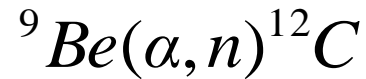


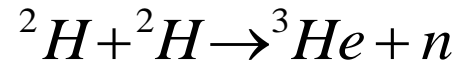
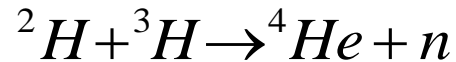
Nukleáris analitikai módszerek

Neutronok előállítása

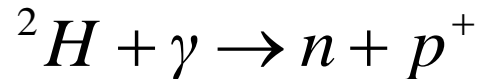
➤ Neutronforrások: 10^3 - 10^5 n/s.



➤ Neutrongenerátorok: 10^8 - 10^{10} n/s.



➤ Atomreaktorok: (n,f)



➤ Spallációs neutronforrás (EES)

Nukleáris analitikai módszerek neutronokkal

- Kvalitatív analízis - sugárzás fajtája, energiája vagy energia-eloszlása
- Kvantitatív analízis - intenzitás, aktivitás
- Elemzési mód: a gerjesztett sugárzás megfigyelése
 - magsugárzás - magreakciók
 - atomi sugárzás - szórás
- Előnyei:
 - független a kémiai környezettől
 - szelektív
 - érzékeny
 - roncsolásmentes

Nukleáris analitikai módszerek felosztás

- A gerjesztés módja szerint
 - aktiváció (n-, p⁺-, stb. aktiváció)
 - a késleltetett radioaktivitás mérése
 - indukált sugárzás (γ-, röntgen-, α-sugárzás)
 - prompt (azonnali: <math><10^{-14}</math> s) radioaktivitás mérése
 - szórás (töltött részecske)
- A keltett sugárzás fajtája szerint
 - γ-spektroszkópiái
 - röntgenspektroszkópiái
 - töltött részecske spektroszkópiái

Neutronaktivációs analízis (NAA)

- Hevesy Gy., H. Levi (1936)
- Magreakciók:
 - (n,γ) : termikus, epitermikus neutronokkal reaktorban
 - (n,γ) , (n,p) , (n,α) : gyors neutronokkal neutrongenerátorban
- Mérés: radioaktív bomlás során keletkező γ -, esetleg β -sugárzást
 - instrumentális (INAA) - közvetlenül
 - radiokémiai (RNAA) - radiokémiai elválasztás után

A magreakciók kinetikája

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

N^* a keletkező részecske

N a targetmagok száma

Φ a besugárzó részecske fluxusa

σ a hatáskeresztmetszet, 1
barn= 10^{-24} cm²

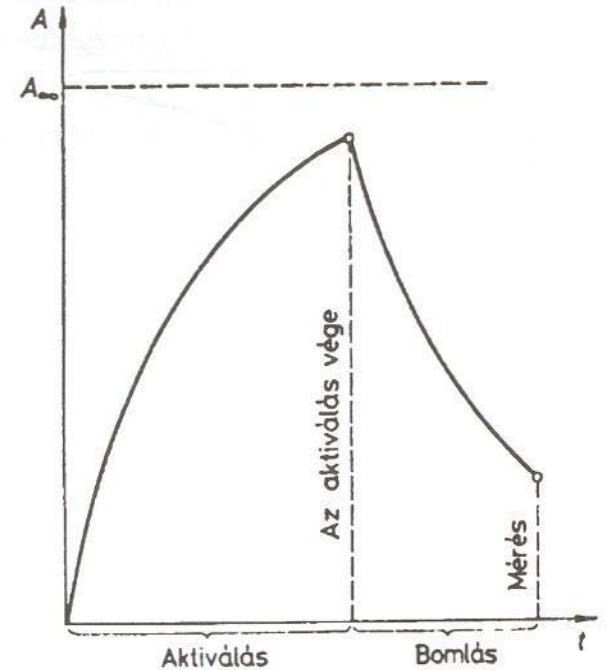
λ a termékmag bomlási állandója

$$N^* = \frac{\sigma\Phi N}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{besug}}) = N_{\infty} (1 - e^{-\lambda t_{besug}})$$

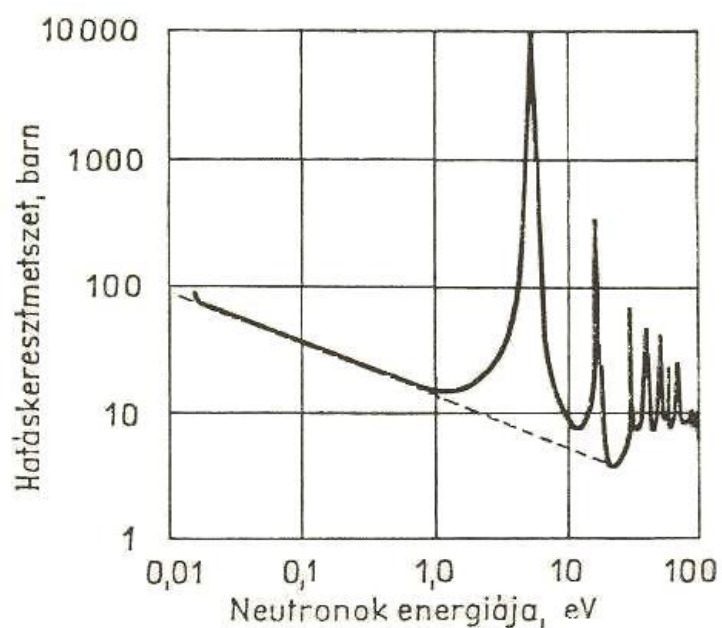
Besugárzás megszűnte után:

$$N^* = N_{\infty} (1 - e^{-\lambda t_{besug}}) e^{-\lambda t}$$

Aktivitással kifejezve: $A^* = \lambda N^* = \lambda N_{\infty} (1 - e^{-\lambda t_{besug}}) e^{-\lambda t} = A_{\infty} (1 - e^{-\lambda t_{besug}}) e^{-\lambda t}$



Magreakciók neutronokkal



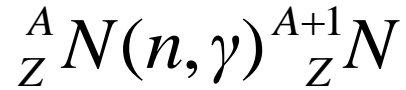
$< 0,01$ eV lassú vagy termikus

> 100 keV gyors

epitermikus neutronok

Hatáskeresztmetszet $\sim 1/v$

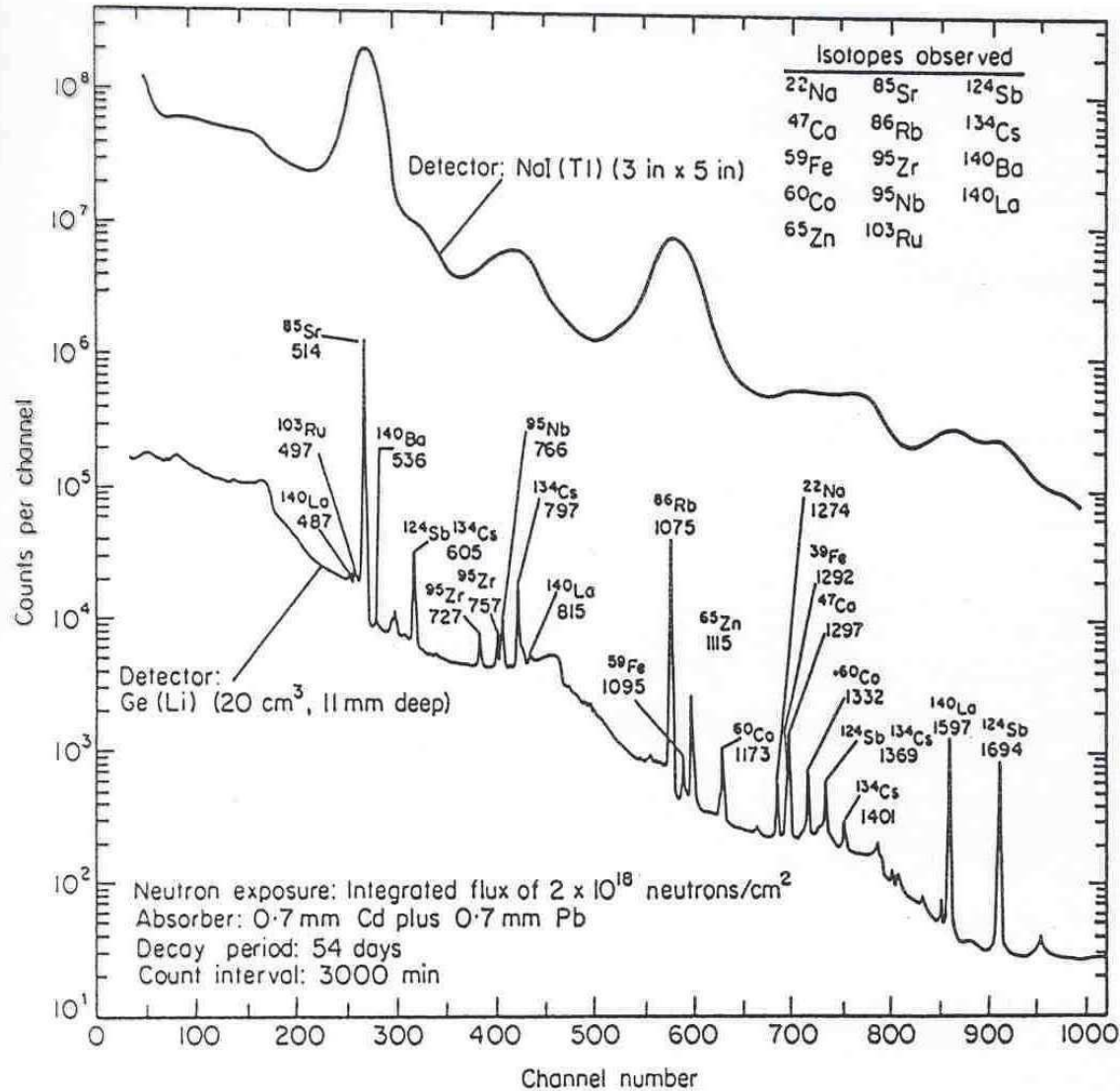
Rezonanciacsúcsok



- Nincs Coulomb-gát
- He kivételével mindig lejátszódik
- Exoterm, 8 MeV (neutron kötési energiája)
- Nem állítható elő hordozómentes izotóp
- Neutronfelesleges, β^- -sugárzó magok keletkeznek

- Zavaró reakciók az aktivációs analízisnél, pl.
ZnCu ötvözet: ${}^{64}\text{Zn}(n, \gamma) {}^{65}\text{Zn}$, ${}^{64}\text{Zn}(n, p) {}^{64}\text{Cu}$,
 ${}^{63}\text{Cu}(n, \gamma) {}^{64}\text{Cu}$

Tengervíz neutronaktivációval felvett spektruma



71 elem kimutatási határa 10^{13} termikus neutron/cm² s fluxus mellett (1 h besugárzás)

$$N^* = \frac{\sigma\Phi N}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{besug}}) = N_{\infty} (1 - e^{-\lambda t_{besug}})$$

Detektálási határ, μ	Elemek
$1-3 \cdot 10^{-6}$	Dy
$4-9 \cdot 10^{-6}$	Mn
$1-3 \cdot 10^{-5}$	Kr, Rh, In, Eu, Ho, Lu
$4-9 \cdot 10^{-5}$	V, Ag, Cs, Sm, Hf, Ir, Au
$1-3 \cdot 10^{-4}$	Sc, Br, Y, Ba, W, Re, Os, U
$4-9 \cdot 10^{-4}$	Na, Al, Cu, Ga, As, Sr, Pd, I, La, Er
$1-3 \cdot 10^{-3}$	Co, Ge, Nb, Ru, Cd, Sb, Te, Xe, Nd, Yb, Pt, Hg
$4-9 \cdot 10^{-3}$	Ar, Mo, Pr, Gd
$1-3 \cdot 10^{-2}$	Mg, Cl, Ti, Zn, Se, Sn, Ce, Tm, Ta, Th
$4-9 \cdot 10^{-2}$	K, Ni, Rb
$1-3 \cdot 10^{-1}$	F, Ne, Ca, Cr, Zr, Tb
10-30	Si, S, Fe

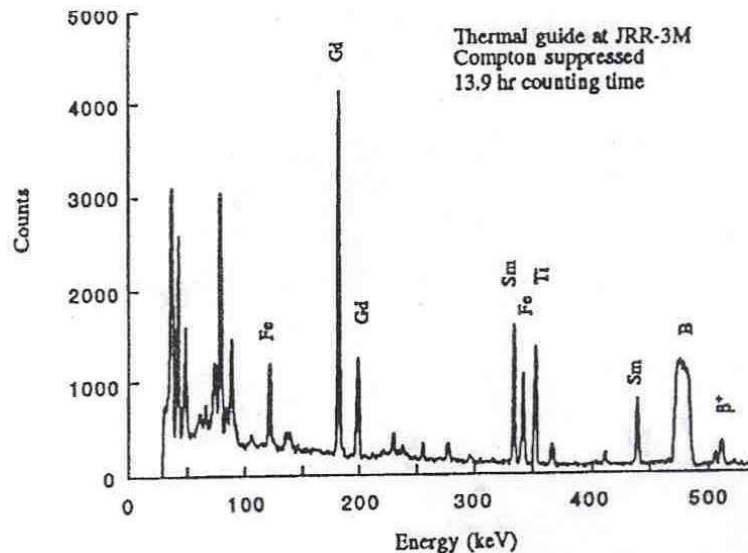
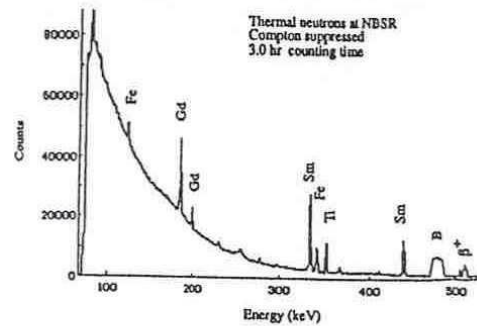
Prompt-gamma neutronaktivációs analízis (PGAA)

- Neutron-befogást követő prompt γ -sugárzás aktiválással egyidejű észlelése
- (n,γ) reakció: a gerjesztett atommag sugároz.
 - Gerjesztési energia \sim neutron kötési energiája (7-8 MeV)
 - Legerjesztődés: nagy energiájú γ -sugárzás vagy kis energiájú γ -kaszádok. Ezek energiája és intenzitása éppúgy jellemző a magra, mint a radioaktív bomlást kísérő gamma-sugárzásé. Aktiválás időtörvénye is ugyanaz.
- Előny: mint NAA, de minden elemre működik
 - különösen fontos a könnyű elemeknél (H, B, N, stb.)
 - nyomelemeknél (Cd, Hg, stb.)
- Hátrány:
 - közvetlenül a neutron-nyalámban kell mérni-nagy háttérsugárzás
 - a fluxus a nyaláb belsejében \ll reaktor belseje
 - bonyolult gamma-spektrum
 - bonyolult, drága mérés technika

Hidegneutronos PGAA

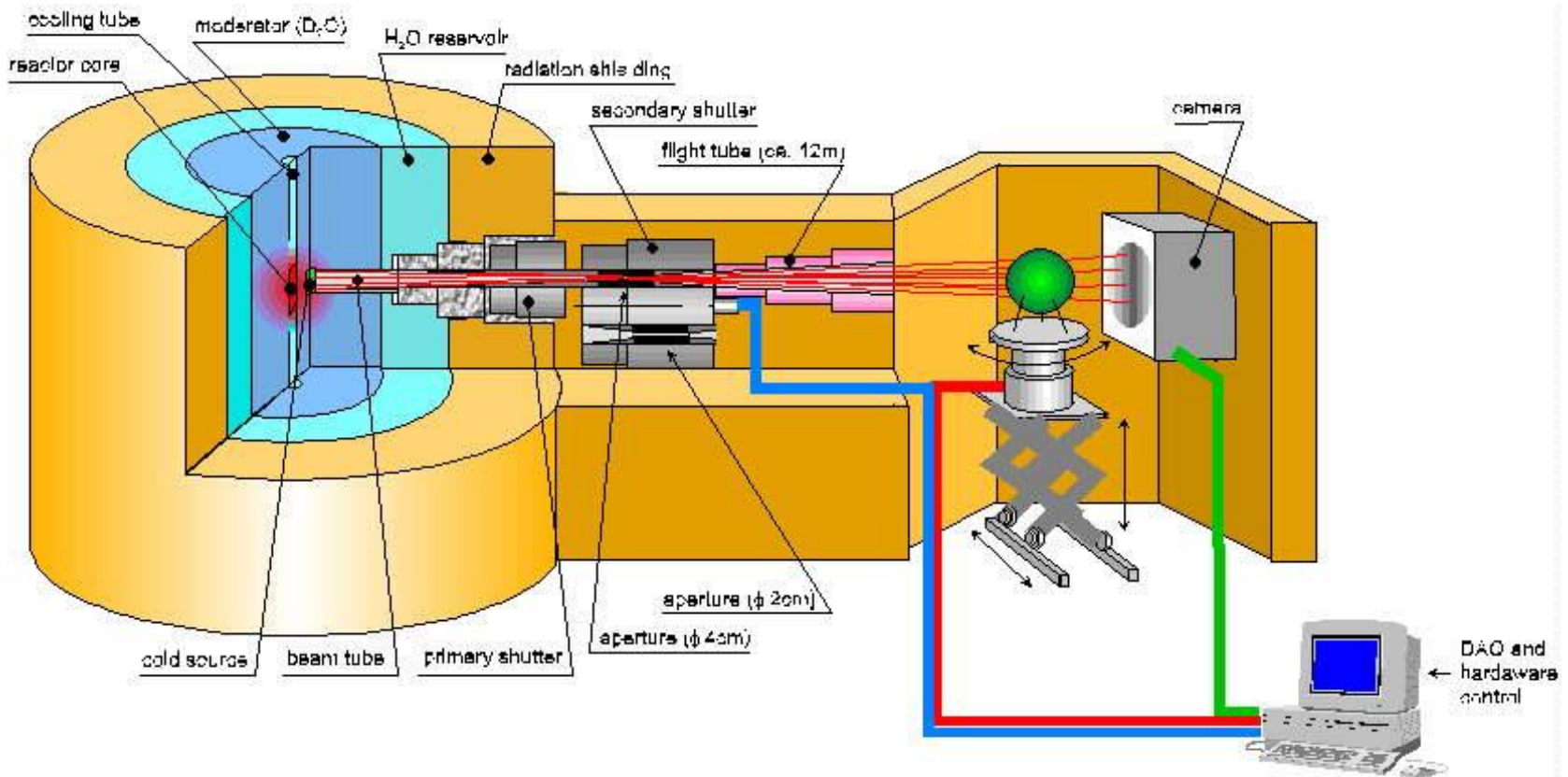
- Előny: NAA legfontosabb kiegészítője
 - nagyon alacsony háttér
 - nagy hatáskeresztmetszet ($\sigma \sim 1/v$)
 - *in-vivo* lehetőségek
 - termikus neutronnyalábhoz képest <100x javulás
 - kimutatási határ: 10^{-5} - 10^{-9} g
- Alkalmazások:
 - anyagvizsgálat (H, B)
 - geokémia
 - fő elemek (Si, Al, H, C)
 - nyomelemek (Cu, Cd, Hg, /Pb/)
 - indikátorok (B, Rb, Sm, Gd)
 - környezetvédelem
 - toxikus nyomelemek (Cd, Hg)
 - biológia, orvostudomány
 - makroelemek (H, C, /O/, Ca)
 - mikroelemek (Cu, Zn, Fe)

Termikus és hideg neutronnyalámban felvett PGAA spektrumok összehasonlítása



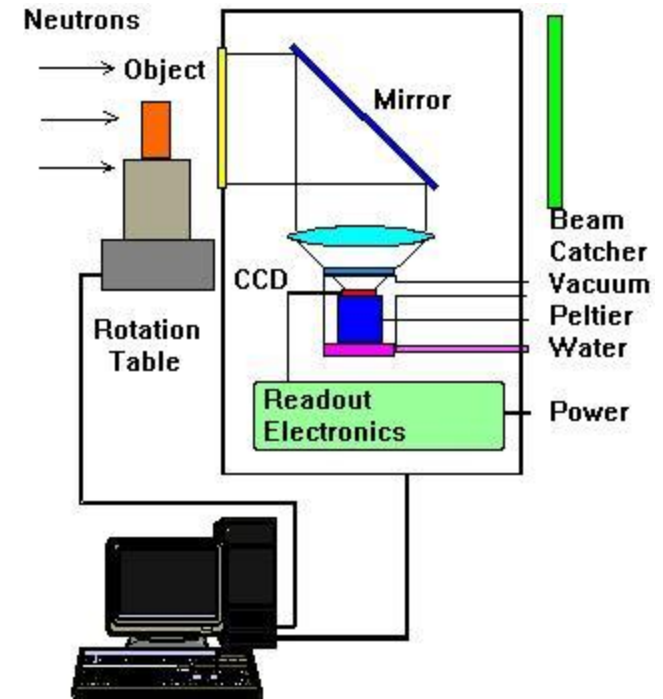
Neutronos képalkotó technikák

- Neutronradiográfia és –tomográfia



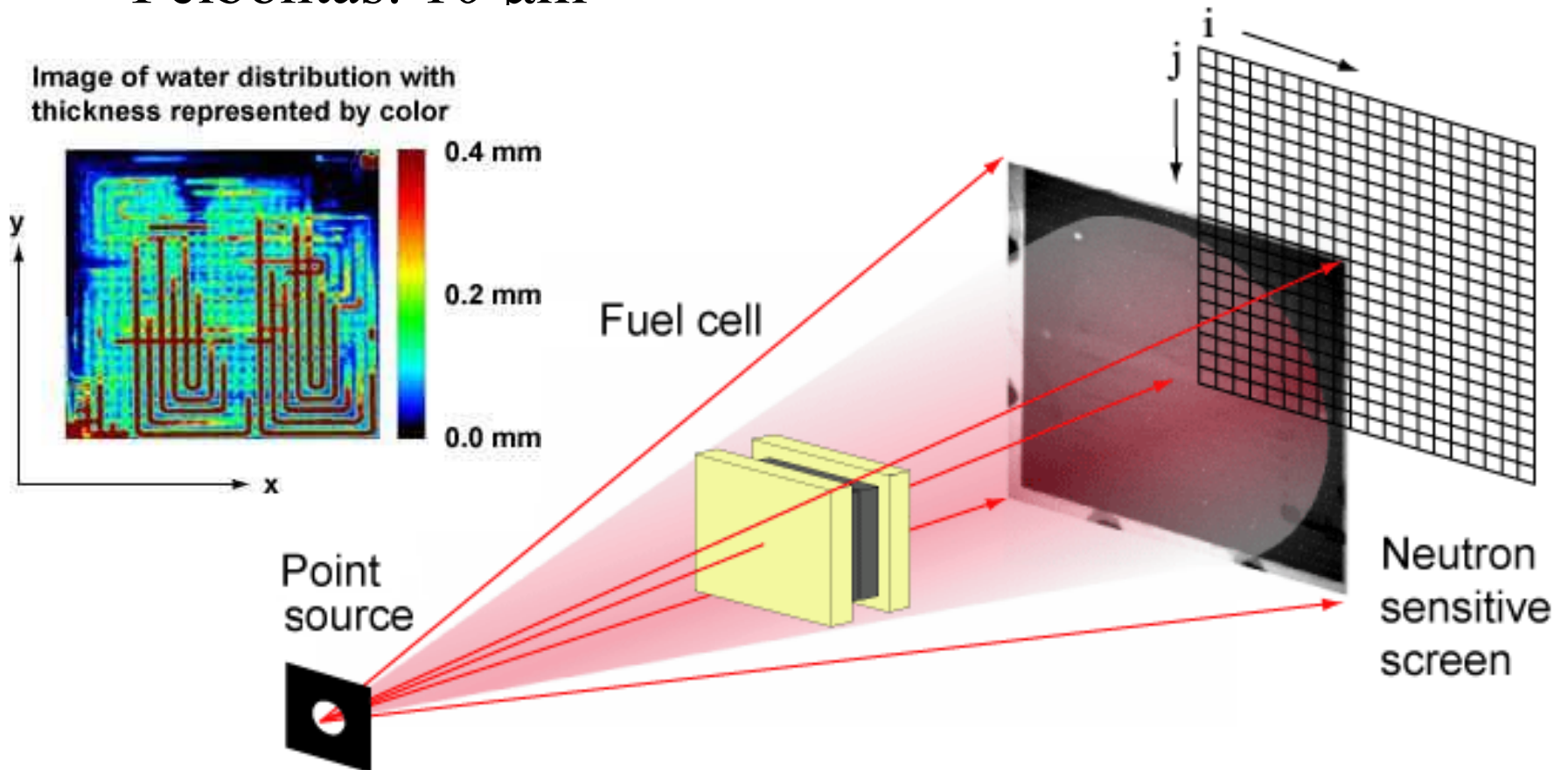
Neutronradiográfia

- Párhuzamos neutronnyaláb
- Minta (változó neutronelnyelés)
- Szcintillátorernnyő
 - ${}^6\text{LiF} + \text{ZnS}$
 - ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ – két töltött részecske
 - ZnS-ben felvillanást okoz
 - Felbontás: 100—300 μm
- Tükör
- Digitális kamera



Nagyítás??

- Széttartó nyaláb
- Felbontás: 10 μm

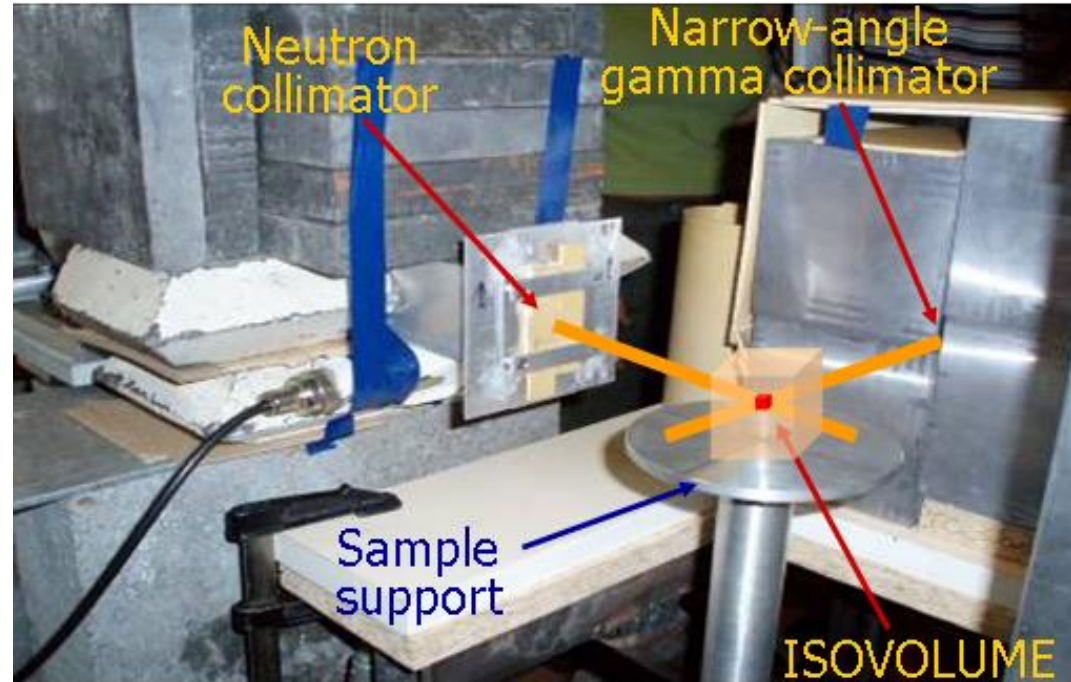
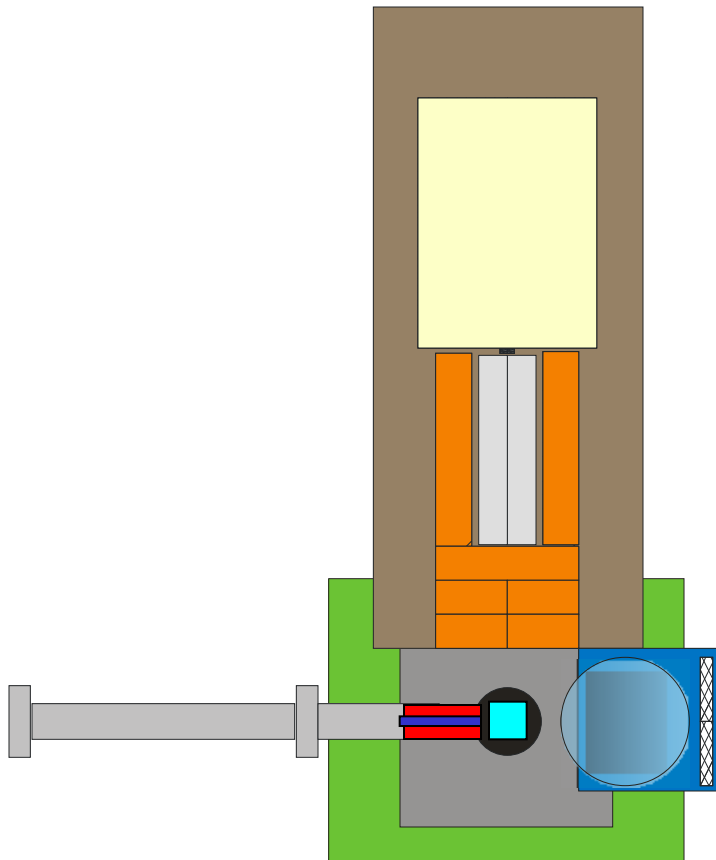


Időigényes mérés

- Felbontástól, fluxustól függően:

Pár sec – 1 nap

PGAA és neutronradiográfia kombinálása



Belső részletek külön-külön elemezhetők

