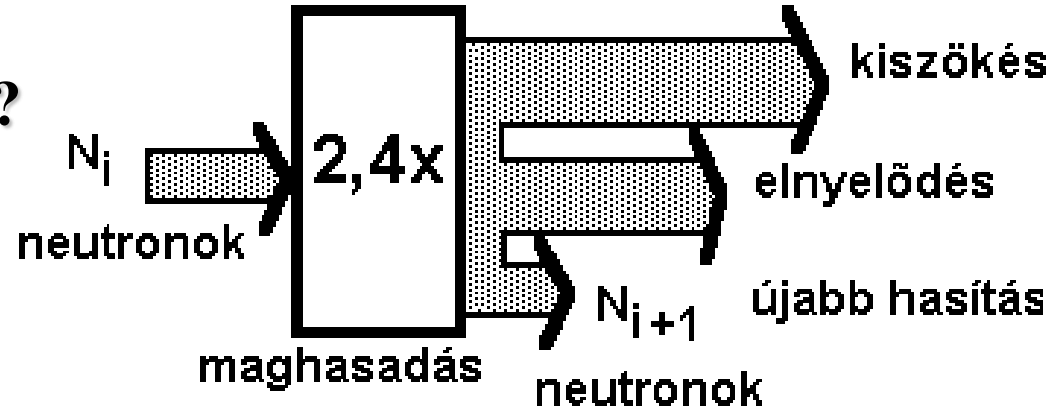


Láncreakció neutronokkal

„Neutron-háztartás”

Mi történhet egy neutronnal?

- Kiszökik a reaktorból
- Elnyelődik
- Maghasadást okoz



Neutron „generációk”

$N_1, N_2, N_3, \dots, N_i, N_{i+1}, \dots$

N_i az i -edik generációban maghasadást okozó neutronok száma

Neutron sokszorozási tényező:

$$k_{eff} = \frac{N_{i+1}}{N_i} \quad (\text{definíció})$$

Ha $\left\{ \begin{array}{l} k_{eff} < 1, \text{ a láncreakció csökkenő („szubkritikus”)} \\ k_{eff} = 1, \text{ a láncreakció stacionárius („kritikus”)} \\ k_{eff} > 1, \text{ a láncreakció növekvő („superkritikus”)} \end{array} \right.$

A lánreakció időbeli lefolyása

Kiindulás:

$$k_{eff} = \frac{N_{i+1}}{N_i}$$

Azonos átalakítással: $k_{eff} - 1 = \frac{N_{i+1}}{N_i} - 1 = \frac{N_{i+1} - N_i}{N_i} = \frac{\Delta N}{N_i}$

Két neutron-generáció között eltelt idő: $\Delta t = \ell$ (generációs idő)

A két egyenlet szorzata: $\Delta t \cdot (k_{eff} - 1) = \ell \cdot \frac{\Delta N}{N}$

Ebből kapjuk: $\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left(\frac{k_{eff} - 1}{\ell} \right) \cdot N$

$\Delta t \rightarrow 0$ határátmenet után $\frac{dN}{dt} = \left(\frac{k_{eff} - 1}{\ell} \right) \cdot N(t)$

**Ez egy differenciálegyenlet,
amelynek megoldása:**

$$N(t) = N_0 \cdot e^{\left(\frac{k_{eff} - 1}{\ell} \right) t}$$

Nyilván $k_{eff} = 1$ esetén $N(t) = N_0 = \text{konstans}$,

$k_{eff} > 1$ esetén $N(t)$ az időben **exponenciálisan** nő,

$k_{eff} < 1$ esetén $N(t)$ az időben **exponenciálisan** csökken.

A változás gyorsaságát a $\left(\frac{k_{eff} - 1}{\ell} \right)$ kifejezés adja meg
Prompt neutronoknál

a generációs idő $\ell \sim 10^{-4}$ s

Példa:

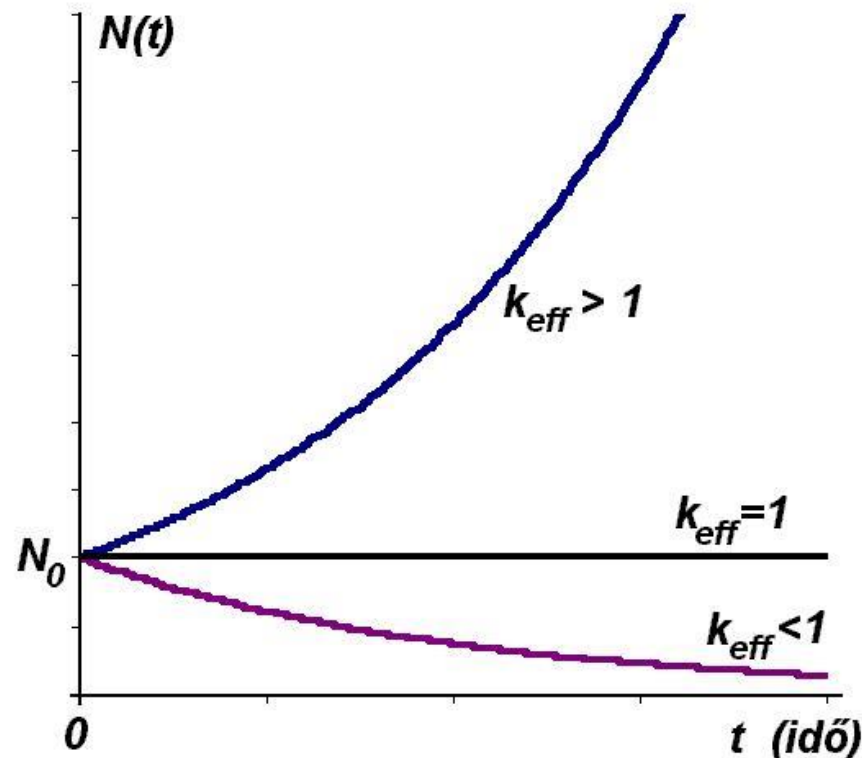
Tegyük fel, hogy $k_{eff} = 1,001$

A neutronszám (és a reaktor teljesítményének) változása

1 s alatt:

$$N(1) = N_0 \cdot e^{\frac{1,001-1}{0,0001} \cdot 1} =$$

$$= N_0 \cdot e^{10} = 22026 \cdot N_0$$



Nem szabályozható! (prompt-kritikus)

A késő neutronok generációs ideje a prekursor β -bomlás felezési idejével meghosszabbodik \longrightarrow akár több sec hosszú is lehet!

A késő neutronok szerepe: **megnövelik az effektív generációs időt!**

A rendszer akkor szabályozható, ha a késő neutronok nélkül $k_{eff} < 1$

Emiatt gondoskodni kell, hogy mindig $k_{eff} < 1 + \beta = 1,0065$

Reaktivitás: $\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$ (definíció)

Prompt-kritikus rendszerre: $k_{eff} = 1 + \beta$, ezért a reaktivitása:

$$\rho = \frac{1 + \beta - 1}{1 + \beta} \approx \beta \quad (\text{Mivel } 1 + \beta = 1,0065 \sim 1)$$

A reaktivitás későneutron-hányadhoz viszonyított egysége a \$ (**dollár**).

$$1 \$ \text{ a reaktivitás, ha } \frac{\rho}{\beta} = 1$$

Láncreakció megvalósításának lehetőségei



Növelni kell az „újabb hasítás” részarányát.

Ennek több módja van

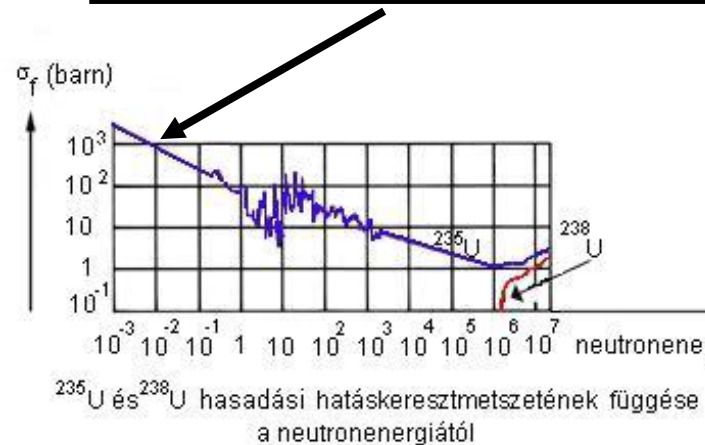
Neutronok **lelassítása**
(hasadási σ_f keresztmetszet nő)

Kiszökés arányának
csökkentése

Elnyelődés arányának
csökkentése

Nagy **méret**
(felület/térfogat)
arány csökken
Kritikus tömeg

$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ arányának
növelése (**dúsítás**)



Neutron-lassításra olyan anyag jó, amelynek

- **tömegszáma kicsi** (egy ütközésben sok energiát tud átvenni),
- **neutron-szórási** hatáskeresztmetszete nagy,
- **neutron-abszorpció** (elnyelési) hatáskeresztmetszete kicsi.

Az ilyen anyag neve: **moderátor**.

Legjobb moderátor a **nehésvíz** és a tiszta **grafit** (szén)

A **könnyűvíz**ben a hidrogén el is nyeli a neutronokat



Az önfenntartó láncreakció megvalósíthatósága:

<i>Üzemanyag (dúsítás)</i>	<i>Neutronlassító (moderátor)</i>
Természetes urán (0,71% ${}^{235}\text{U}$)	Nhésvíz, tiszta grafit
3-5%-ra dúsított urán	Könnyűvíz
>40%-ra dúsított urán	Nem kell moderátor (atomfegyver)

Fontos megjegyezni: a moderátor SEGÍTI a láncreakciót!

Mitől függ a k_{eff} ?

Egyelőre tekintsünk el a kiszökéstől \longrightarrow „végtelen nagy” reaktor!

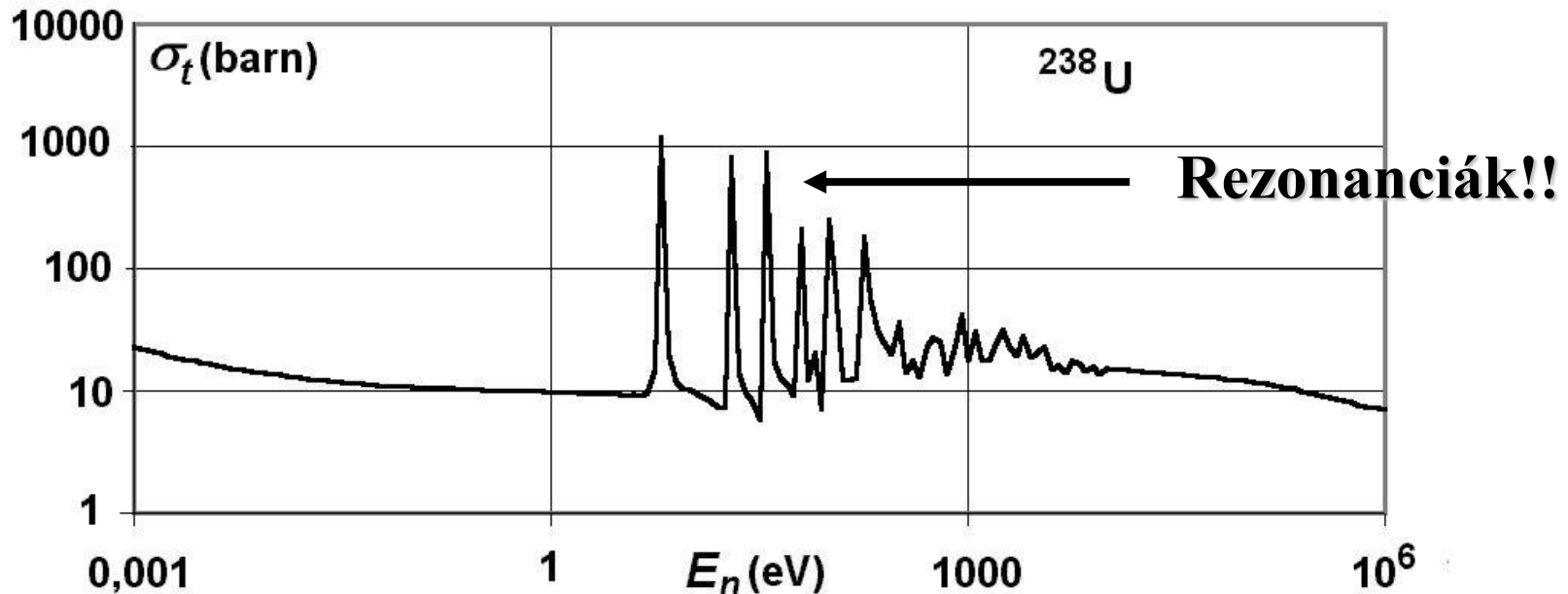
Ennek jellemzője lesz:

$$k_{\infty}$$

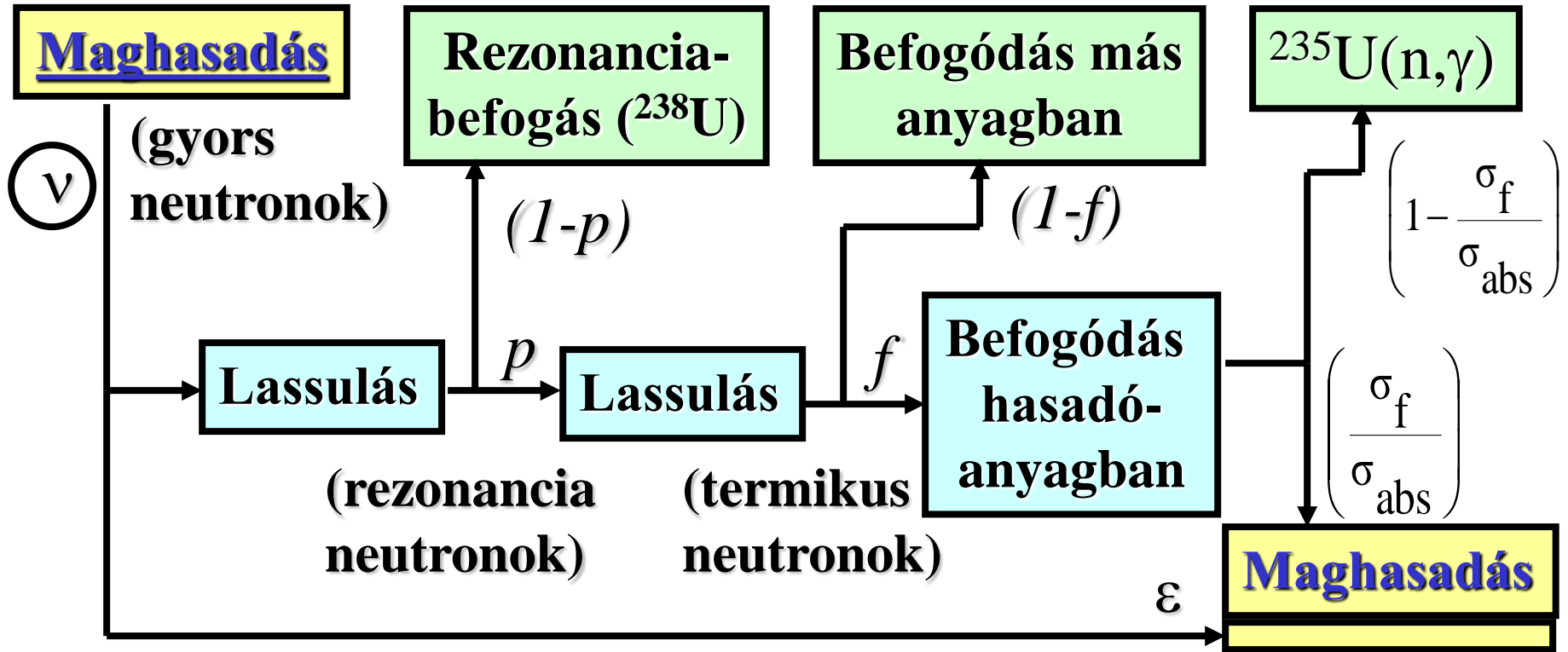
A reaktorunk jellemzői:

- termikus reaktor (moderátor, lassú neutronok),
- szerkezeti anyagok (nemcsak üzemanyag)
- üzemanyag dúsított urán (tehát marad ^{238}U is)

Figyelembe kell majd venni a ^{238}U abszorpcióját:



„Négyfaktor” formula (végtelen kiterjedésű n-szorzozó közeg)



Rezonancia-kikerülési tényező
 $0,6 < p < 0,9$

Termikus hasznosítási tényező (f)

„Termikus neutronhozam”
 (csak a hasadó magtól függ)

$$k_{\infty} = v \cdot p \cdot f \cdot \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_{abs}} \right) \cdot \epsilon$$

$$\eta = v \cdot \frac{\sigma_f}{\sigma_{abs}}$$

Gyorshasítási tényező
 $1,00 < \epsilon < 1,03$

„Négyfaktor” formula (folyt.)

Összefoglalva:

$$k_{\infty} = \eta \cdot p \cdot f \cdot \varepsilon$$

Termikus neutronhozam

Gyorshasítási tényező

Rezonancia-kikerülési tényező

Termikus hasznosítási tényező

Reaktor-üzemanyagok jellemzői (termikus neutronokra):

	σ_f (barn)	σ_a (barn)	ν	η
^{233}U	531	577	2,50	2,30
^{235}U	584	683	2,43	2,08
^{238}U	$5 \cdot 10^{-4}$	2,71	-	-
U_{nat}	4,18	7,69	2,27	1,34
^{239}Pu	750	1021	2,88	2,11

η mutatja, hogy a többi faktoral mennyit kell elérni !

Pl. természetes urán üzemanyagra $p \cdot f \cdot \varepsilon > 1/1,34 = 0,746$, különben végtelen nagy reaktornál sem lehet önfenntartó láncreakció

Rezonancia-kikerülés: inhomogén atomreaktor (Szilárd Leó ötlete)

kis átmérőjű üzemanyagpálcákból álló rács

hasadási gyors neutronok kijönnek belőle

moderátorban lelassulnak
(átvészelik a rezonancia-tartományt)

lassú neutronként diffundálnak vissza.

Példa: Paksi Atomerőmű üzemanyaga



pasztillák
(UO₂ kerámia)

üzemanyagpálca



hatszögletű kötegek (349 db)
(126 pálca/köteg) laptávolság: 144 mm



Véges méretű reaktor, kiszökés figyelembe vétele

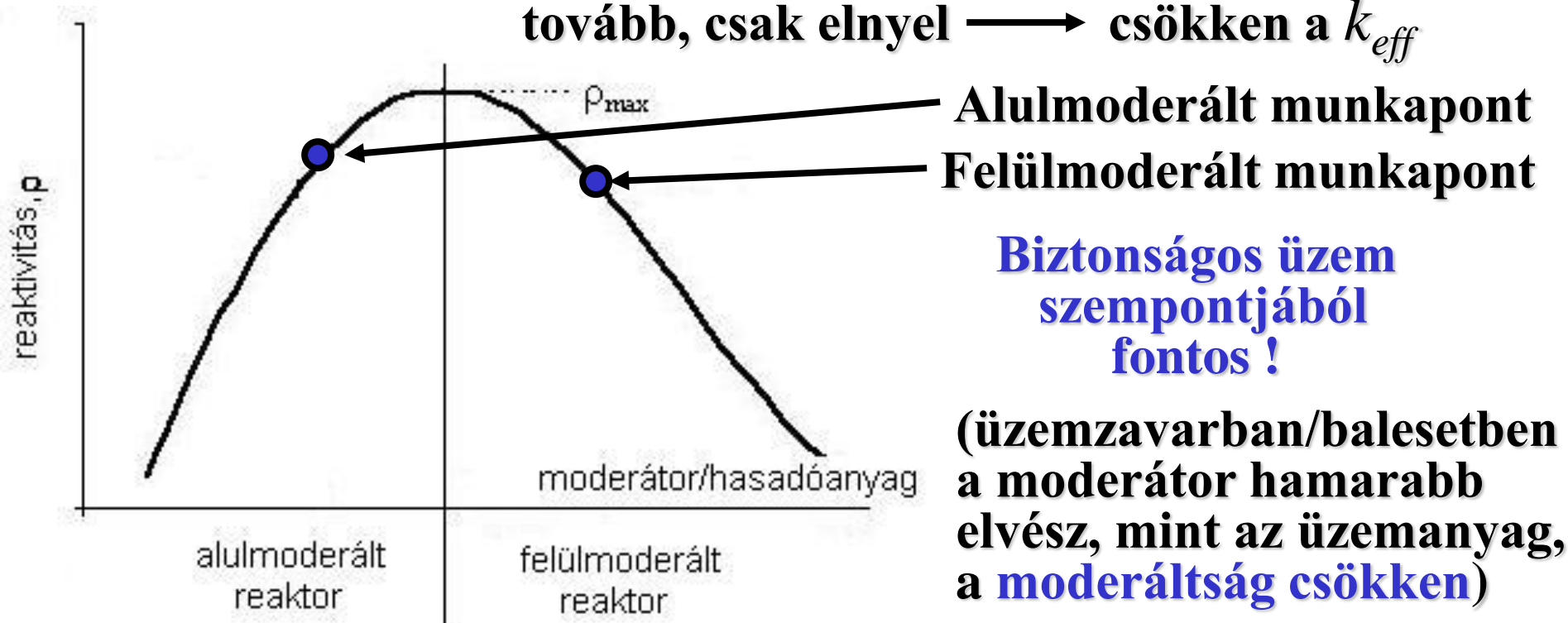
$$k_{eff} = \eta \cdot p \cdot f \cdot \varepsilon \cdot P$$

A reaktorban maradó
neutronhányad $P < 1$
(kiszökési faktor)

A **moderáltság** szempontjából fontos a rácsparaméter

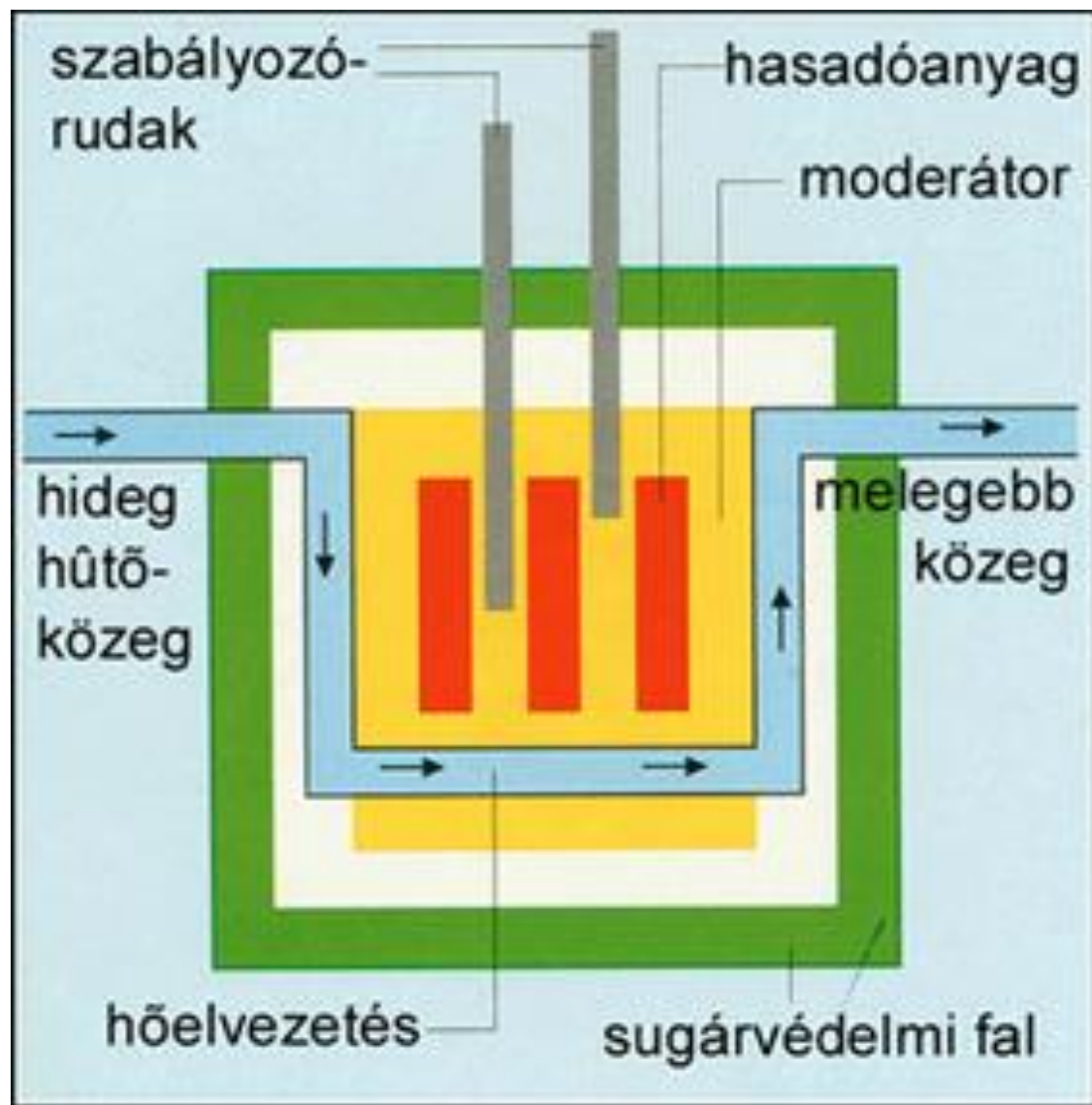
Túl sűrű rács \longrightarrow A neutronok nem lassulnak le eléggé a pálcák között $\longrightarrow k_{eff}$ (ill. ρ) még nőhetne

Túl ritka rács \longrightarrow A moderátor-fölösleg már nem lassít tovább, csak elnyel \longrightarrow csökken a k_{eff}



Atomreaktor elvi felépítése

- **üzemanyag**
(urán, plutónium, MOX)
- **moderátor**
(víz, nehézvíz, grafit)
- **hűtőközeg**
(folyadék, gáz)
- **szabályozó elemek**
(bóracél rudak, hűtőközegben oldott bórsav)
- **biológiai védelem**
(beton, nehézbeton)
- **üzemzavari és biztonságvédelmi berendezések**



Egy kis történelem:

1932 Neutron felfedezése (James Chadwick)

1934 Neutronos láncreakció ötlete (Szilárd Leó)

1938 Maghasadás felfedezése

(Otto Hahn, Friedrich Strassmann, Lise Meitner)

1942 dec. 2. Első atommáglya (Chicago)

(Enrico Fermi, Szilárd Leó, Wigner Jenő)

1943 Hanfordi nagyteljesítményű atomreaktorok elindulnak

(Wigner Jenő) Cél: plutónium termelés

1939-1945 Manhattan Project (atomfegyver kifejlesztése)

tudományos vezető: Robert Oppenheimer

1945. július 16. Első kísérleti atomrobbantás („Trinity kísérlet”)

Alamogordo sivatag, USA ^{239}Pu -alapú bomba

1945. augusztus 6. Hiroshima bombatámadás (^{235}U -alapú bomba)

1945. augusztus 9. Nagasaki bombatámadás (^{239}Pu -alapú bomba)

1954 Első békés célú atomerőmű (Obnyinszk, Szovjetúnió, 5 MW_e)

1942 dec. 2. Első atommáglya (Chicago)

(Enrico Fermi, Szilárd Leó, Wigner Jenő, ...)

Üzemanyag: természetes urán (fém gömbök)

Moderátor: tiszta grafit

Szabályozó elemek: kadmium lemezek

Hűtőközeg: nincs (max. teljesítmény 2 W)



Hogyan lehet megközelíteni a kritikus állapotot?

(Csak „kicsivel” szabad túllépni, nehogy prompt-kritikus legyen!)

Kiindulás: $k_{eff} = \frac{N_{i+1}}{N_i}$

Ebből: $N_{i+1} = k_{eff} \cdot N_i$ akkor, ha **csak** n-szorzás van!

Tegyünk be egy neutronforrást is, amelynek intenzitása olyan, hogy S neutron bocsát ki egy generációs idő alatt!

Ekkor: $N_{i+1} = S + k_{eff} \cdot N_i$

forrásból előző generációból

Amíg $k_{eff} < 1$ előbb-utóbb egyensúly áll be, azaz $N_{i+1} = N_i = N_{egy}$

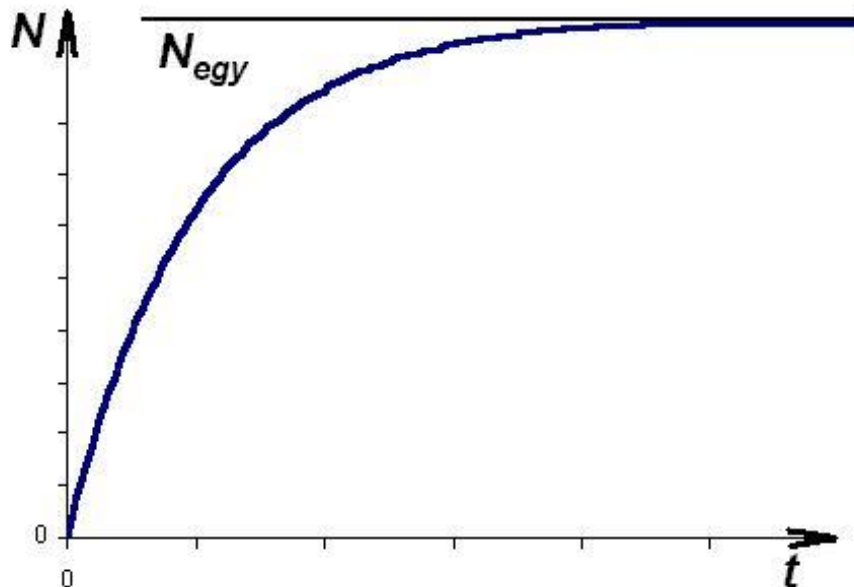
azaz $N_{egy} = S + k_{eff} \cdot N_{egy}$ amiből

Ezzel k_{eff} mérhetővé válik!!

$$N_{egy} = \frac{S}{1 - k_{eff}}$$

Amíg $k_{eff} < 1$
egyensúly áll be:

$$N_{egy} = \frac{S}{1 - k_{eff}}$$



Amikor túlléptünk a
kritikus állapoton,
exponenciális növekedés
indul be:
„exponenciális kísérlet”

