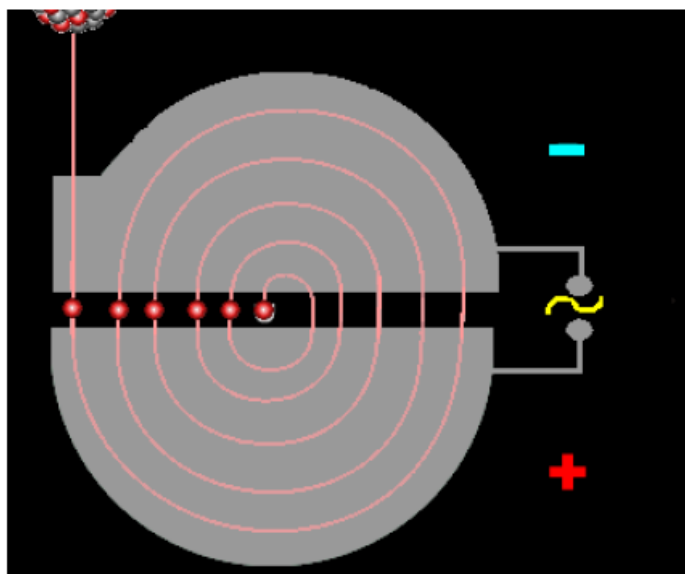


Töltött részecske sugárzások

Lineáris gyorsító



Ciklotron



Röntgensugárzás

1895 W.C. Röntgen német fizikus:
légritkított kisülési csövek vizsgálata közben fedezte fel.

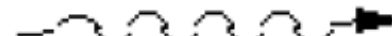
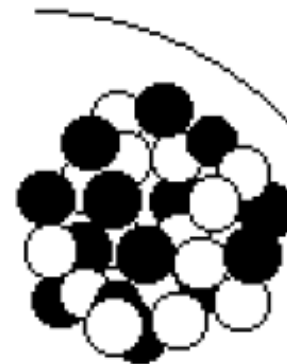
- Karakterisztikus (elem analitika)
- Fékezési (diagnosztika)

Fékezési Röntgensugárzás keletkezése

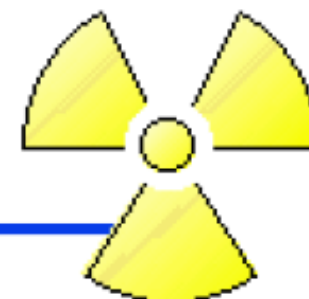
elektron



Cél atommag
W, Cu, Pb

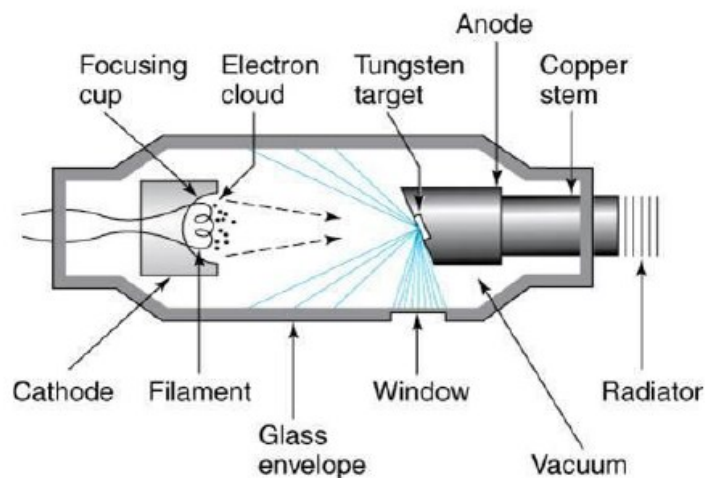


X-sugárzás

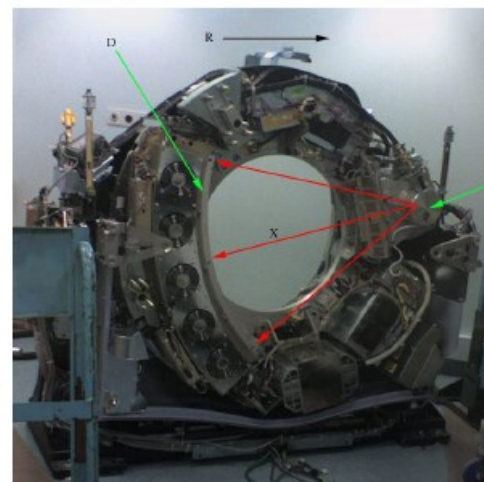


Röntgen készülékek

Fogorvosi



CT – Computer Tomography



Szinkrotronsugárzás

- relativisztikus sebességű könnyű elemi részecskék (elektronok, pozitronok) gyorsulásakor (fékezésekor) keletkezik
- Fluxusa 10^6 - 10^{12} szerese a röntgensővekének
(spektrális fényesség: megadott energiatartományú fotonok száma /s /vertikális szög /horizontális szög /forrás területe)



Synchrotron SOLAIL

Szinkrotronsugárzás tulajdonságai

- Nagy intenzitás
- Rövid hullámhosszú fotonok melyek behatolnak az anyagba, és kölcsönhatnak az atomokkal
- Széles spektrális tartomány folytonos energiaeoszlással, monoenergetikus nyalábok széles energiatartományban)
- Magas polarizációfok az elektronpálya síkjában, amely nagyon fontos a röntgenfluoreszcenciás kísérleteknél a háttér redukciója miatt
- A röntgensugarak rövid impulzusok formájában emittálódnak, amelyek 1 ns-nál is rövidebbek, és az impulzusok közötti idő 20 ns vagy ennél is több
- Természetes kollimáció, a röntgensugarak a teljes szögtartományban emittálódnak horizontális irányban, de függőleges irányban jól kollimáltak.

Elektromágneses sugárzások

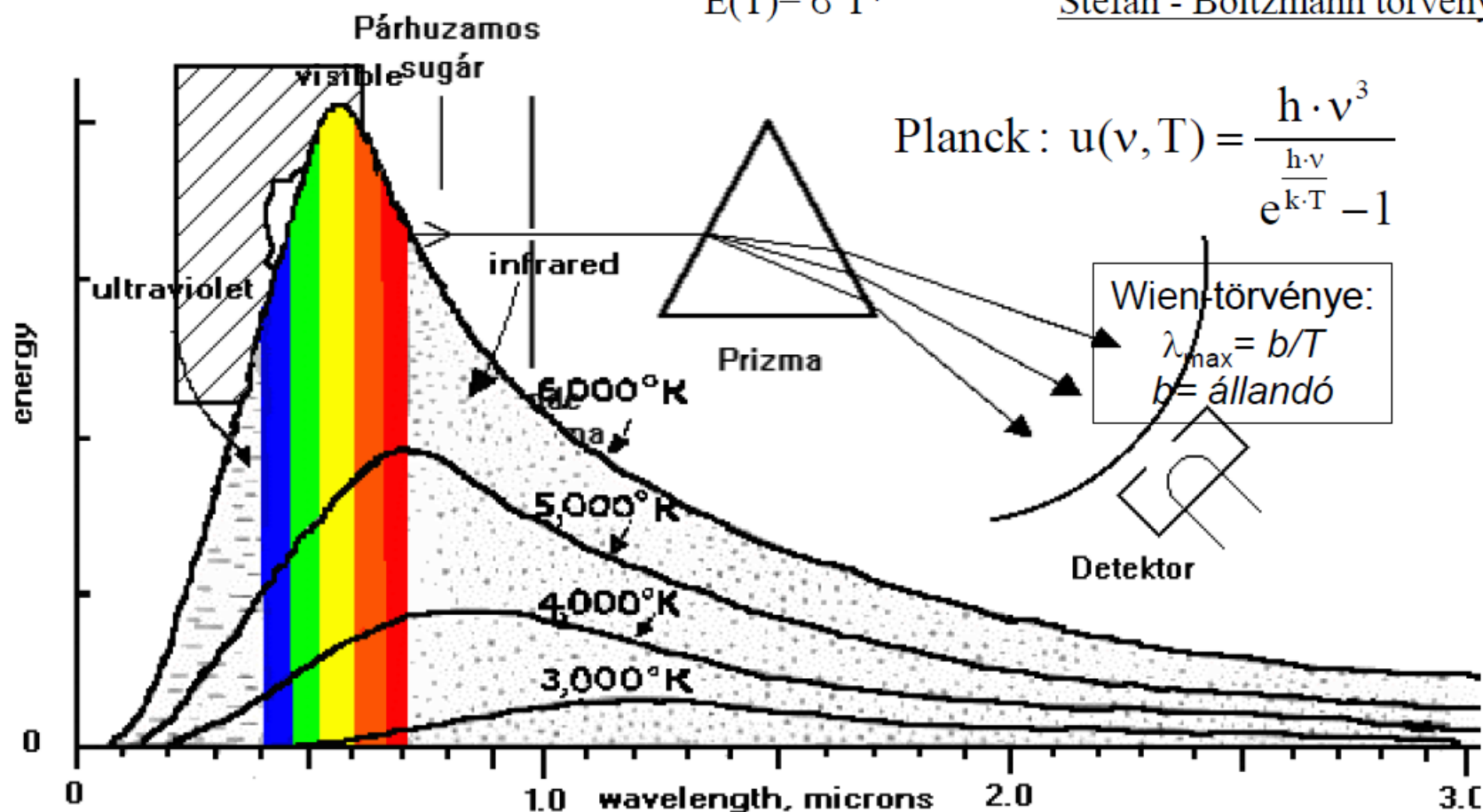
Frekvencia [Hz]	Hullámhossz	Sugárzás típusa	Sugárzás forrása	Foton energia
$3 \cdot 10^{20}$	1 pm	gamma	Radioaktív magok	1.24 MeV
$3 \cdot 10^{17}$	1 nm	röntgen	elektron fékeződés, belső héjak gerjesztése	1.24 keV
	100 nm	ibolyán túli (UV)	külső héj ionizációja	~ 10 eV
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>				
Nem-ionizáló		Látható (VIS) 380-750 nm		
		vörösén inneni (IR) 750 nm - 1 mm	molekula rezgések	
300 GHz	1 mm		molekula rezgések és forgások	1.24 meV
30 GHz		mikrohullámok		
	1 m			1.24 μ eV
10 MHz		rádióhullámok	elektromos rezgőkörök	
300 kHz	1 km			1.24 neV

Fekete test hőmérsékleti sugárzása

Kirchoff: $e(\lambda, T)/a(\lambda, T) = \text{anyagfüggetlen}$

$$E(T) = \sigma T^4$$

Stefan - Boltzmann törvény



Alapvető kölcsönhatások

Kölcsönhatás típusa	Erőhordozó	Relatív erősség	Időtartam
erős	gluon	1	10^{-23}
elektromágneses	foton	10^{-2}	10^{-20} - 10^{-11}
gyenge	bozon	10^{-5}	10^{-10} - 10^{-6}
gravitációs	graviton	10^{-40}	-

Bomlástörvény



1. *Madas Balázs*: A sugárzások csoportosítása: ionizáló és nemionizáló sugárzások; részecskesugárzás és elektromágneses sugárzások; a részecskék és sugárzások jellemzésére szolgáló mennyiségek; kölcsönhatások rendszerezése; a kölcsönhatás mechanizmusát befolyásoló mennyiségek; fizikai alapösszefüggések (2 x 2 óra) – február 14., február 21.
3. *Madas Balázs*: Az elektromágneses sugárzások ionizációs kölcsönhatásai: foto-effektus, Compton-effektus, és párképzés. Sugárzás és élő anyag kölcsönhatása – február 28.
4. *Rácz Adél*: Az anyag és az elektronsugárzás kölcsönhatásain alapuló anyagvizsgálati módszerek áttekintése (Elektron spektroszkópia (Auger, XPS) és mikroszkópia (SEM, TEM)) – március 6.
5. *Szentmiklósi László*: A neutron. Tulajdonságai, csoportosítása. Neutronforrások – március 13.
6. *Fábián Margit, Len Adél*: A neutron kölcsönhatásai: rugalmas és rugalmatlan szóródás – március 20.
7. *Osán János*: Magreakciók fotonokkal; magrezonancia-abszorpció (Mössbauer effektus). A tárgyalt anyag - elektromágneses sugárzás kölcsönhatásokon alapuló anyagvizsgálati módszerek áttekintése – március 27., **zh**
8. *Rácz Adél*: Ion-szilárdtest kölcsönhatások: ionimplantáció, ionporladás, ionkeverés; anyagtudományi alkalmazások – április 3.
9. *Klausz Milán*: A neutronbefogás, neutron magreakciók. Maghasadás és spalláció – április 24.
10. *Tóth Tünde*: A nukleáris sugárzások alkalmazása az anyagtudományban (Sugárhatáskémia) – május 8.
11. *Hózer Zoltán*: Az atomerőművi fűtőelemekben végbemenő változások a kiégés során – május 15., **zh**
12. Új eredmények, hallgatói beszámolók – május 22.
13. *Madas Balázs*: A hőmérsékleti sugárzás. Az elektromágneses spektrum; az elektromágneses sugárzások nem-ionizációs kölcsönhatásai, a Rayleigh- és a Thomson-féle szórás – külön előadás nem lesz
14. *Madas Balázs, Szigeti Krisztián*: Látogatás a Semmelweis Egyetem Nanobiotechnológiai és In Vivo Képpalkotó Centrumába – más időpontot egyeztetünk a hallgatókkal

A sugárzások és az anyag fizikai kölcsönhatásai

A kölcsönhatásban résztvevő partner

Mechanizmus

1.	Atommag	a.,	Elnyelődés (abszorpció) s: $\Delta I, \Delta E$; a: $E_{\text{kin}} + E^*$
2.	Az atommag erőtere	b.,	Koherens szórás (nincs energia átadás) s: ΔI
3.	Elektron (szabad, kötött)		
4.	Elektromos erőter	c.,	Inkoherens szórás s: $\Delta I, \Delta E$ (van energiaátadás) --> rugalmas, a: E_{kin} (nincs gerjesztés) --> rugalmatlan a: $E_{\text{kin}} + E^*$ (gerjesztés is van)
5.	Molekulák		
6.	Makroszkopikus rendszerek		

1,2 abc: magreakciók

3,4 abc: ionizáló sugárzások kcshsai

5,6 abc: nem ionizáló sugárzások kcshsai

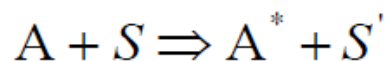
Sugárzások osztályozása

1. Magaktív töltött részecskék (p, d,t, alfa: $m_0 > m_e$)
2. Magidegen töltött részecskék (e^+ , e^-)
3. Töltés nélküli (n: $m_0 > 0$)
4. Töltés és nyugalmi tömeg nélküli (elektromágneses sugárzások)

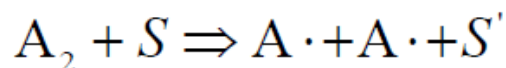
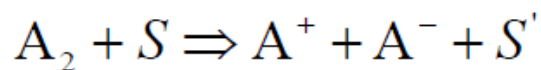
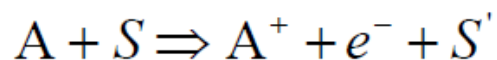
Ionizáló sugárzások kölcsönhatása az anyaggal

A kölcsönhatás lehet:

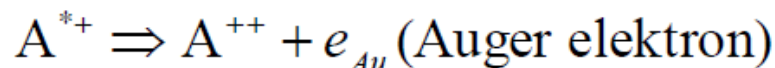
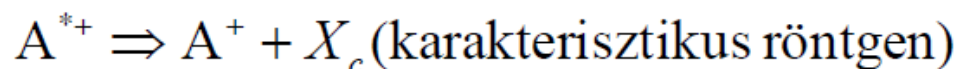
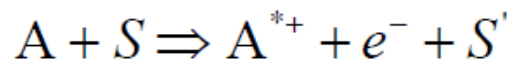
1. Semleges gerjesztés :



2. Külső ionizáció:



3. Belső ionizáció :

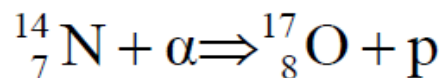


4. Fékeződés :

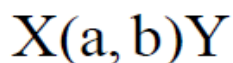
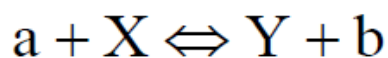
Fékezési röntgensugárzás

Magreakciók

RUTHERFORD 1919



általában :



Megmaradási elvek:

- Nukleonok száma
- Elektromos töltés
- Energiamegmaradás
- Impulzusnyomaték
- Impulzus
- Spin
- Paritás

Energiamegmaradás

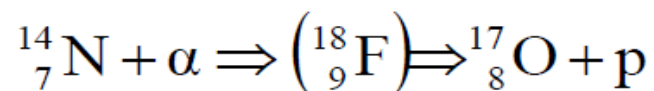
$$E_a + E_X + Q \equiv E_Y + E_b$$

$E = E_{\text{kin}} + mc^2$, magreakciók során felszabaduló energia: Q

Reakció	Q(MeV)
(n, γ), (p, γ)	8 \pm 2
(n,p), (p,n)	0 \pm 2
(n, α), (p, α)	4 \pm 2
(γ ,n), (γ ,p)	-8 \pm 2
Urán hasadás	200
Termonukleáris reakció: Pl.: ${}^3\text{H}(\text{d},\text{n}){}^4\text{He}$	17.6
Kémiai reakció: $\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	3*10 ⁻⁶ / molekula

Magreakciók mechanizmusa

Bohr: az α részecske beépülésével egy gerjesztett átmeneti mag jön létre



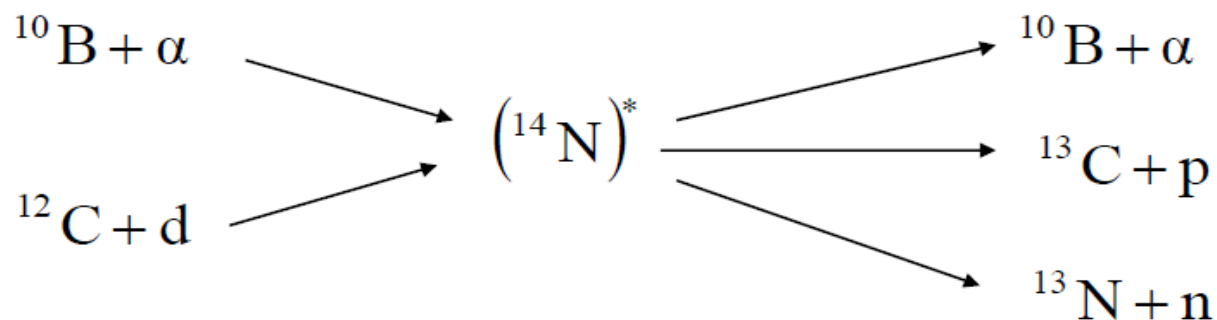
A gerjesztési energia(E^*) két részből tevődik össze:

$$E^* = E_k + E_a \text{ ahol}$$

E_k a beépült részecske kötési energiája

E_a az a részecske kinetikus energiája

A reakció termékei az átmeneti mag összetételétől és energiájától függnek



HATÁSKERESZTMETSZET

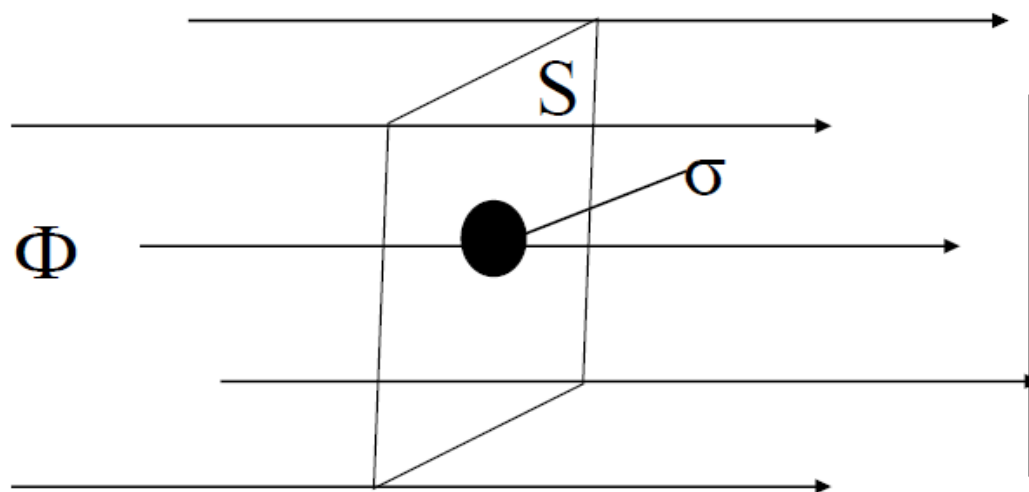
A magreakciók sebessége (R):

$$R \equiv \sigma \cdot \Phi \cdot N_A, \text{ ahol}$$

σ - hatáskeresztmetszet

Φ - beeső részecskefluxus

N_A - a célmagok száma egységnyi felületen

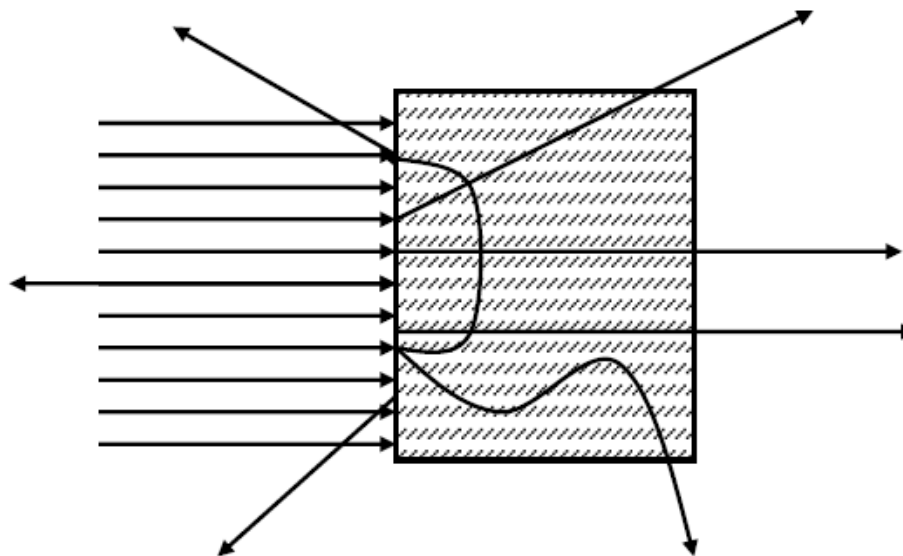


σ :

- effektív felületként képzelhető el, amit ha eltalál a bombázó részecske, a reakció végbemegy

- egysége: 1 barn = 10^{-28} m^2

Gamma-sugárzás elnyelődése



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

ahol :

μ' - lineáris abszorpciós együttható

x - vastagság

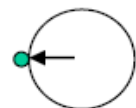
Magreakciók töltött részecskesugárással

Coulomb gát:

$$E_C = \frac{Z_a \cdot Z_X \cdot e^2}{R_a + R_X} \cdot 0,624 \cdot 10^6 (\text{MeV})$$

$$R = 1,5 \cdot 10^{-13} \cdot A^{1/3} \text{cm}$$

a X



$R_a + R_X$

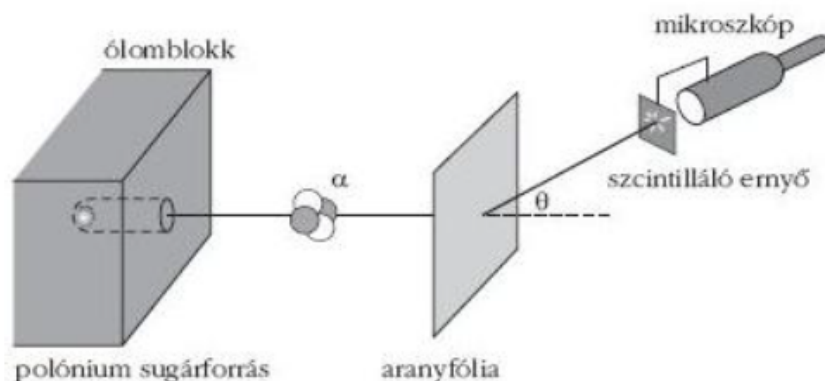
Protonoknál: 1-12 MeV

Alfa: 2-24 MeV

alagúteffektus

Magreakciók alfa-sugárzással

Rugalmas szóródás – Rutherford



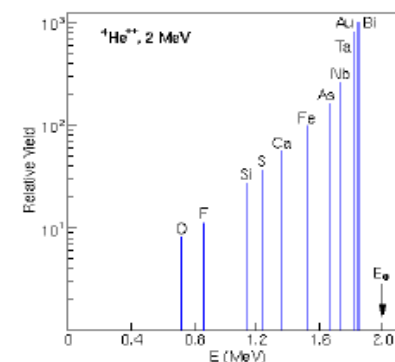
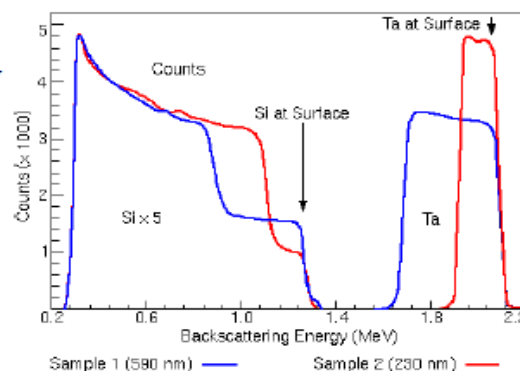
Szórási képlete:

$$\frac{d\omega}{d\Omega} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_0} \right)^2 \frac{1}{(\sin \theta/2)^4},$$

A Θ szögben szórt részecskék E energiája
E/E₀ - tömegszám függés!

$$E = E_0 \cdot \left(\frac{\frac{4}{A} \cdot \cos \Theta + \sqrt{1 + \left(\frac{4}{A}\right)^2 \cdot \sin^2 \Theta}}{1 + \frac{4}{A}} \right)^2$$

Felület analitikai módszer:
Rutherford Backscattering Spectroscopy
(RBS)



Magreakciók egyéb töltött részecskékkel

p, d - sugárzás

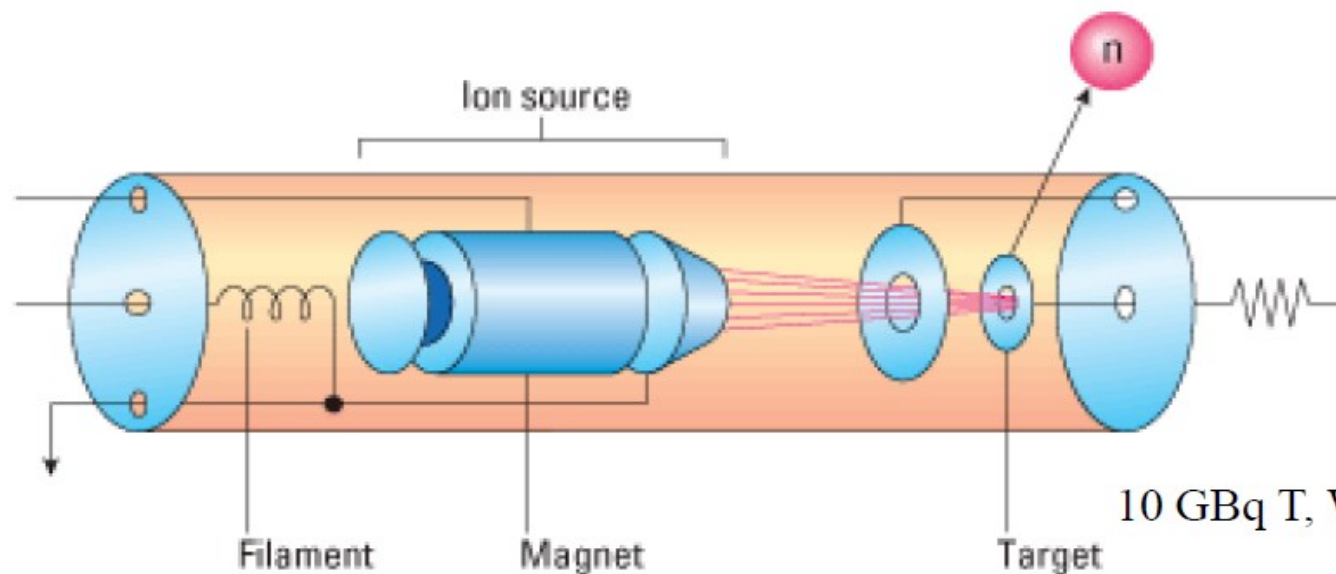


Protondús (neutronhiányos) magok előállítása:

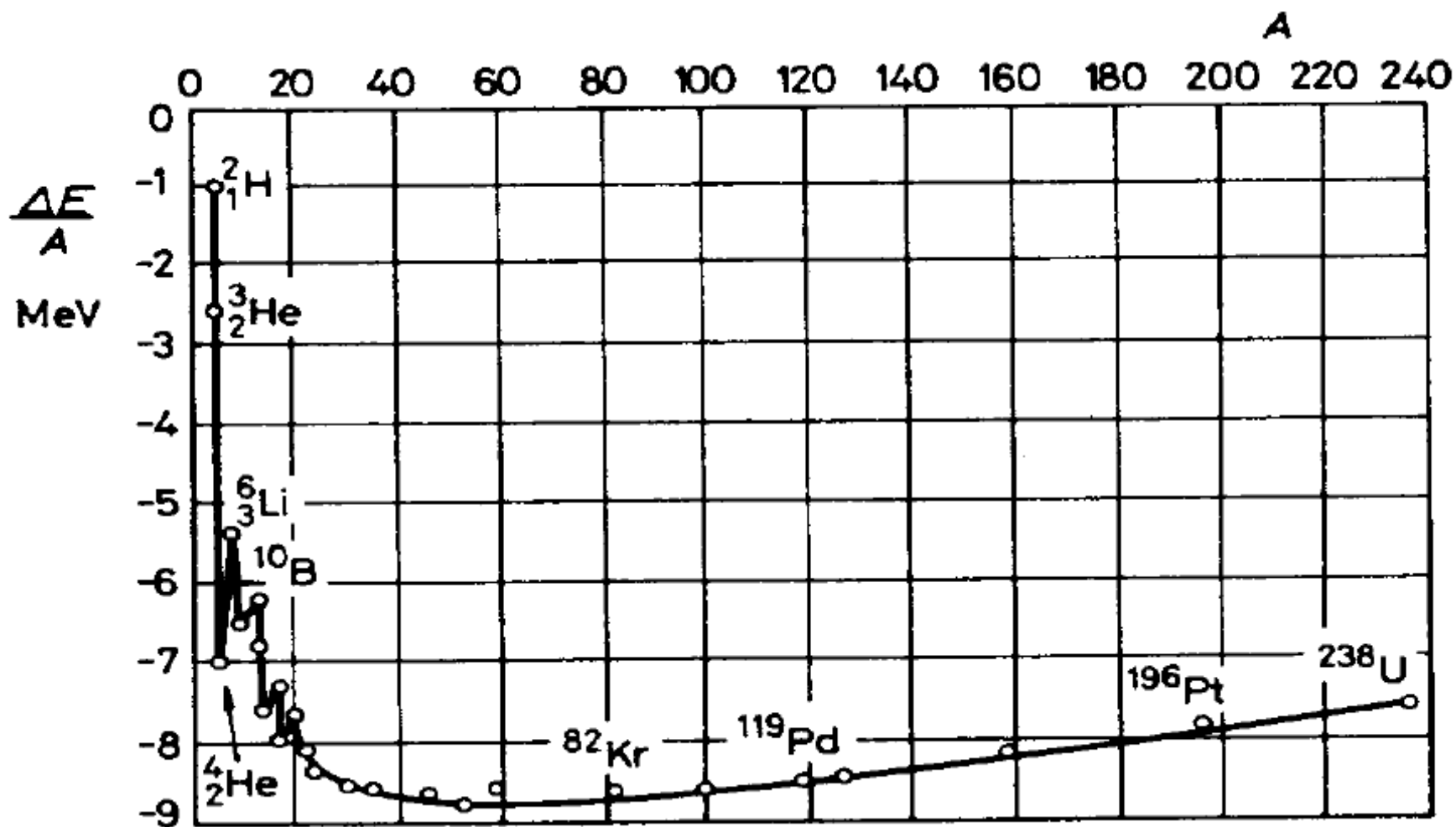
Gyakorlati jelentőség: PET-CT; PET-MR vizsgálatok

Izotóp	^{15}O	^{11}C	^{13}N	$^{18}\text{F} (\text{F}^-)$	$^{18}\text{F} (\text{F}_2)$
$T_{1/2}$ (perc)	2.05	20.39	9.96	109.8	109.8
Magreakció	$^{14}\text{N}(\text{d},\text{n})^{15}\text{O}$	$^{14}\text{N}(\text{p},\alpha)^{11}\text{C}$	$^{16}\text{O}(\text{p},\alpha)^{13}\text{N}$	$^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$	$^{20}\text{Ne}(\text{d},\alpha)^{18}\text{F}$
Célanyag	99 % N_2 1% O_2	N_2	(^{16}O) Víz	(^{18}O)Víz	0.33% F_2 Neon-ban
Termék	$^{15}\text{O}_2$ (gáz)	$^{11}\text{CO}_2$ / ^{11}CO (gáz)	$^{13}\text{NH}_3$ (Folyadék)	$^{18}\text{F}^-$ (Folyadék)	$^{18}\text{F}_2$ (gáz)
Előállítható Aktivitás	74 GBq (2 Ci)	111GBq (3 Ci)	15 GBq (0,4Ci)	185 GBq (5 Ci)	11GBq (0,3 Ci)

$T(d,n)^4\text{He}$ – hordozható neutronforrás

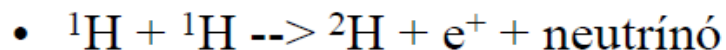


Az egy nukleonra jutó átlagos kötési energia a tömegszám függvényében

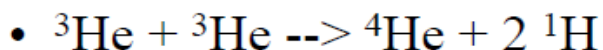
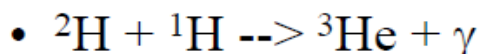


Termonukleáris reakciók

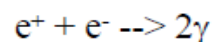
1. Proton-proton lánc - naptípusú csillagok alapvető energiaforrása



$$T_{\min} = 1 \text{ millió K}$$



$$T_{\min} = 10 \text{ millió K}$$

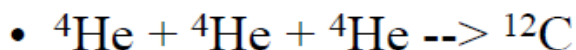


a keletkező gamma sugarak elnyelődnek a csillagok belsejében és gerjesztés útján látható tartományú fotonokká transzformálódnak. 1 gamma fotonból kb. 200 000 látható foton keletkezik.

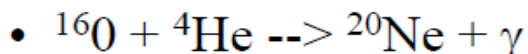
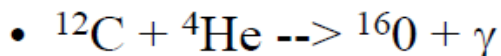
A neutrínó elhagyja a csillagot.

600 millió t H ég el másodpercenként és 596 millió t He keletkezik.

Nagy tömegű csillagokban beindul az ún. Triple-alfa folyamat:



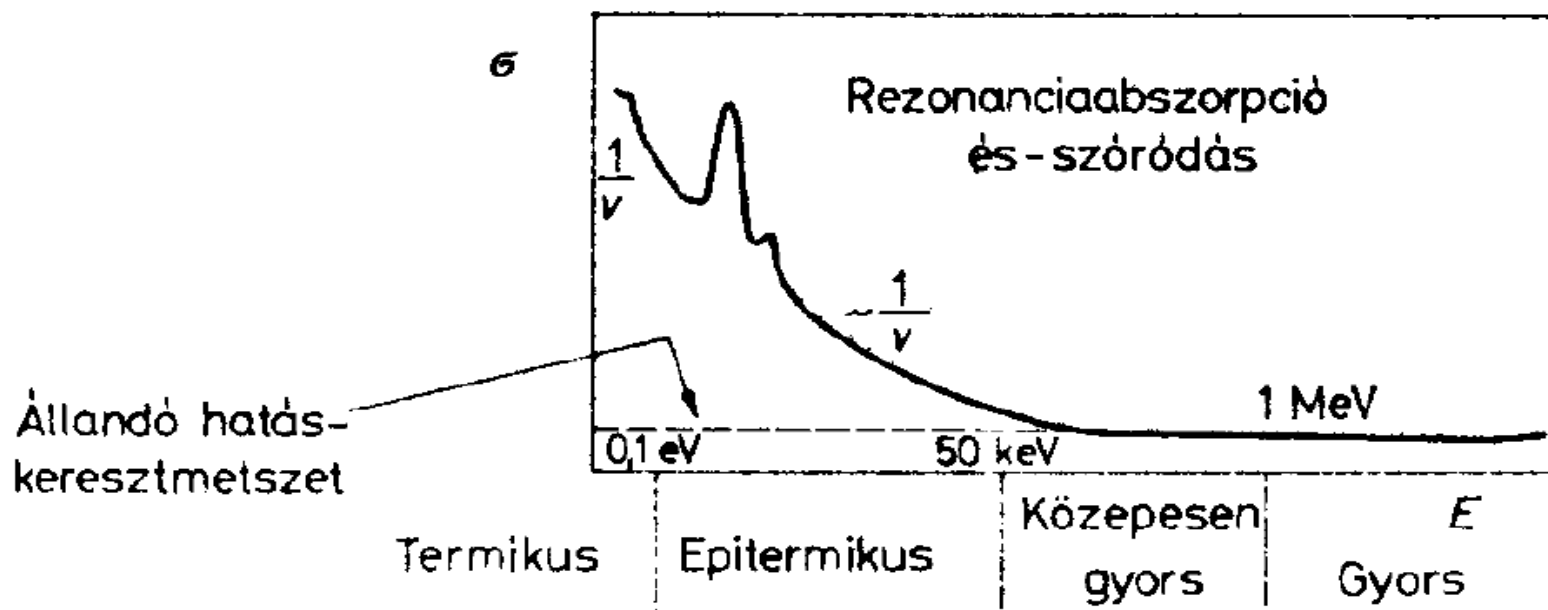
$$T_{\min} = 100 \text{ millió K}$$



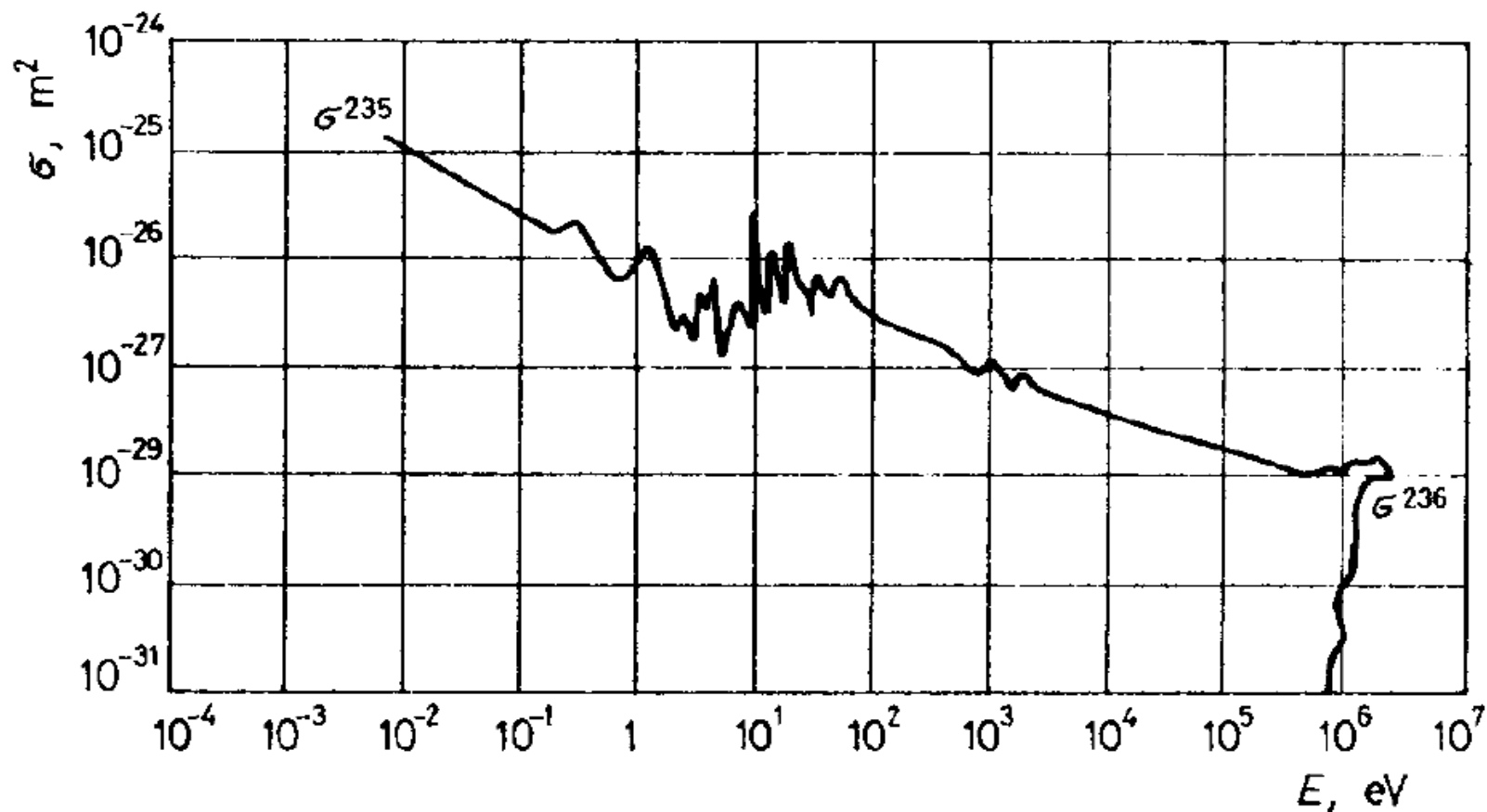
Nagyobb tömegű csillagokban ahol a hőmérséklet nagyobb, mint 500 mK nagyobb magok égése is beindul:

Neutron magreakciók

- A He kivételével minden elem
- Mindig exoterm
- A hatáskeresztmetszet erősen energia függő



^{235}U neutron befogási hatáskeresztmetszete függése a neutron energiától

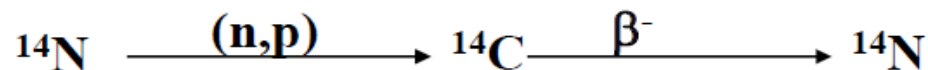


(n,γ) reakciók a leggyakoribbak.

Példa:

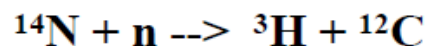
Magreakció	σ [barn]
$^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$	0.53
$^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110\text{m}}\text{Ag}$	2.2
$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	20
$^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$	40
$^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$	$6.31 \cdot 10^4$
$^{135}\text{Xe}(n,\gamma)^{136}\text{Xe}$	$2.7 \cdot 10^6$

(n,p) reakciók:



Az élő szervezetben a $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ arány kb. $1/8.3 \cdot 10^{11}$, ami 15 bomlás/perc/g szén

(n,T) reakciók:

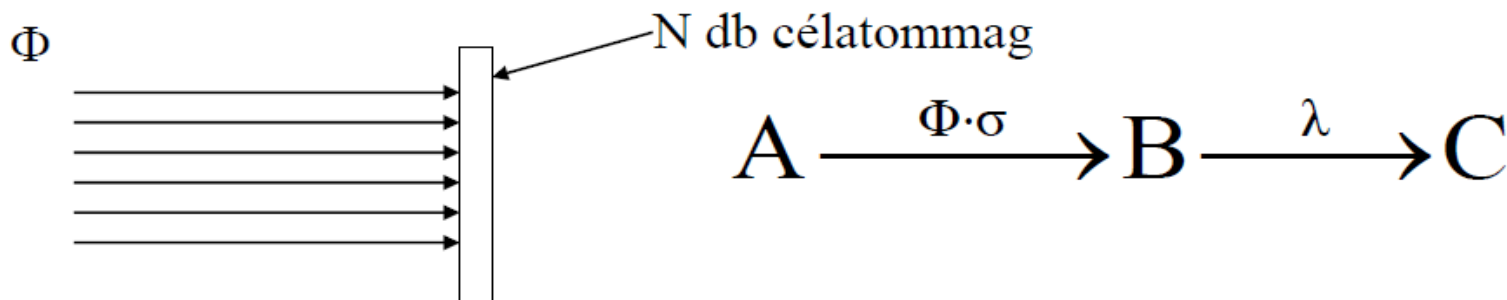


(n,α) reakciók:

Magreakció	σ [barn]
$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$	$3 \cdot 10^3$
$^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{T}$	900

Az aktiválás időtörvénye

Kérdés: hogyan adható meg egy pl. neutron abszorpcióval előállítható izotóp aktivitása a besugárzási idő függvényében?



A keletkező radioaktív B magok mennyisége (N^*) időbeli változása:

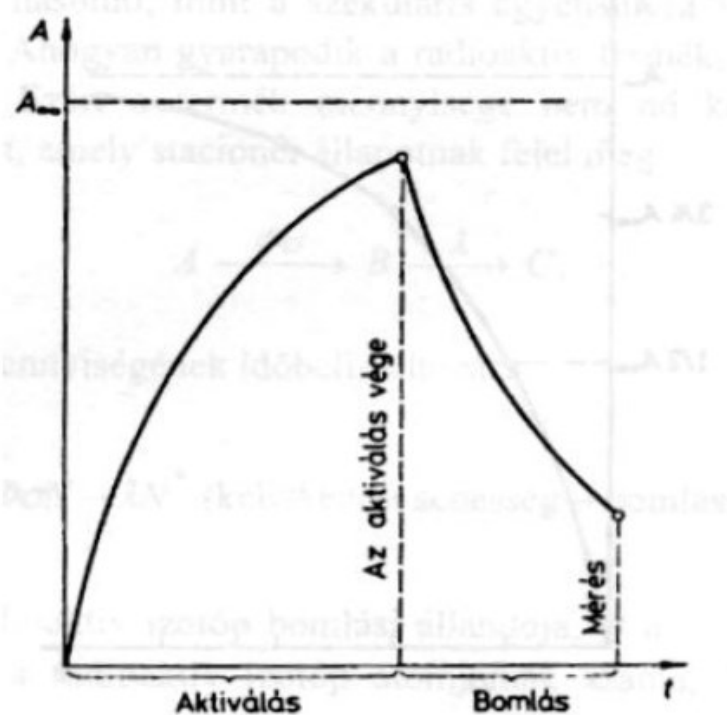
$$\frac{dN^*}{dt} = \Phi \cdot \sigma \cdot N - \lambda \cdot N^*$$

Ha $t=0$ esetben $N^*=0$, akkor:

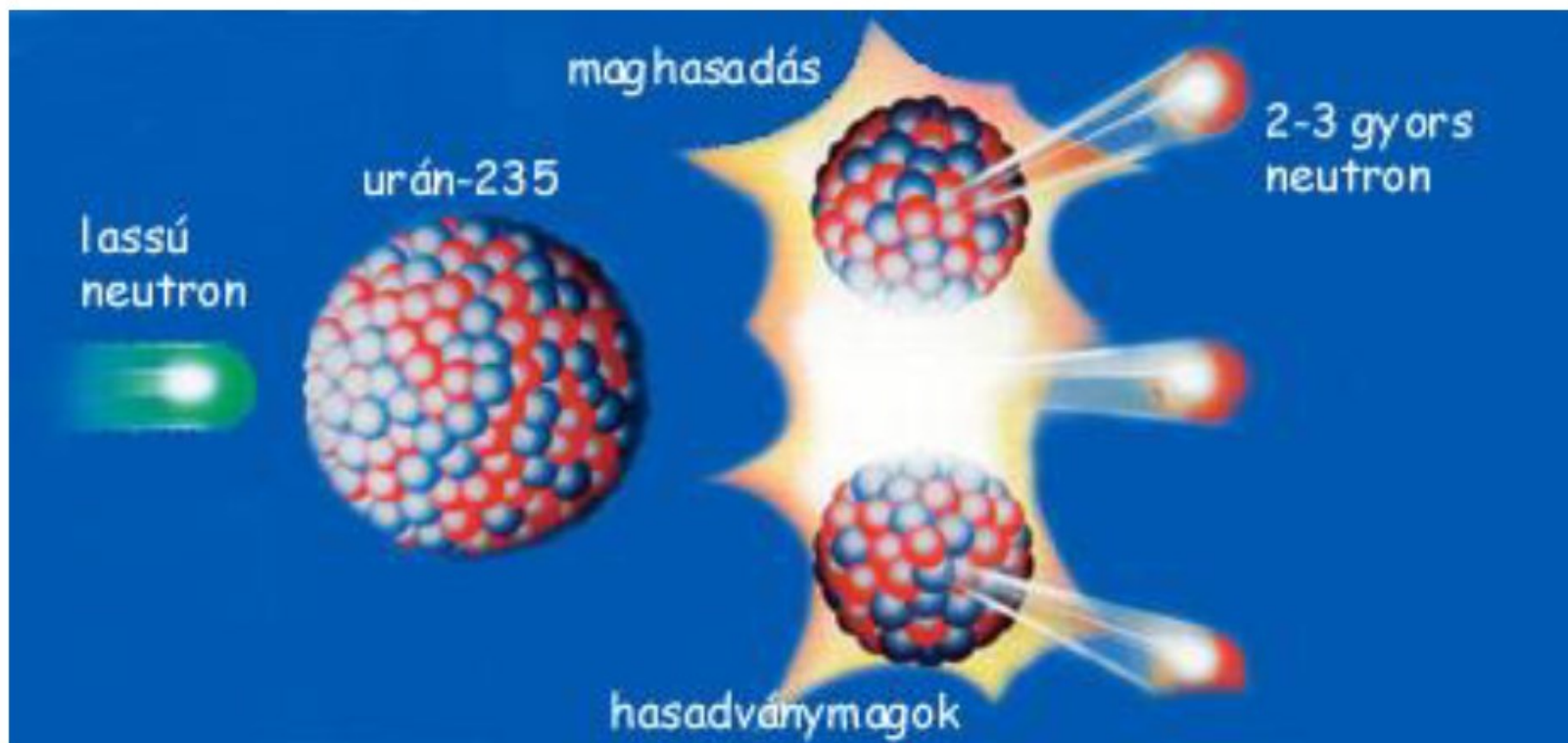
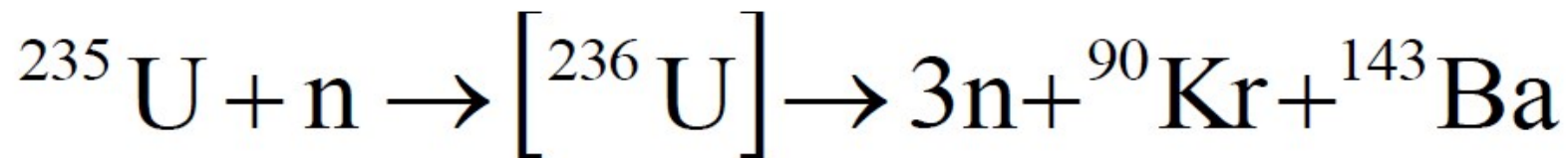
$$A = A_{\infty} \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot t)]$$

ahol

$$A_{\infty} = \Phi \cdot \sigma \cdot N$$

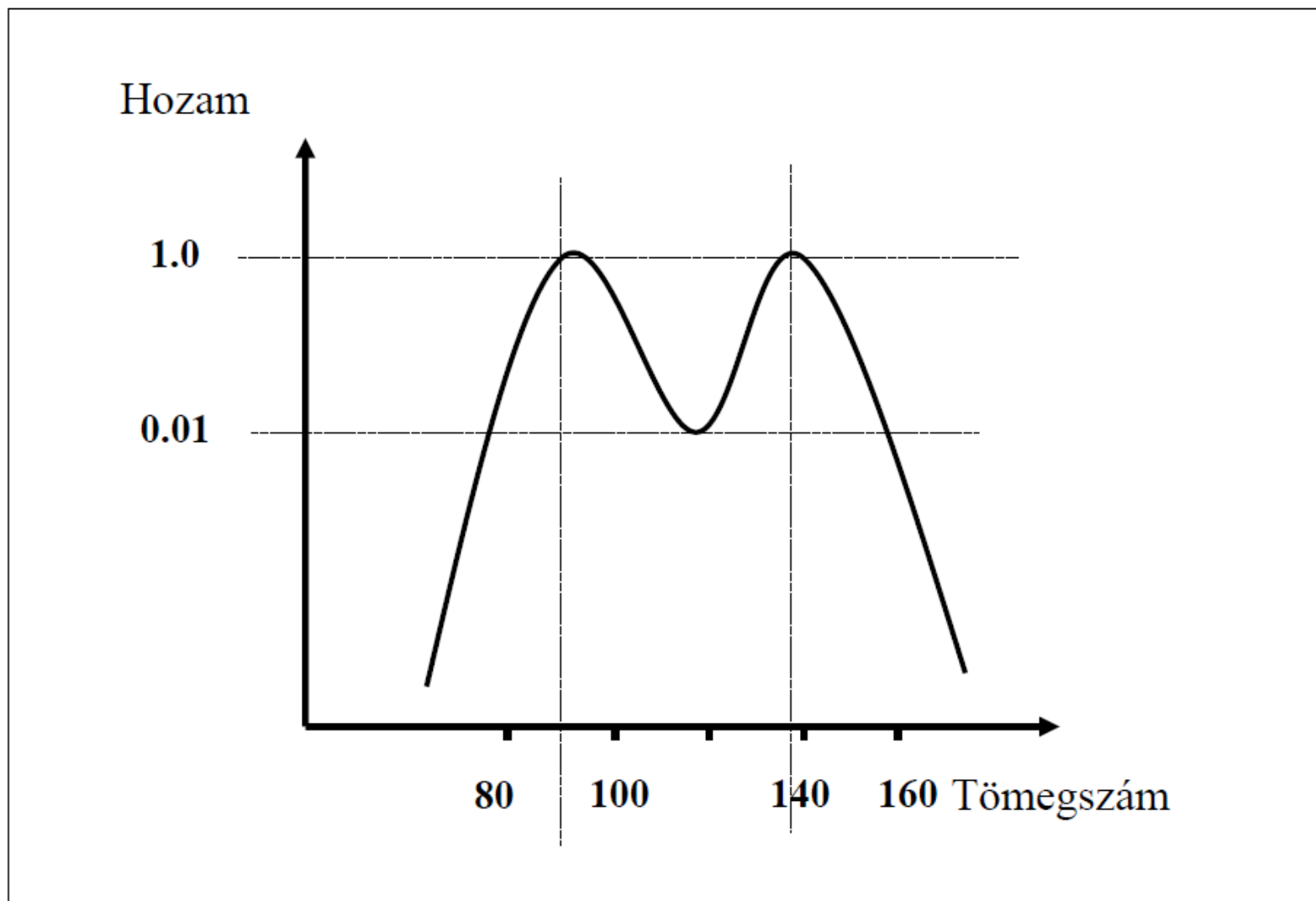


(n,f) reakciók, maghasadás (Otto Hahn):



A természetes uránnak csak 0.71%-a 235-ös izotóp, a többi 238-as, amely termikus neutronokkal nem hasítható

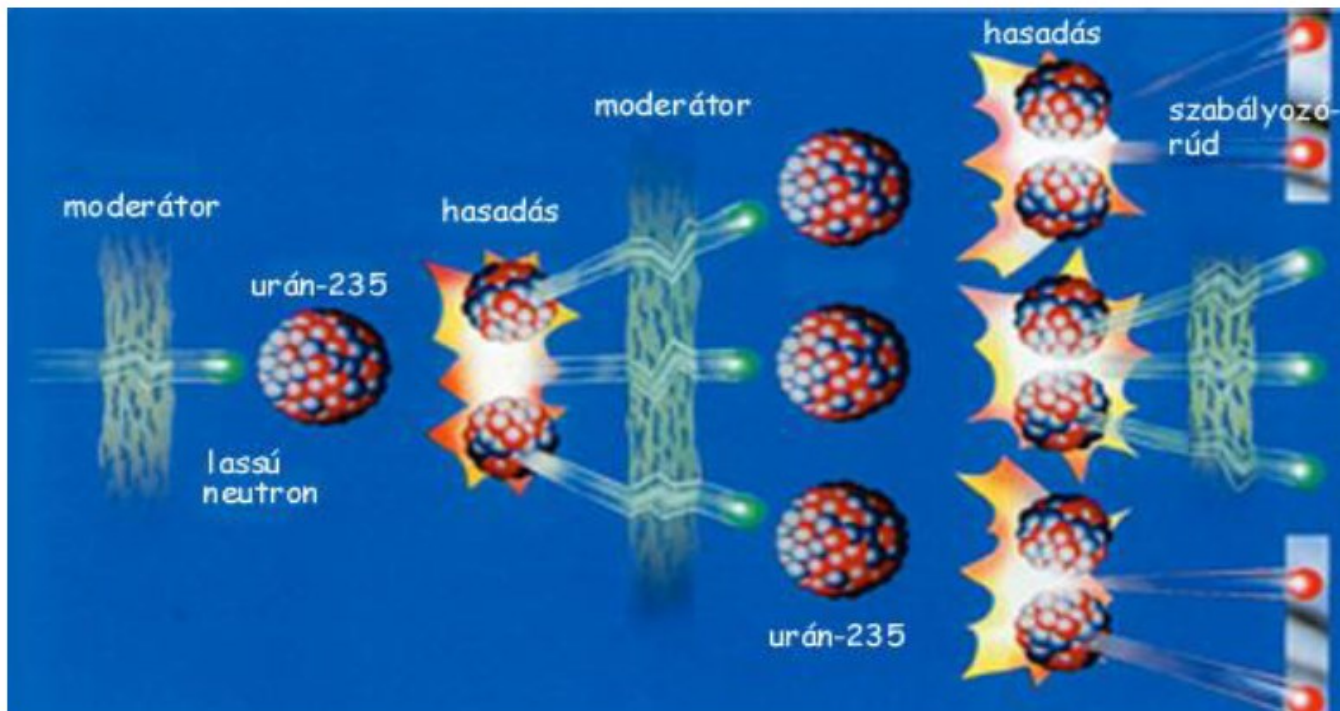
235-U hasadvány-termékei eloszlása



(n,f) reakcióra képes magok

Izotóp	Kiindulási anyag	Hatásos neutron
235-U	Természetes urán	termikus
233-U	Természetes tórium, neutron besugárzás	termikus
239-Pu	238-U neutron besugárzás	termikus
241-Pu	238-U neutron besugárzás	termikus
238-U	Természetes urán	gyors
232-Th	Természetes tórium	gyors

Láncreakció

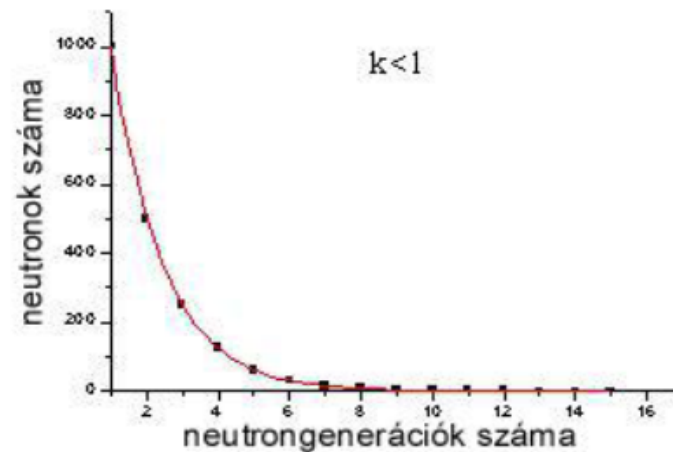
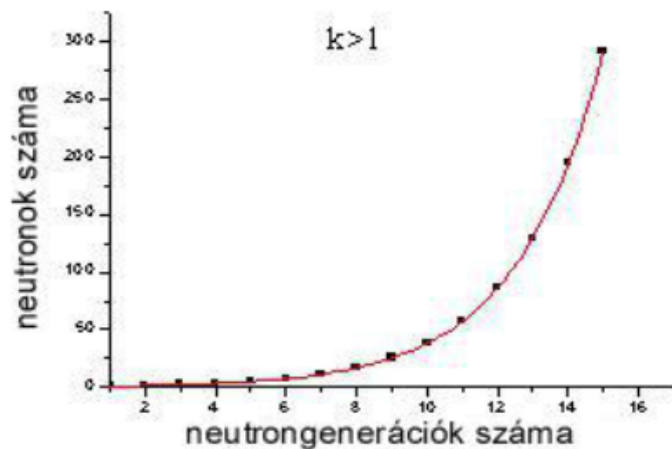


k - sokszorozási tényező: $k \equiv \frac{\text{szekunder neutronok száma}}{\text{primer neutronok száma}}$

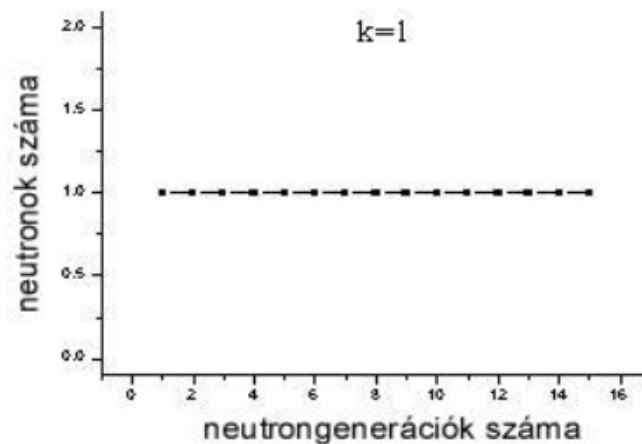
A rendszer lehet:

szuperkritikus - atombomba

szubkritikus

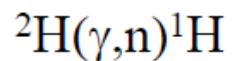


kritikus - atomreaktor



Magreakciók fotonokkal

Neutronforrás:



a D kötési energiája 2,2MeV ezért pl. ${}^{24}\text{Na}$, $E_\gamma=2,76\text{MeV}$ -al szétlőhető!