

A sugárzások és az anyag fizikai kölcsönhatásai

A kölcsönhatásban résztvevő partner

Mechanizmus

1. Atommag

2. Az atommag erőtere

3. Elektron (szabad, kötött)

4. Elektromos erőter

5. Molekulák

6. Makroszkopikus rendszerek

a., Elnyelődés (abszorpció)
s: ΔI , ΔE ; a: $E_{\text{kin}} + E^*$

b., Koherens szórás
(nincs energia átadás)
s: ΔI

c., Inkoherens szórás
s: ΔI , ΔE
(van energiaátadás)
--> rugalmas, a: E_{kin}
(nincs gerjesztés)
--> rugalmatlan
a: $E_{\text{kin}} + E^*$
(gerjesztés is van)

1,2 abc: magreakciók

3,4 abc: ionizáló sugárzások kcshsai

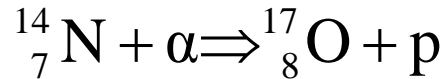
5,6 abc: nem ionizáló sugárzások kcshsai

Sugárzások osztályozása

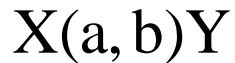
1. Magaktív töltött részecskék (p, d,t, alfa: $m_o > m_e$)
2. Magidegen töltött részecskék (e+, e-)
3. Töltés nélküli (n: $m_o > 0$)
4. Töltés és nyugalmi tömeg nélküli (elektromágneses sugárzások)

Magreakciók

RUTHERFORD 1919



általában :



Megmaradási elvek:

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

Energiamegmaradás

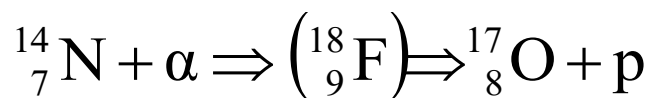
$$E_a + E_X + Q \equiv E_Y + E_b$$

$E = E_{\text{kin}} + mc^2$, 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 **a** részecske beépülésével egy gerjesztett **átmeneti mag** jön létre



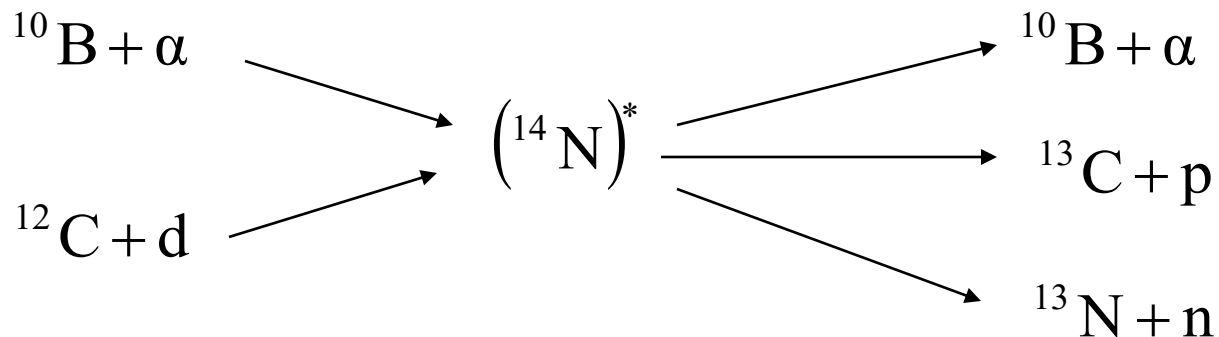
A gerjesztési energia(E^*) két részből tevődik össze:

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

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

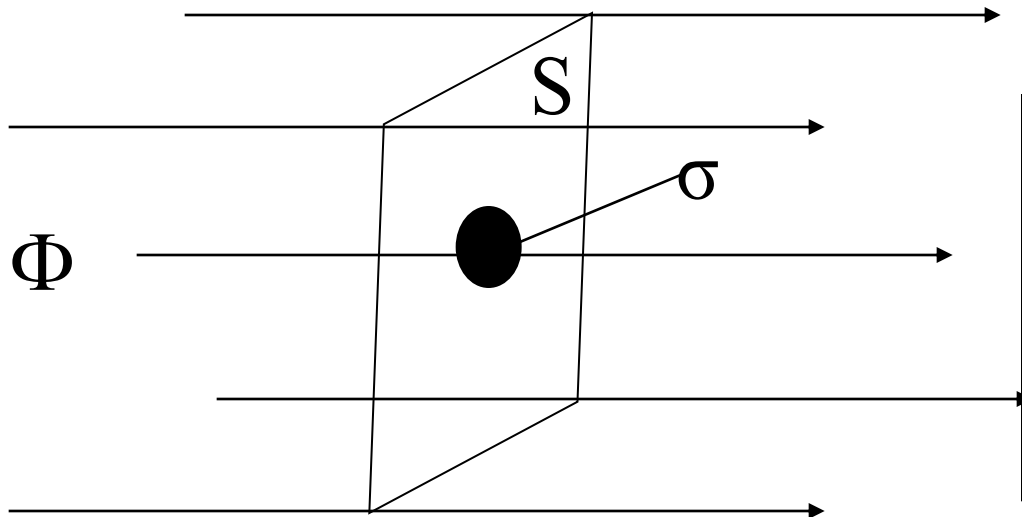
A magreakciók sebessége (R):

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

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

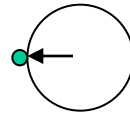
Magreakciók töltött részecskesugárzással

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



$R_a + R_X$

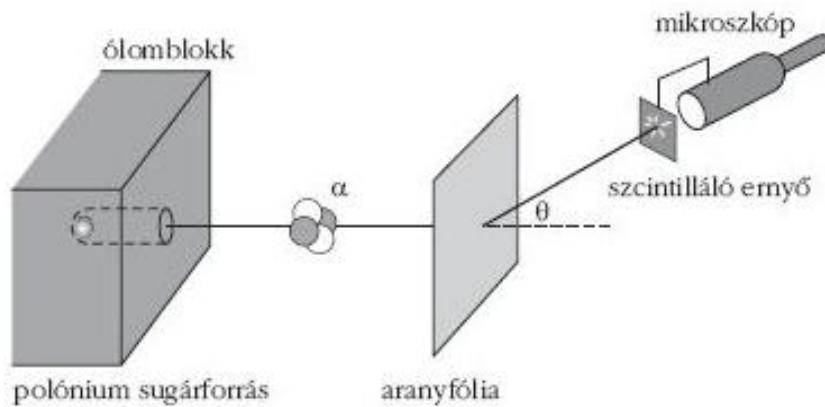
Protonoknál: 1-12 MeV

Alfa: 2-24 MeV

alagúteffektus

Magreakciók alfa-sugárzással

Rugalmas szóródás – Rutherford



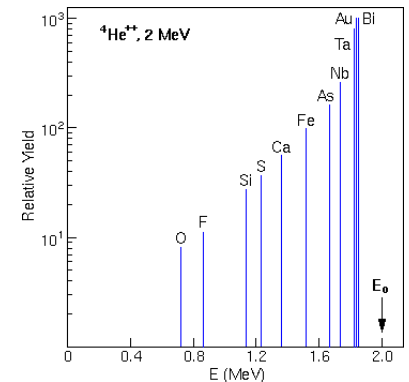
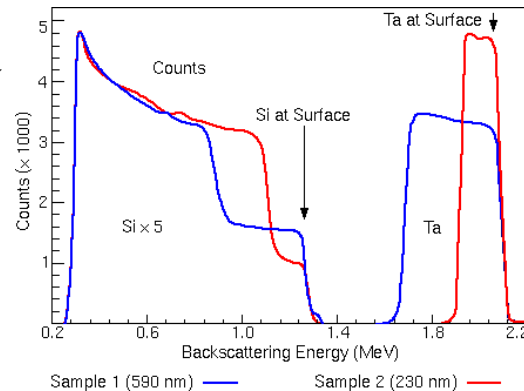
Szórási képlete:

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

A Θ szögben szórt részecskék E energiája E/E_0 - tömegszám függés!

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

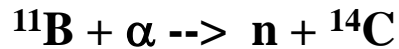
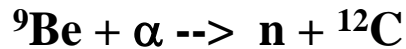
Felület analitikai módszer:
Rutherford Backscattering Spectroscopy
(RBS)



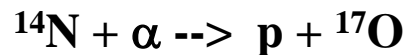
Fontosabb alfa magreakciók

α - magreakciók

(α , n) reakciók:



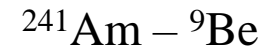
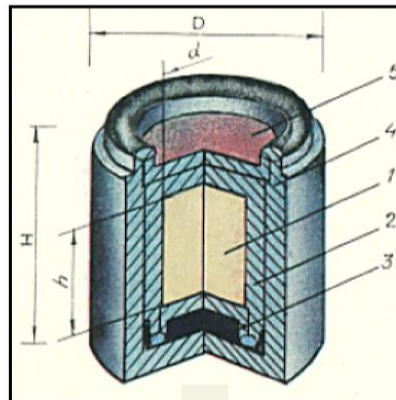
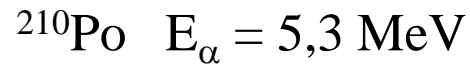
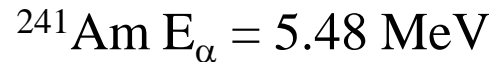
(α , p) reakciók:



Rutherford

Laboratóriumi neutron forrás.

Az alfa forrás lehet: Ra, Rn, Po, Am, Pu, stb.



$$A = 250 \text{ GBq}$$

$$\Phi_n = 1.1\text{E}+7 \text{ s}^{-1}$$

Shape: CYLINDER

Length:

Diameter/Width: up to 25 mm

Height/Thickness: up to 46 mm

Magreakciók egyéb töltött részecskékkel

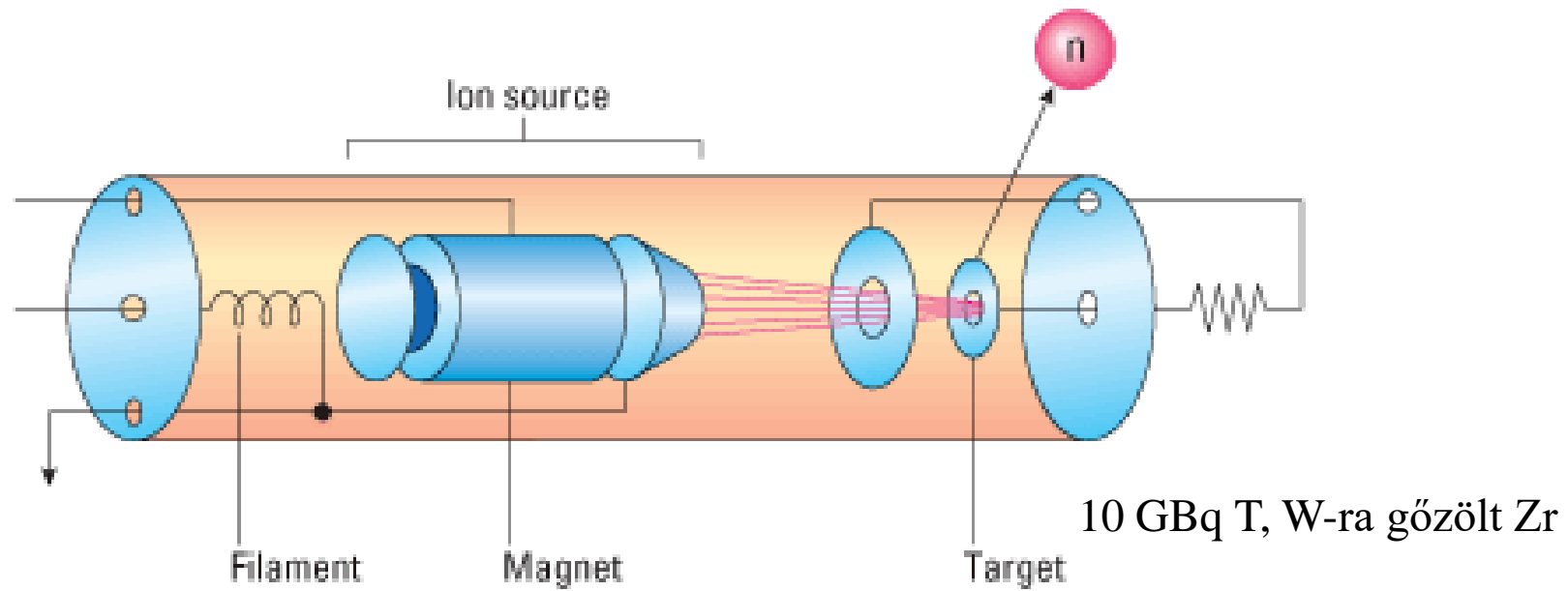
p, d - sugárzás



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)	$^{11}\text{CO}_2/^{11}\text{CO}$ (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)⁴He – hordozható neutronforrás

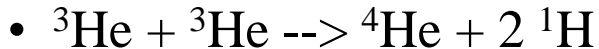
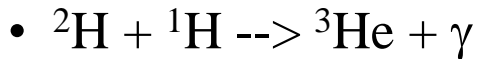


Termonukleáris reakciók

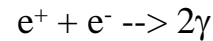
1. Proton-proton lánc - naptípusú csillagok alapvető energiaforrása



$$T_{\min} = 1 \text{ millió K}$$



$$T_{\min} = 10 \text{ millió K}$$

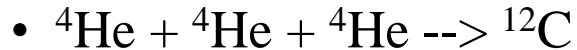


a keletkező gamma sugarak elnyelődnek a csillagok belsejében és gerjesztés útján látható tartományú fotonokká transzformálódnak. 1 gamma fotonból kb. 200 000 látható foton keletkezik.

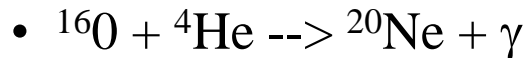
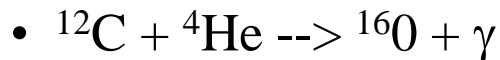
A neutrínó elhagyja a csillagot.

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:

A Nap-neutrínó probléma

Neutrínó: W. Pauli jósolta meg elméletileg, kísérletileg Reines éa Cowan mutatta ki 1956-ban.

A Napban lejátszódó folyamatokat csak közvetve tudjuk ellenőrizni.

Ez a csak a Napot elhagyó egyetlen reakciótermék, a neutrínók vizsgálatával lehetséges.

Feladat: detektáljuk a Nap p-p láncából származó neutrínókat.

1970-ben 100,000 gallon perchloroethylene -- C_2Cl_4 tartalmazó tartályban a következő reakciót figyelték:

$^{37}Cl + \text{neutrínó} \rightarrow ^{37}Ar + e^-$ (E.X. 35 napos felezési idő)

A tartályt 1.5 km mélyen helyezték el egy aranybányában (Homestake bánya, Lead, SD, USA) .

A p-p lánc alapján 3 Argon atom keletkezését várták naponta, amit radioaktivitása útján könnyű detektálni.

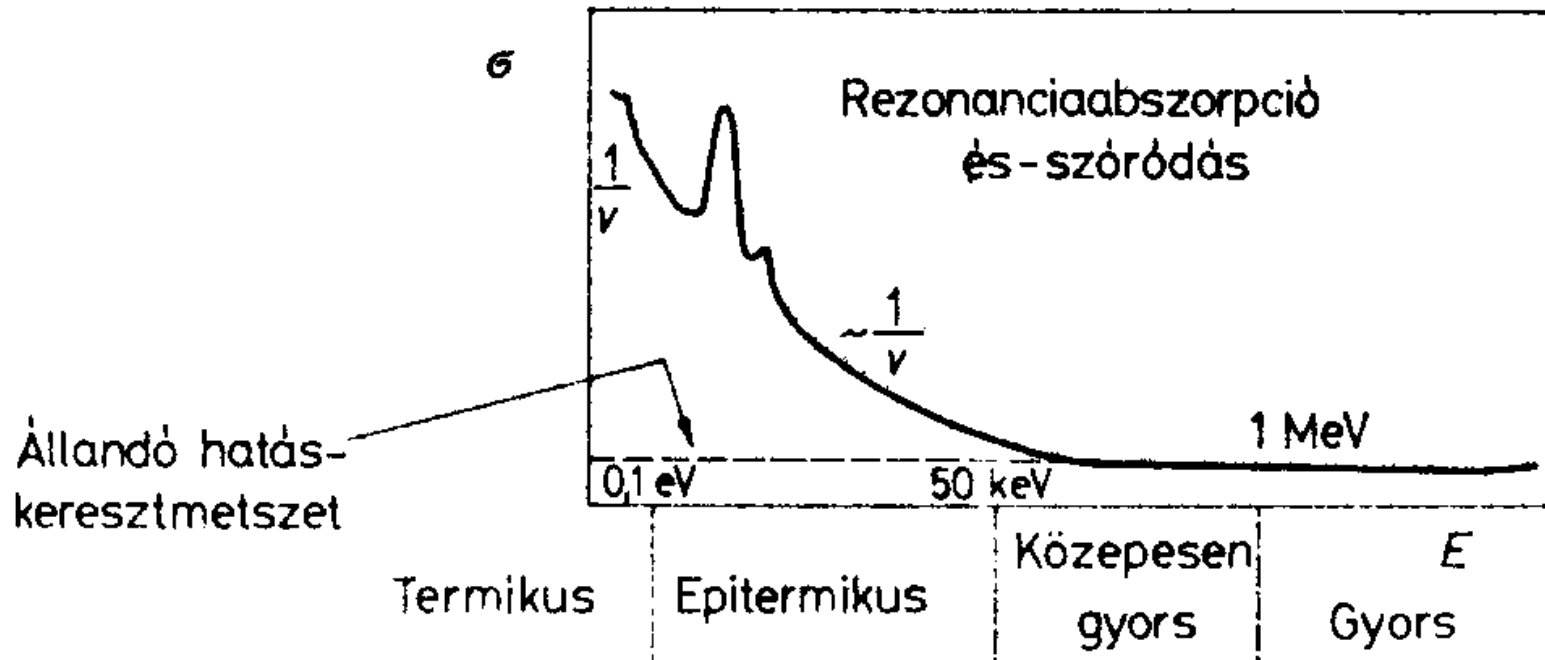
Eredmény: csak 1/3 mennyiséget mértek. A kísérletet 20 éve folyik és más obszervatóriumok is (Japán (Kamiokande), Oroszország (SAGE = Soviet(sic)-American Gallium Experiment) és Olaszország (GALLEX)) hasonló eredményt közöltek.

Probléma: hol a hiányzó neutrínó?

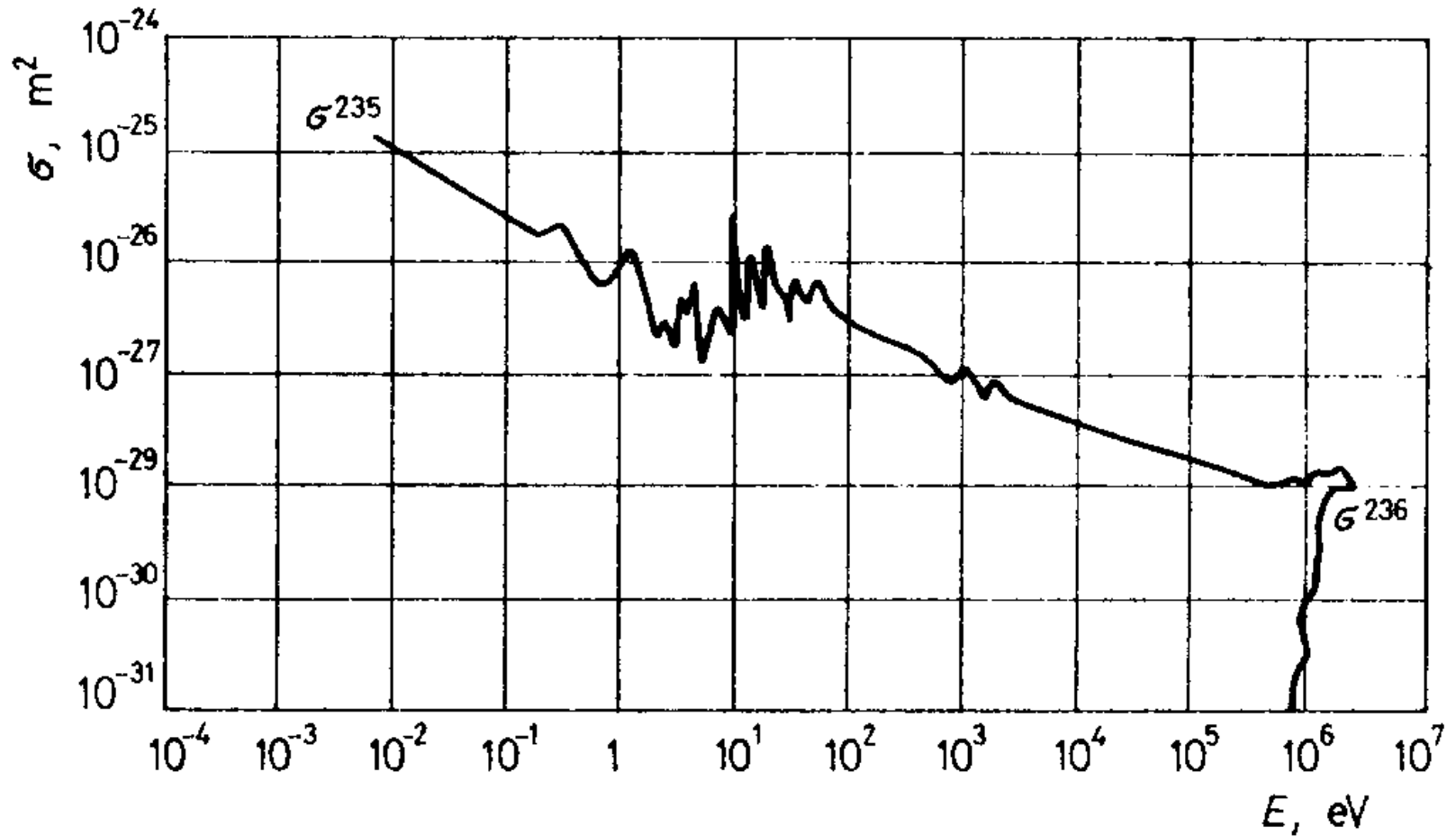
Részletes információ: <http://www.sns.ias.edu/~jnb/Papers/Popular/snhistory.html>

Neutron magreakciók

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



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

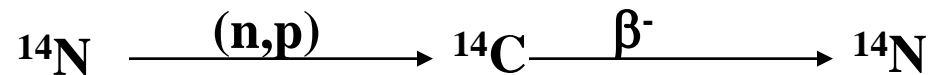


(n,γ) reakciók a leggyakoribbak.

Példa:

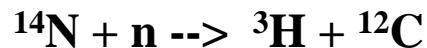
Magreakció	σ [barn]
$^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$	0.53
$^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110\text{m}}\text{Ag}$	2.2
$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	20
$^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$	40
$^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$	$6.31 \cdot 10^4$
$^{135}\text{Xe}(n,\gamma)^{136}\text{Xe}$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

(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:

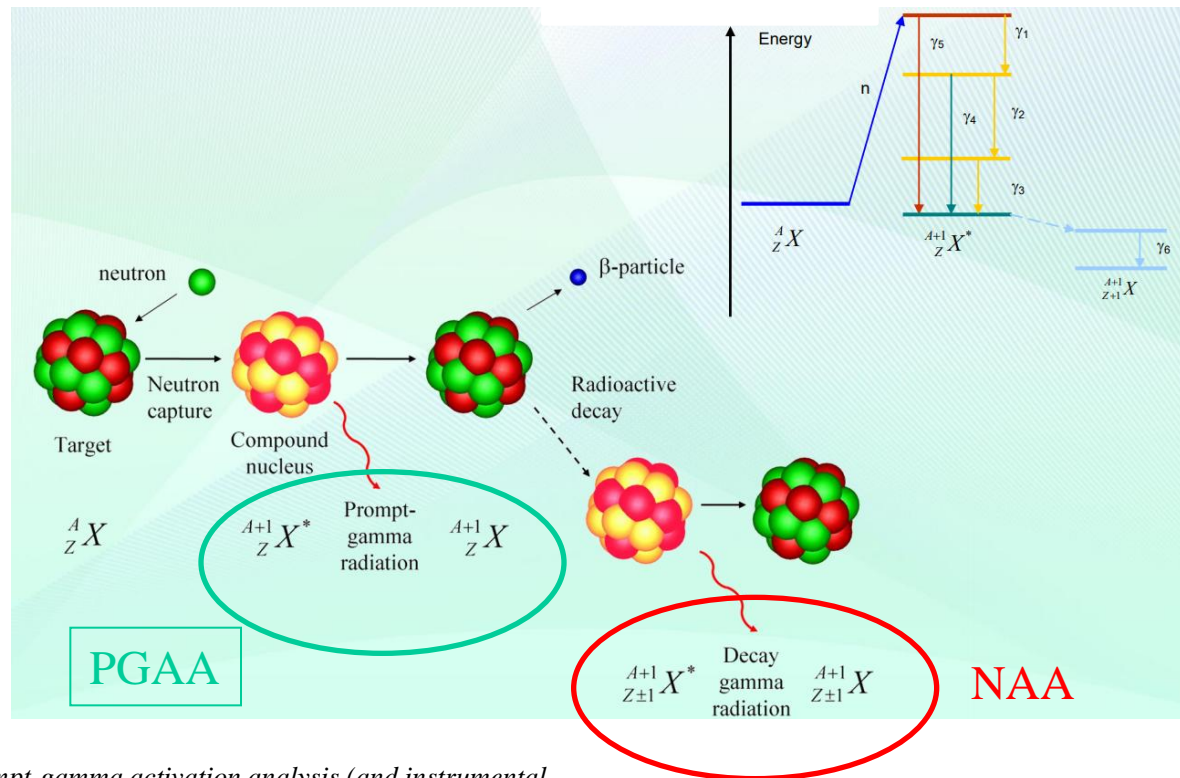


(n,α) reakciók:

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

Neutron aktivációs analízis (NAA)

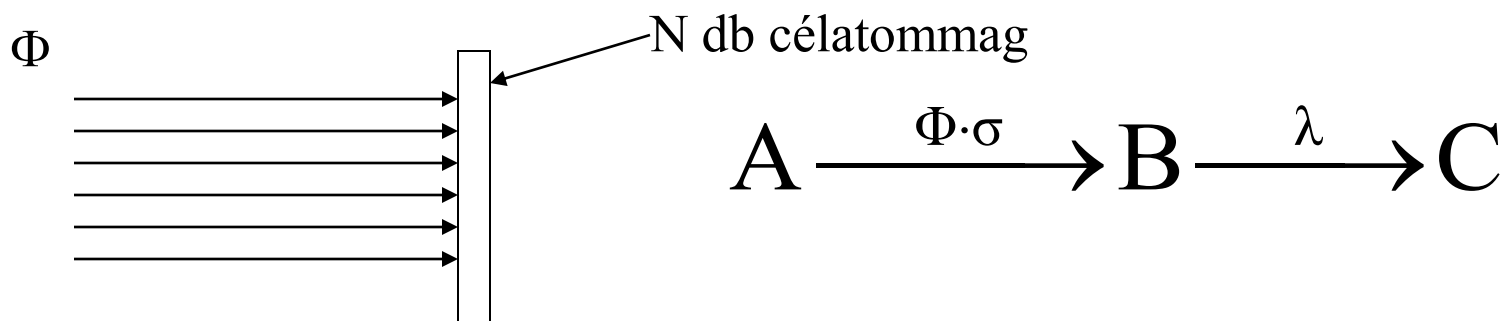
Prompt-gamma aktivációs analízis (PGAA)



Forrás: Prompt-gamma activation analysis (and instrumental neutron activation analysis) - László Szentmiklósi, Central European Training School on Neutron Techniques 2018, Budapest, Hungary

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:

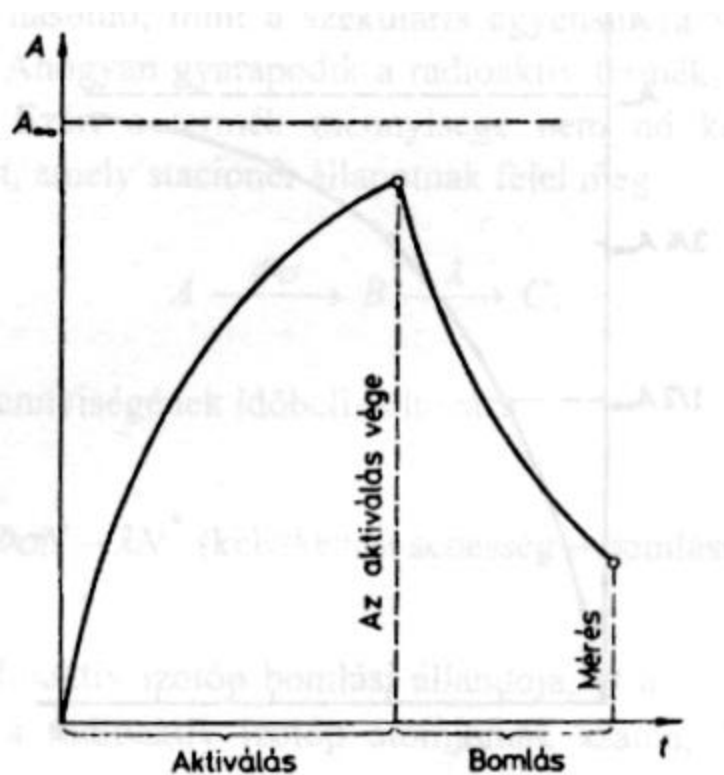
$$\frac{dN^*}{dt} = \Phi \cdot \sigma \cdot N - \lambda \cdot N^*$$

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

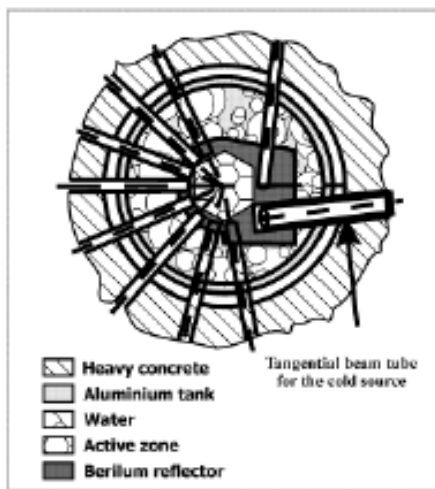
$$A = A_{\infty} \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot t)]$$

ahol

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

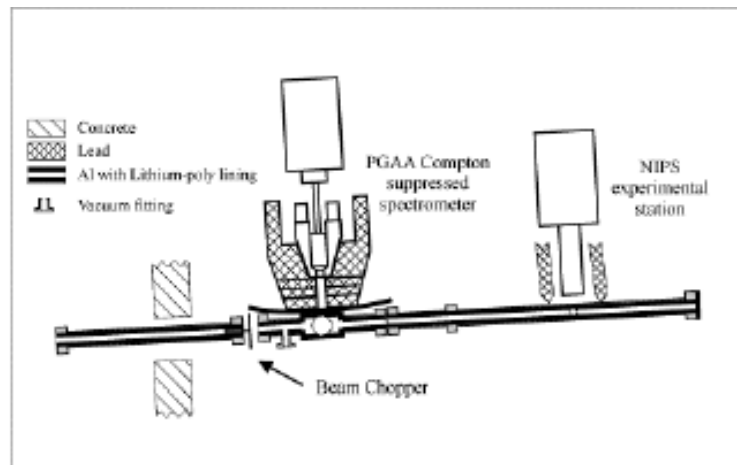


Budapesti Kutató Reaktor



C) ábra:

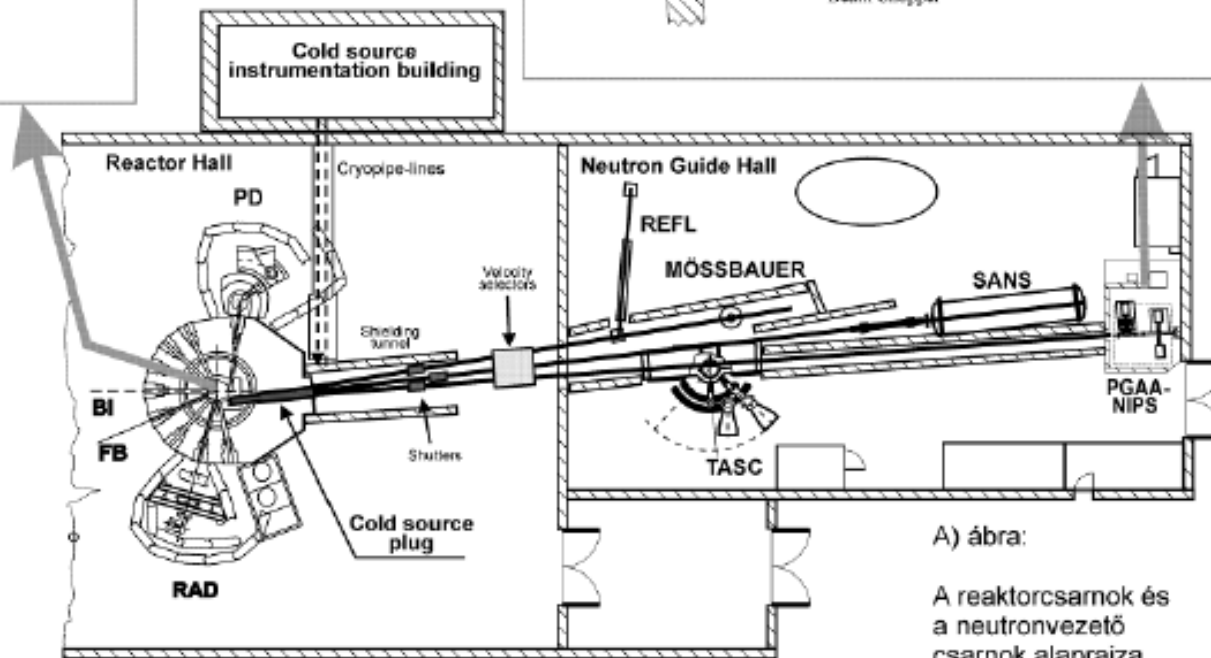
A neutronvezető csarnokban található PGAA és NIPS mérőhelyek alaprajza



B) ábra:

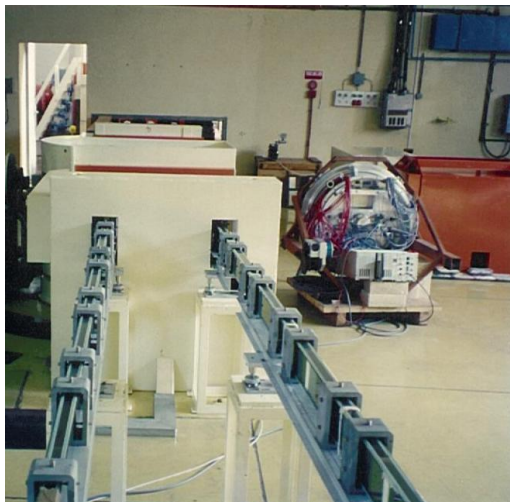
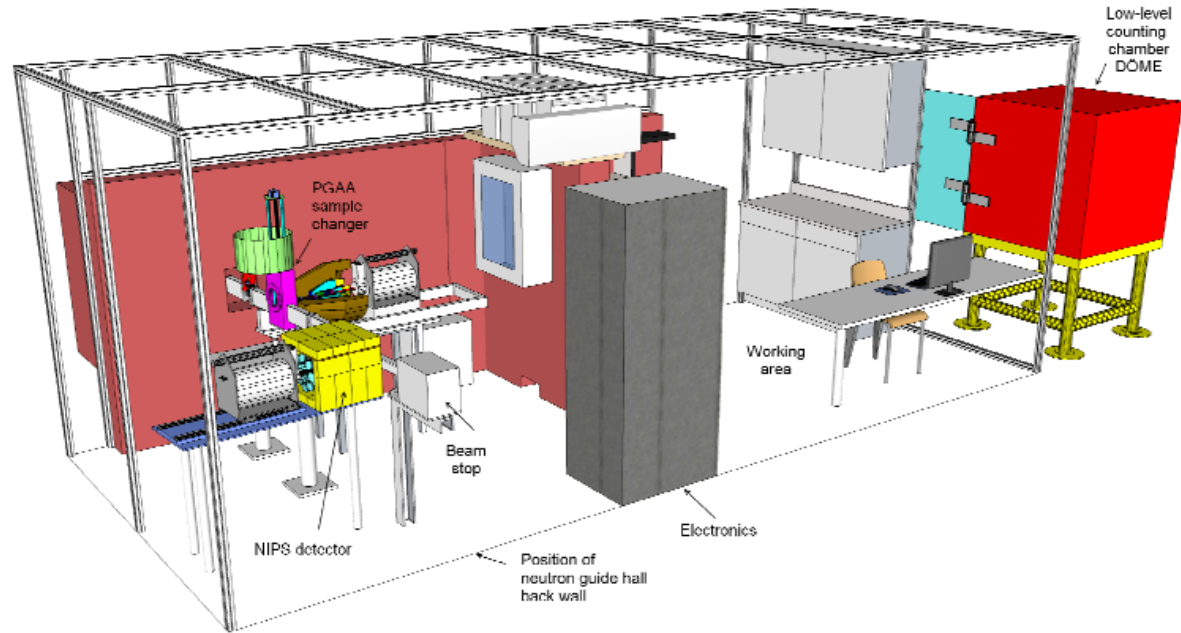
A reaktortartály és a besugárzó csatornák keresztmetszeti rajza.

A 10. sz. tangenciális csatornából kivezetett neutronok jutnak a hidegforrásba, majd a neutronvezetőkön át a berendezésekhez.



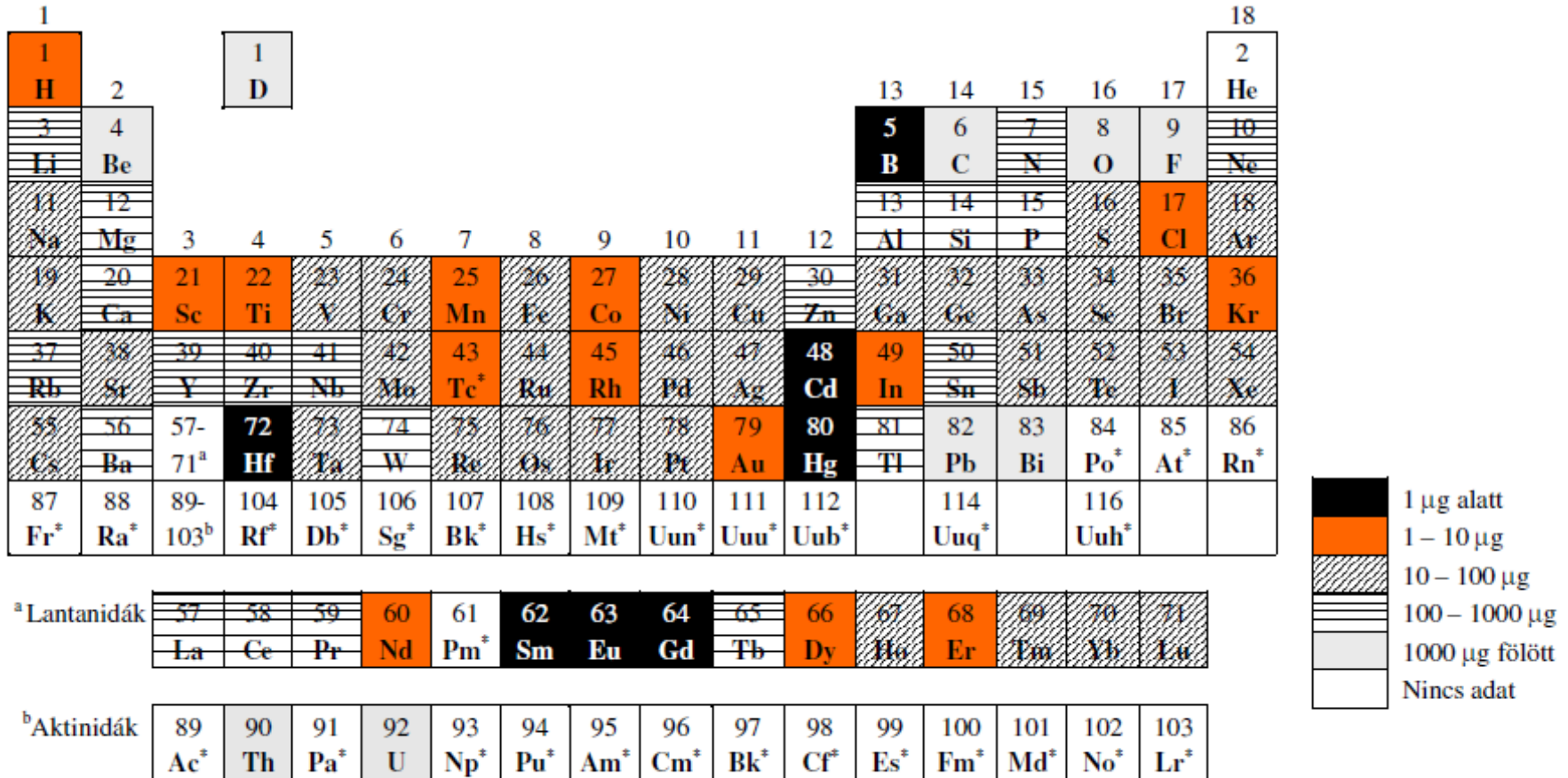
A) ábra:

A reaktorcsarnok és a neutronvezető csarnok alaprajza



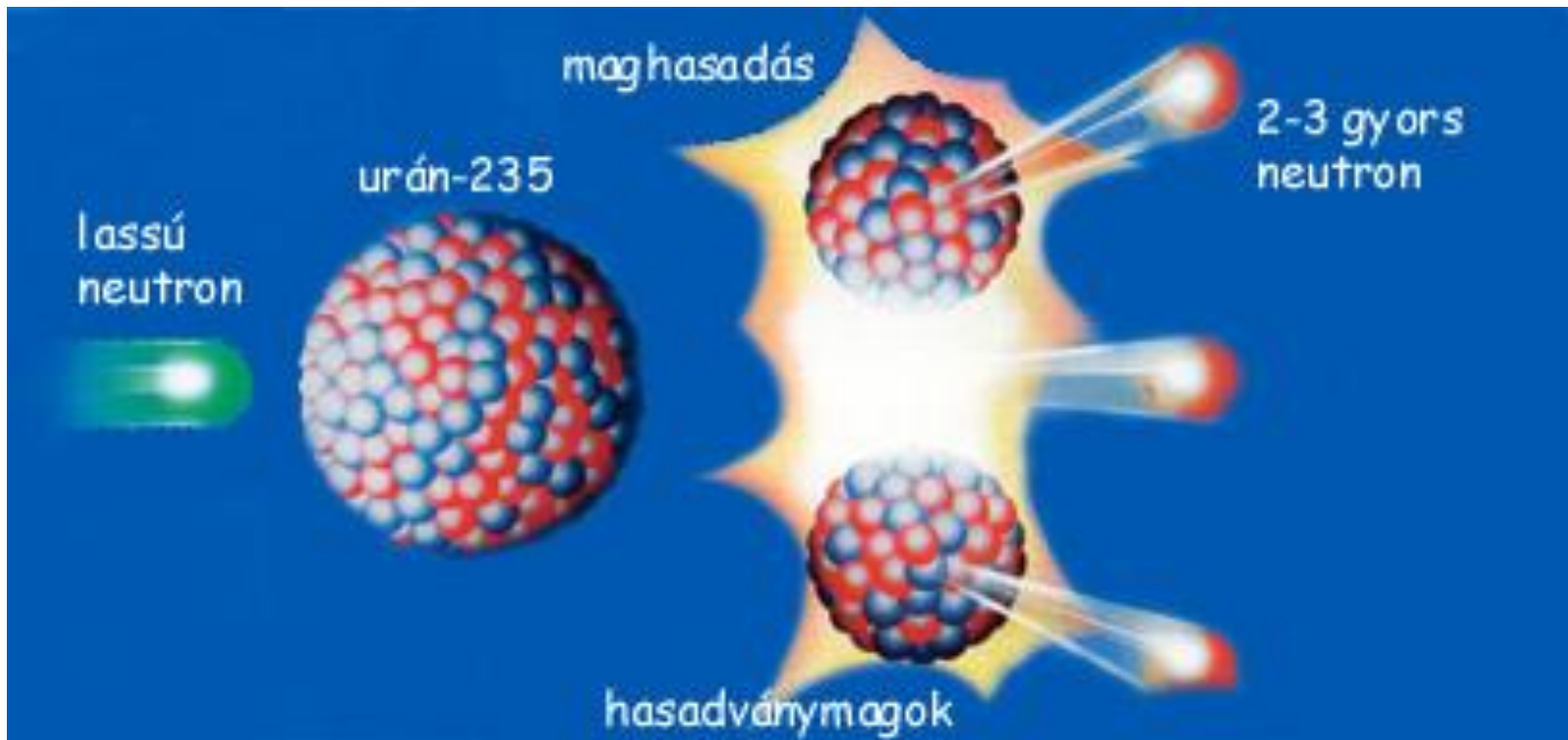
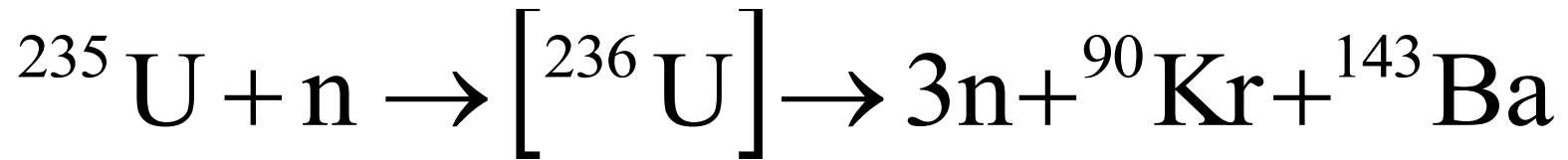
Forrás: Prompt-gamma activation analysis (and instrumental neutron activation analysis) - László Szentmiklósi, Central European Training School on Neutron Techniques 2018, Budapest, Hungary

PGAA érzékenysége



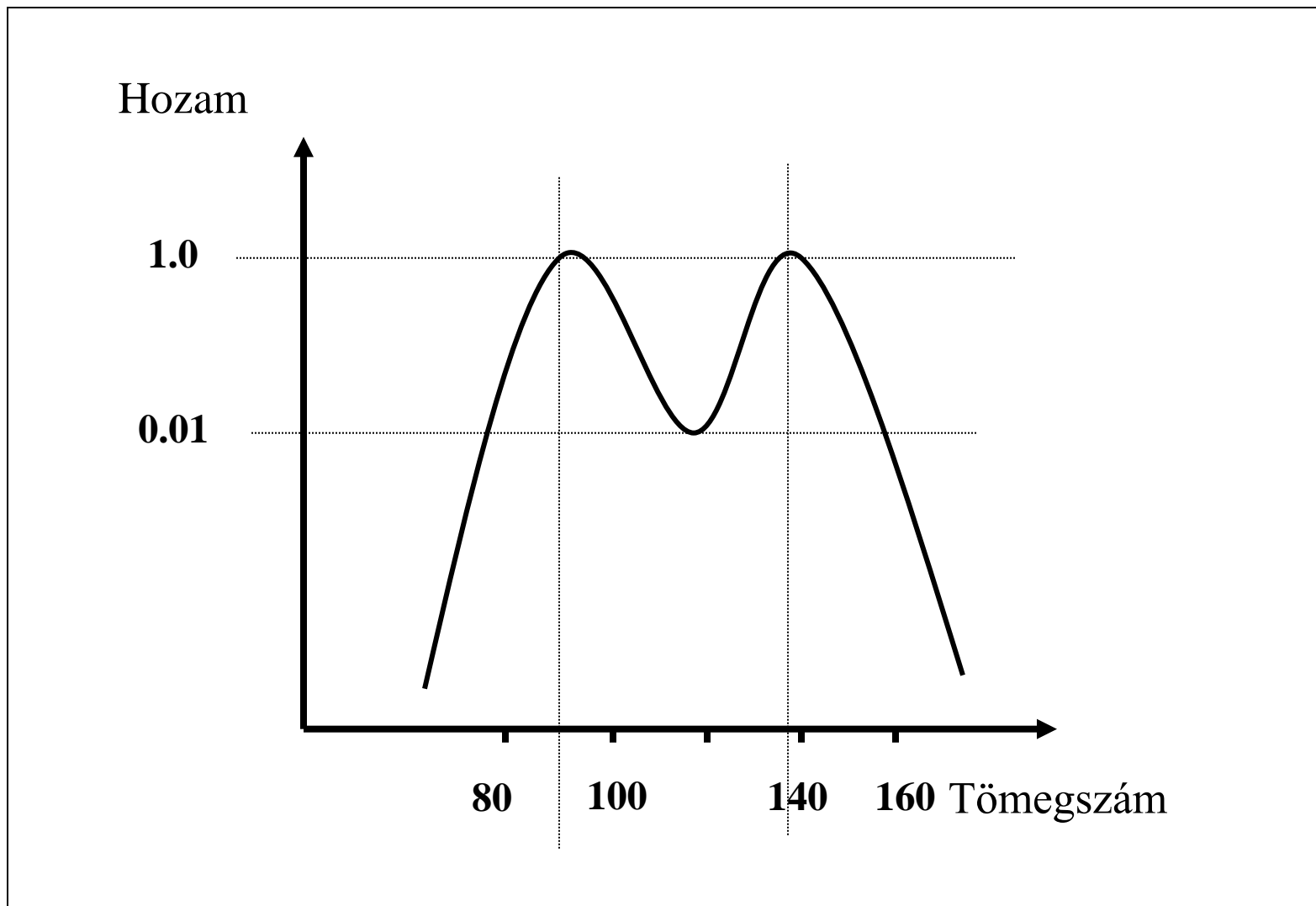
9. ÁBRA. Az elemek legkisebb kimutatható mennyisége a budapesti PGAA mérőhelyen, a legkedvezőbb detektálási körülményeket feltételezve és 30 000 s mérési időre vonatkoztatva

(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

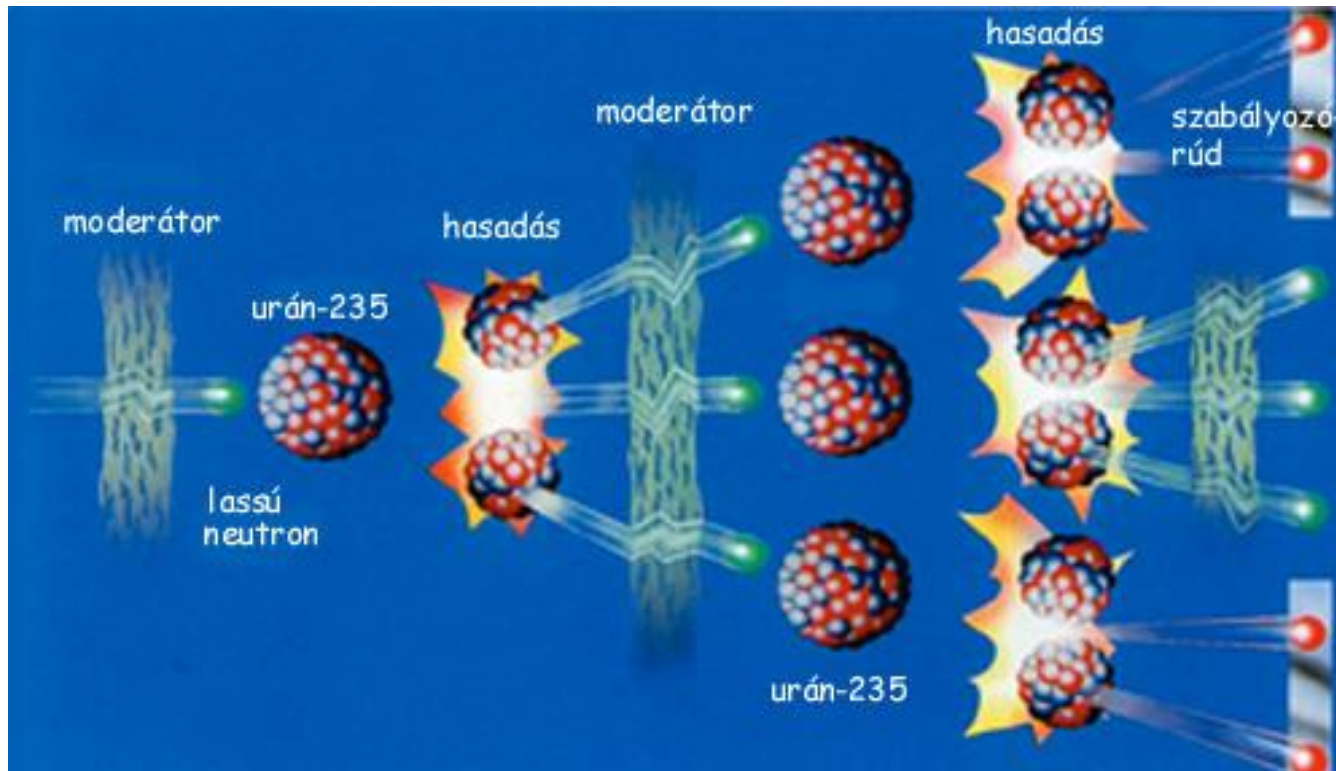
235-U hasadvány-termékei eloszlása



(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



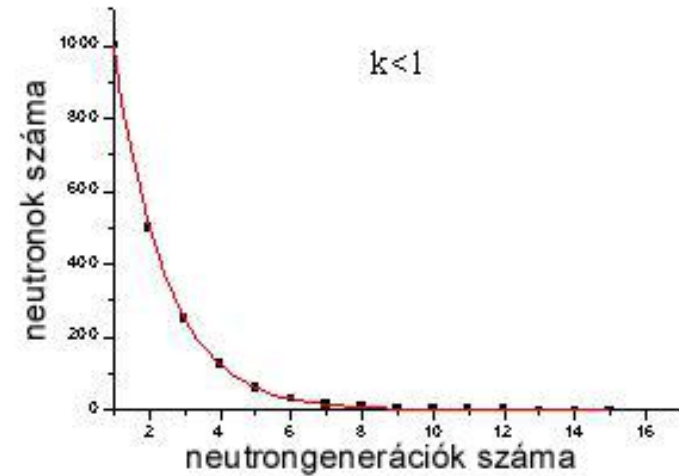
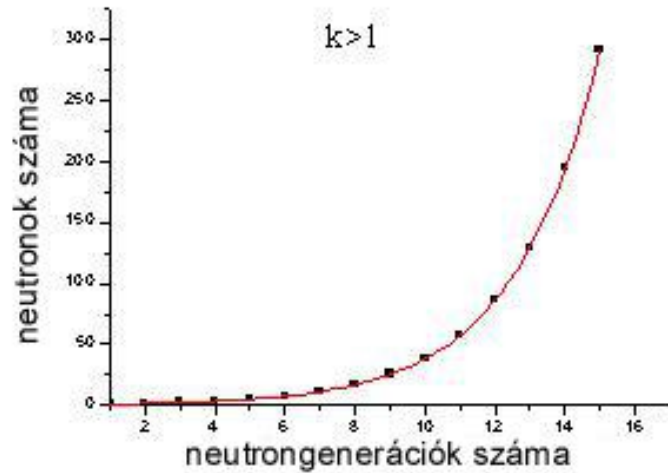
k - sokszorozási tényező:

$$k \equiv \frac{\text{szekunder neutronok száma}}{\text{primer neutronok száma}}$$

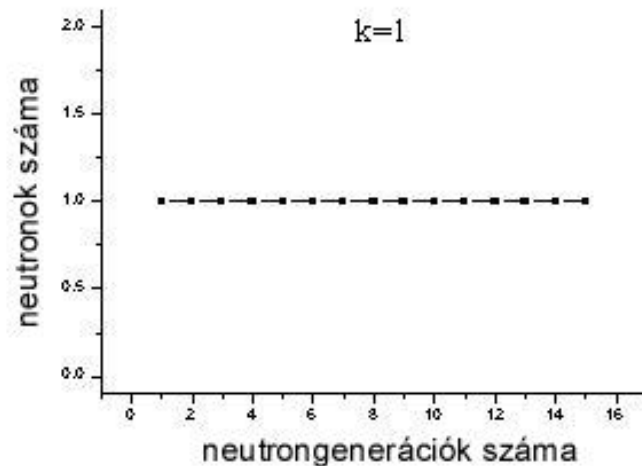
A rendszer lehet:

szuperkritikus - atombomba

szubkritikus



kritikus - atomreaktor



Véges méretű rendszer esetén un. effektív sokszorosítási tényezőről beszélünk:

$$k_{\text{eff}} \equiv k_{\infty} \cdot P$$

ahol

k_{∞} - végtelen kiterjedésű rendszer sokszorosítási tényezője

P - az adott méretekől függő paraméter

a méret növelésével P közelít az egyhez.

Kritikus térfogat (tömeg) esetén :

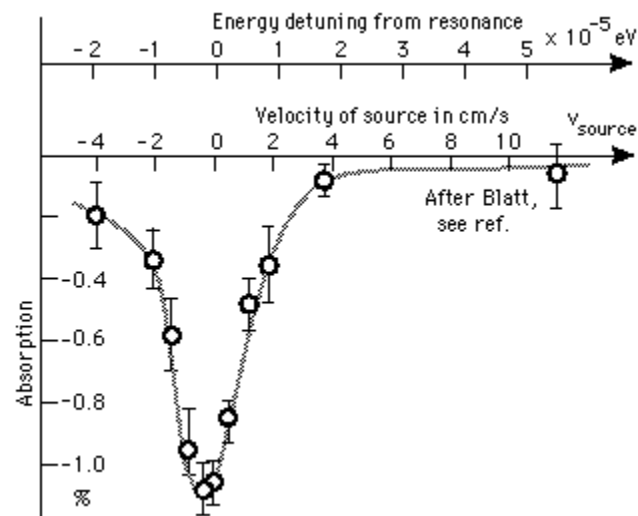
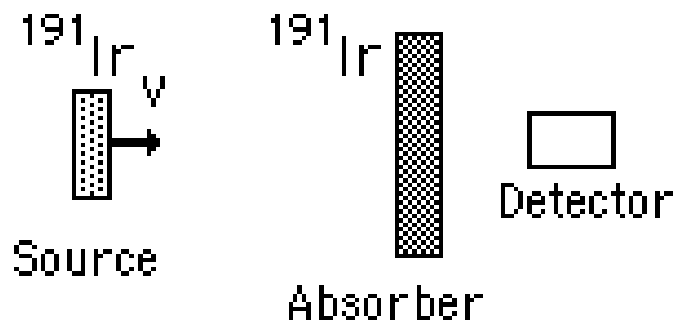
$k_{\text{eff}} = 1.0$ - a rendszer kritikussá válik.

Rezonancia abszorpció - Mössbauer-effektus

Probléma: visszalökődés



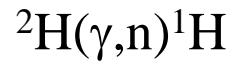
Megoldás: Dopler-elv



Vizsgálható izotópok: ^{40}K , ^{57}Fe , ^{119}Sn , ^{121}Sb , ^{153}Eu , ^{191}Ir , ^{195}Pt , ^{197}Au

Magreakciók fotonokkal

Neutronforrás:



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