

9. előadás

TARTALOMJEGYZÉK

- Hasadási gát
- Hasadási neutronok. Prompt neutronok és késő neutronok
- Láncreakció neutronokkal
- Négy-faktor formula
- Az atomreaktorok osztályozása
- Az atomenergetika kezdetei (történelem)
- A láncreakció beindítása

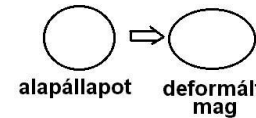
2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

1

Hasadási gát

A maghasadás az atommag kis deformációjával **kezdődik**.
(deformációs paraméter: ε)



Mennyi energia kell ehhez?

Az energiaváltozást a Weizsäcker-képlet alapján vizsgáljuk:

$$B = \boxed{b_V A} - \boxed{b_F \cdot A^{2/3}} - \boxed{b_C \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}}} + \boxed{b_A \cdot \frac{(N-Z)^2}{A} + b_p \cdot \delta \cdot A^{-3/4}}$$

Deformáció során

- térfogat = állandó,
- aszimmetria, párosság = állandónak vesszük
- **felület** $\rightarrow$ **nő** $b_F A^{2/3} \Rightarrow b_F A^{2/3} (1 + a_F \cdot \varepsilon)$
- **Coulomb-energia** $\rightarrow$ **csökken** $b_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} \Rightarrow b_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} (1 - a_C \cdot \varepsilon)$
(protonok messzebb kerülnek)

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

2

Pontos számítások szerint az arányossági tényezők:

$$a_F \sim 0,025 \text{ és } a_C \sim 0,012.$$

Az energia megváltozása tehát:

$$\Delta E = \left(0,025 \cdot b_F \cdot A^{2/3} - 0,012 \cdot b_C \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} \right) \cdot \varepsilon$$

Ha $\Delta E < 0$, akkor akármilyen kis ε deformáció energianyereséges, a mag **spontán elhasad!**

$$\left(0,025 \cdot b_F \cdot A^{2/3} - 0,012 \cdot b_C \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} \right) < 0 \text{ -ből: } \boxed{\frac{Z^2}{A} \geq \frac{0,025 \cdot b_F}{0,012 \cdot b_C} \approx 54}$$

(mivel $b_F = 2,85 \cdot 10^{-12} \text{ J}$, $b_C = 0,11 \cdot 10^{-12} \text{ J}$)

A nagy atommagoknál $Z/A \sim 0,39$, ezért $Z > 136$ esetén nincs a maghasadásnak „aktiválási energiája”. (Valójában már $Z \sim 110$ környékén olyan kicsi az aktiválási energia, hogy az atommagok alagúteffektussal igen gyorsan, spontán elhasadnak)

A Periódusos Rendszernek a maghasadás miatt van vége!!!

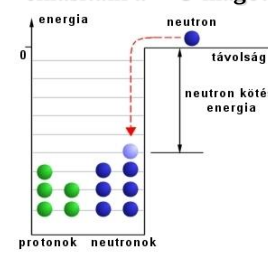
2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

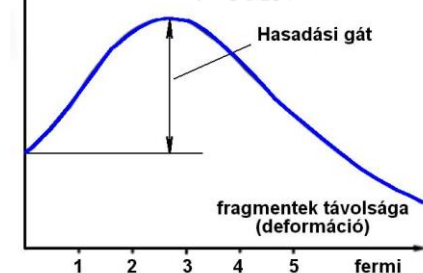
3

$Z < 136$ esetén tehát kis deformációkhoz energia befektetése szükséges ($\Delta E > 0$) $\rightarrow$ **hasadási gát**

Hogyan képes lassú (kis energiájú) neutron elhasítani a ^{235}U magot?



Az urán környékén a hasadási gát magassága $\sim 7 - 8 \text{ MeV}$



A neutron **kötési energiája** fedezi a hasadás aktiválási energiáját!

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

4

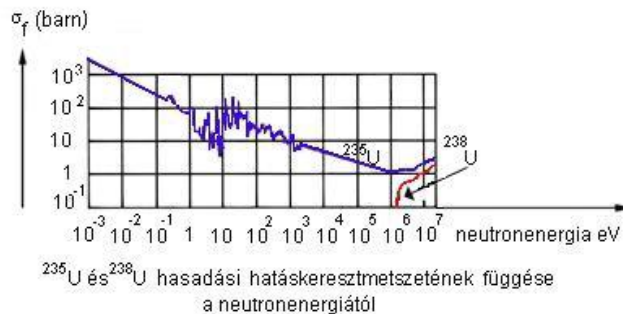
Párenergia fontossága:

$^{235}\text{U} + n$ –ből páros-páros mag lesz (^{236}U) $\longrightarrow$ nagyobb Q

$^{238}\text{U} + n$ –ből páratlan-páros mag lesz (^{239}U) $\longrightarrow$ kisebb Q

Emiatt $^{235}\text{U} + n$ **kis energiájú neutronnal** is elhasad,

$^{238}\text{U} + n$ –nál **küszöbenergia** van ($\sim 0,8 \text{ MeV}$)



2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

5

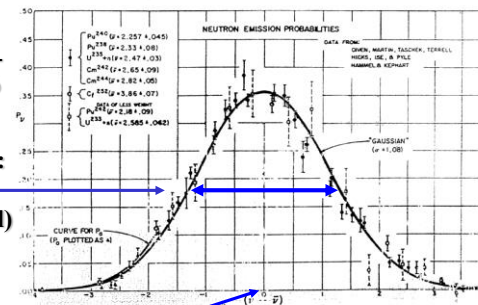
Hasadási neutronok

Láttuk: stabil magokhoz képest **túl sok a neutron** a maghasadás után $\longrightarrow$ **szükségszerű neutronok kibocsátása**

A kibocsátott neutronok száma nem állandó, egy várható érték körül ingadozik. Gauss-eloszlással jól közelíthető.

A várható érték függ a neutron energiájától, és a hasadó magtól is.

Félérték-szélesség:
 $\sim 2,5$
(nem függ a magtól)



Várható érték: $\bar{\nu} = 2,43$ ($^{235}\text{U} + n_{th}$ hasadásánál)

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

6

Neutronok időbeli megjelenése

(a maghasadás pillanatához viszonyítva)

a) Prompt (azonnali) neutronok

A neutronok legnagyobb része a maghasadás „pillanatában” kilép. Ezek a prompt (azonnali) neutronok ($t < 10^{-16} \text{ s}$).

Átlagenergiájuk $\sim 2 \text{ MeV}$

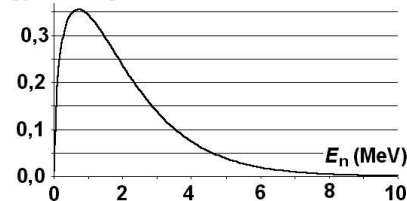
Energia-eloszlás:
„Watt-spektrum”

$$N(E_n) \sim 0,484 \cdot e^{-E_n/E_0} \cdot \sinh \sqrt{2 \frac{E_n}{E_0}}$$

gyakoriság

Watt-spektrum

($E_0 = 1 \text{ MeV}$)



2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

7

b) Késő („delayed”) neutronok

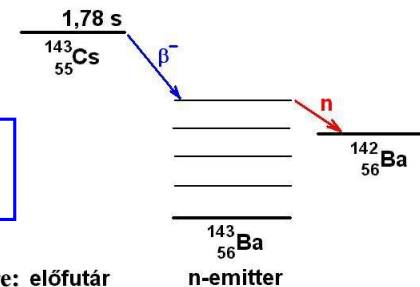
Láttuk: stabil magokhoz képest **túl sok a neutron** a maghasadás után $\longrightarrow$ **nagy neutronszámú** hasadványok jönnek létre. Ezek mind β^- -bomlók.

Néhány esetben előfordul, hogy a β^- - bomlás után olyan mag jön létre, amely neutronbomló $\longrightarrow$ **késő neutron**

Egy lehetséges példa:

(A neutron 1,78 s felezési idővel lép ki!)

Sok ilyen bomlás van, különböző felezési idők, különböző hozamok



Figyeljünk az elnevezésekre: előfutár

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

8

A késő neutronokat 6 csoportra bontják (felezési idő szerint)

	$E_n(\text{MeV})$	$T_i(\text{s})$	$\beta_i(\%)$	Tipikus előfutárok
1	0,25	56	0,020	^{87}Br , ^{142}Cs
2	0,56	23	0,143	^{88}Br , ^{137}I
3	0,43	6,2	0,128	^{89}Br , ^{138}I
4	0,62	2,3	0,255	^{94}Kr , ^{139}I , ^{143}Cs
5	0,42	0,6	0,074	^{140}I , ^{145}Cs
6	0,51	0,2	0,030	^{87}As , ^{143}Xe

Összesen: $\beta = 0,65\%$

Késő neutron hányad: $\beta = \frac{(\text{késő } n)}{(\text{összes } n)} \sim \frac{(\text{késő } n)}{(\text{prompt } n)}$

A késő neutronok időbeli megjelenése a hasadás után:

$$N(t) = \sum_{i=1}^6 \beta_i \cdot e^{-\ln 2 \cdot \frac{t}{T_i}}$$

Szerepük nagyon fontos a láncreakció szabályozásában!!

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

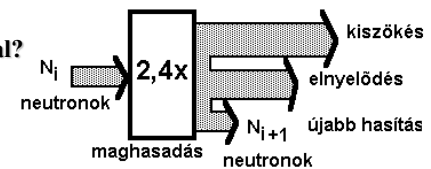
9

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

Ha $\begin{cases} k_{eff} < 1, & \text{a láncreakció csökkenő („szubkritikus”)} \\ k_{eff} = 1, & \text{a láncreakció stacionárius („kritikus”)} \\ k_{eff} > 1, & \text{a láncreakció növekvő („szuperkritikus”)} \end{cases}$

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

10

A láncreakció 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:

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

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

11

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 $k_{eff} = 1,001$

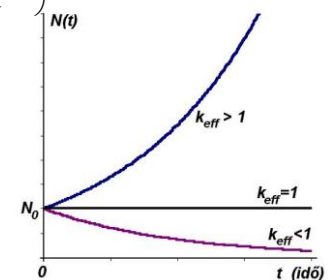
A neutrons szám (és a reaktor teljesítményének) változása

1 s alatt:

$$N(1) = N_0 \cdot e^{\frac{1,001-1}{0,0001}} = N_0 \cdot e^{10} = 22026 \cdot N_0$$

Nem szabályozható! (prompt-kritikus)

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



2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

12

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 \$ (dollar).

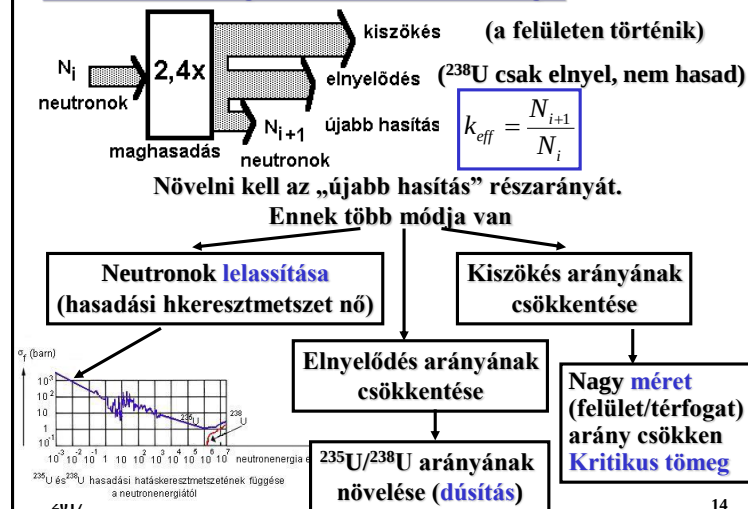
$$1 \$ \text{ a reaktivitás, ha } \frac{\rho}{\beta} = 1$$

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

13

Láncreakció megvalósításának lehetőségei



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

sugárzásos befogással: $^1\text{H} + n \longrightarrow ^2\text{H} + \gamma$

Az öfenntartó láncreakció megvalósíthatósága:

Üzemanyag (dúsitás)	Neutronlassító (moderátor)
Természetes urán (0,71% ^{235}U)	Nhéésvíz, tiszta grafit
3-5%-ra dúsitott urán	Könnyűvíz
>40%-ra dúsitott urán (>90%)	Nem kell moderátor (atomfegyver)

Fontos megjegyezni: a moderátor SEGÍTI a láncreakciót!

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

15

Mitől függ a k_{eff} ?

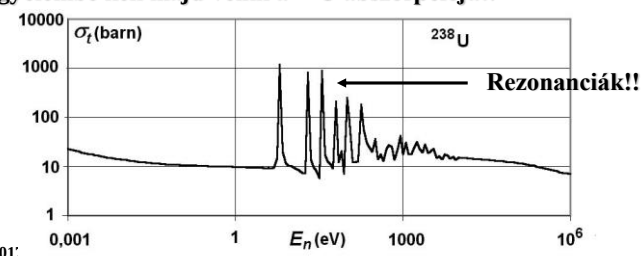
Egyelőre tekintsünk el a **kiszökéstől** $\longrightarrow$ „végtelen nagy” reaktor!

Ennek jellemzője lesz: k_{∞}

A reaktorunk jellemzői:

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

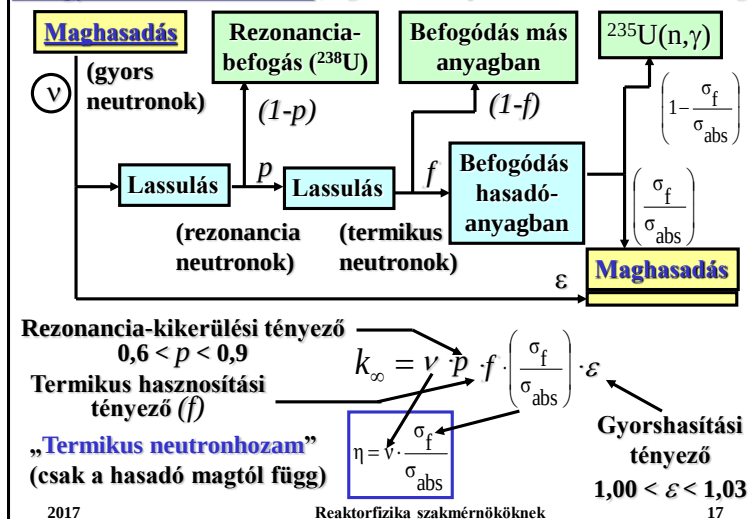
Figyelembe kell majd venni a ^{238}U abszorpcióját:



2017

16

„Négy-faktor” formula (végtelen kiterjedésű n-szorzozó közeg)



„Négy-faktor” formula (folyt.)

Összefoglalva: $k_{\infty} = \eta \cdot p \cdot f \cdot \epsilon$

Termikus neutronhozam
 Rezonancia-kikerülési tényező
 Gyorshasítási 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 faktorról mennyit kell elérni!
 Pl. természetes urán üzemanyagra $p \cdot f \cdot \epsilon > 1/1,34 = 0,746$, különben végtelen nagy reaktornál sem lehet önfenntartó láncreakció

2017 Reaktorfizika szakmérnököknek 18

Rezonancia-kikerülés: inhomogén atomreaktor (Szilárd Leó ötlete)

kis átmérőjű üzemanyagpálcákból álló rács
 hasadási gyors neutronok kijönnek belőle
 moderátorban lelassulnak
 (átvészeli a rezonancia-tartományt)
 lassú neutronként diffundálnak vissza.

Példa: Paksi Atomerőmű üzemanyaga



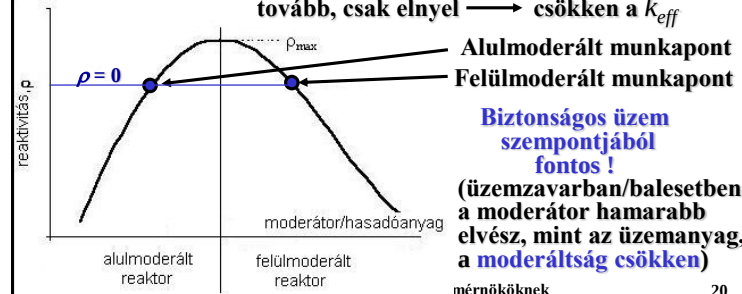
Véges méretű reaktor, kiszökés figyelembe vétele

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

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

A moderáltság szempontjából fontos a rácsparaméter

Túl sűrű rács → A neutronok nem lassulnak le eléggé a pálcák között → k_{eff} (ill. ρ) még nőhetne
 Túl ritka rács → A moderátor-főlésség már nem lassít tovább, csak elnyel → csökken a k_{eff}



Az atomreaktorok osztályozása

• Cél szerint

- kísérleti reaktorok
(izotóp előállítás, magfizikai kutatás, oktatás)
- erőművi reaktorok
(energiatermelés)
- tenyésztő reaktorok
(új hasadóanyag előállítása, ld. később)
- impulzusreaktorok
(különleges magfizikai vizsgálatok)
- anyagvizsgáló reaktorok
(szerkezeti anyagok vizsgálata)

2017

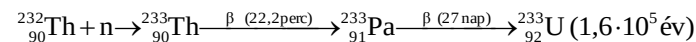
Reaktorfizika szakmérnököknek

21

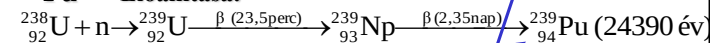
• Hasadóanyag szerint

- ^{235}U (különböző dúsítások)

- ^{233}U Előállítása:



- ^{239}Pu Előállítása:



Szaporítás! (Breeder) Hasadóanyagot „állítunk elő”

- MOX (mixed oxide fuel): urán és plutónium oxid keverék
Jelentősége: atomfegyverekből származó ^{239}Pu megsemmisítése

• Üzemanyag elrendezése szerint

- homogén reaktorok (hasadóanyag és moderátor elkeverve)
- heterogén reaktorok (hasadóanyag szétválasztva a moderátortól)

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

22

• Moderátor szerint

- H_2O (könnyűvíz)
- D_2O (nehésvíz)
- C („reaktortisztaságú” grafit)
- Be (berillium)
- szerves anyag (C és H)

• Hűtőközeg szerint

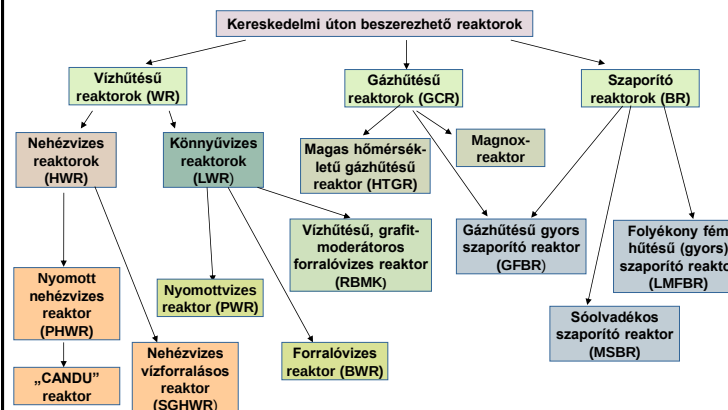
- H_2O (könnyűvíz)
- D_2O (nehésvíz)
- folyékony fém (Na, Pb...)
- gáz (He, CO_2)
- szerves anyag

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

23

A jelenleg üzemelő reaktortípusok (elvi – technológiai) jellegű csoportosítása



2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

24

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, Szovjetunió, 5 MW)

2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

25

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)



2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

26

A reaktor első indítása, a kritikus állapot megközelítése

(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-sokszorozás van!

Tegyük be egy neutronforrást is, amelynek intenzitása olyan, hogy S neutront 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

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

Ezzel k_{eff} mérhetővé válik!!

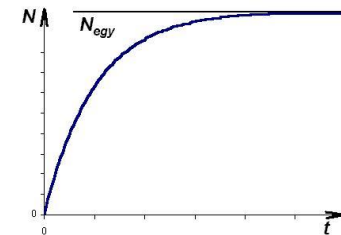
2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

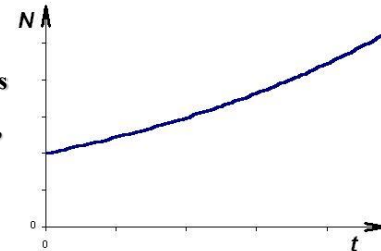
27

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”



2017

Reaktorfizika szakmérnököknek

28