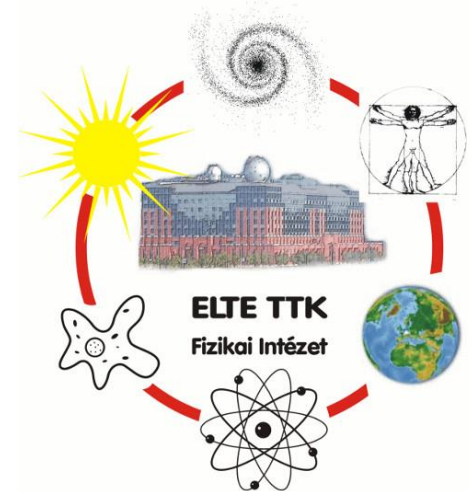


Természetes atomreaktor egy afrikai uránbányában

Horváth Ákos

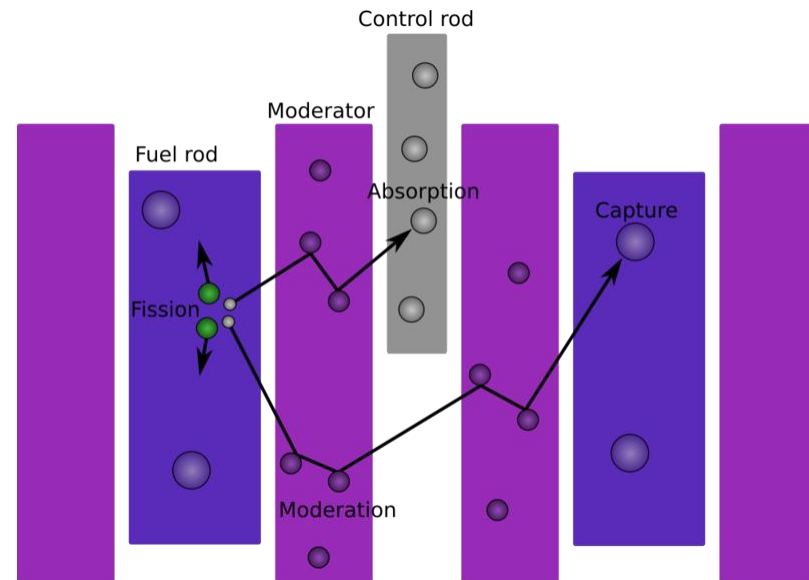
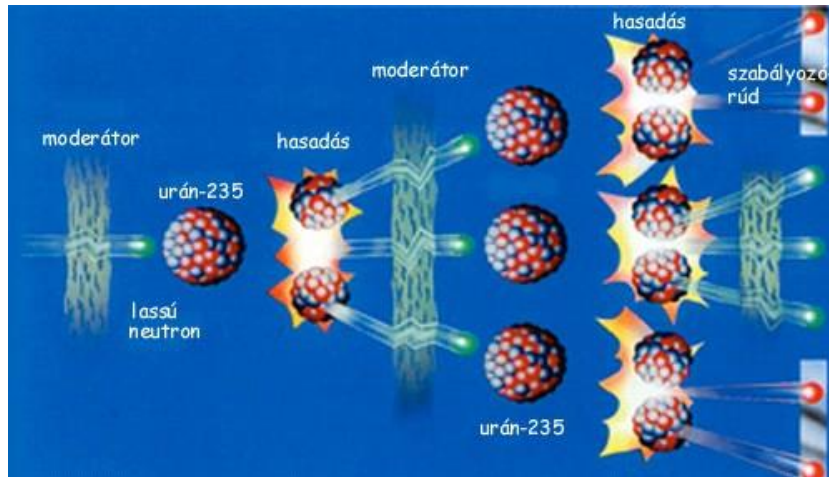
ELTE Atomfizikai Tanszék

2021. november 11.



Atomreaktorok

- Atomreaktorok
 - **emberi találmány**, 1942 Chicago, Enrico Fermi
 - Láncreakció Szilárd Leó
 - A világ energiatermelésének fontos része
- Például: Paks, Mohovce



Atomreaktorok

- Energiatermelés
 - GW-os erőművek, teljesítmény, villamos energia
 - 2 kW/ház, 1 millió ház energiaigénye
 - ipari felhasználás, energia szállítás nagy feladat
- Paks, 500 MW, 50 év (9000 óra)
 - Összesen $500 \times 50 \times 9000$ MWh = 225 TWh
- Ország életszínvonalára emelkedik \leftrightarrow rizikó is lesz



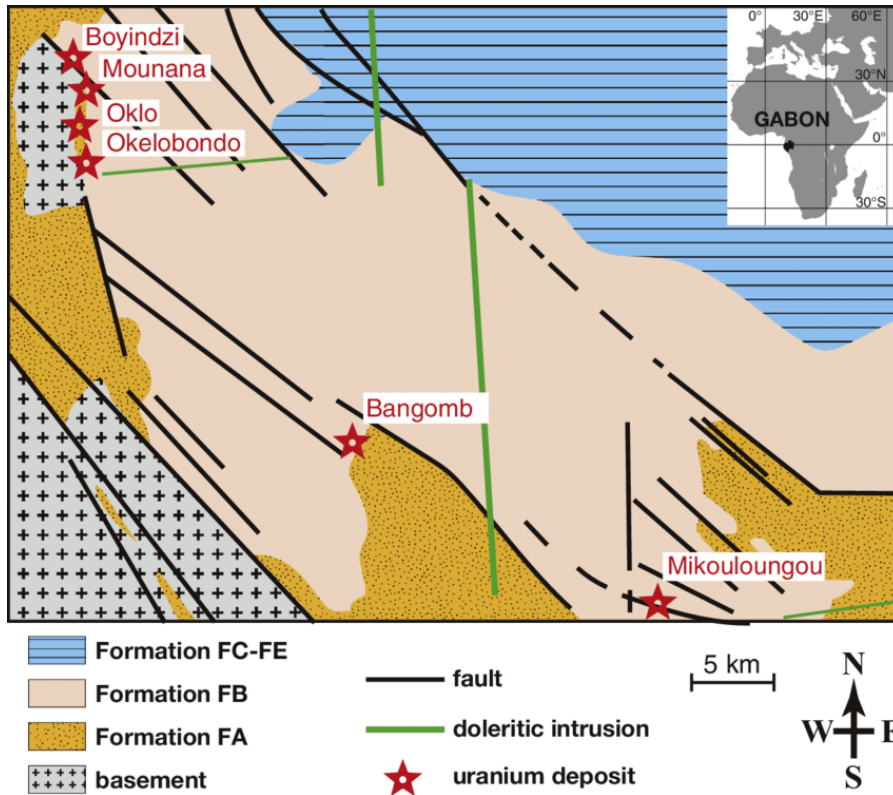
A jelenség előrejelzése

- **1956** Prof. Paul Kuroda, Imperial University of Tokyo
 - Az uránérc vastagsága legalább 1 méter legyen
 - A ^{235}U gyakorisága 1% felett legyen
 - Víz elárasztás szükséges a moderáláshoz
 - Ne legyen bór és litium a kőzetben

A jelenég felfedezése

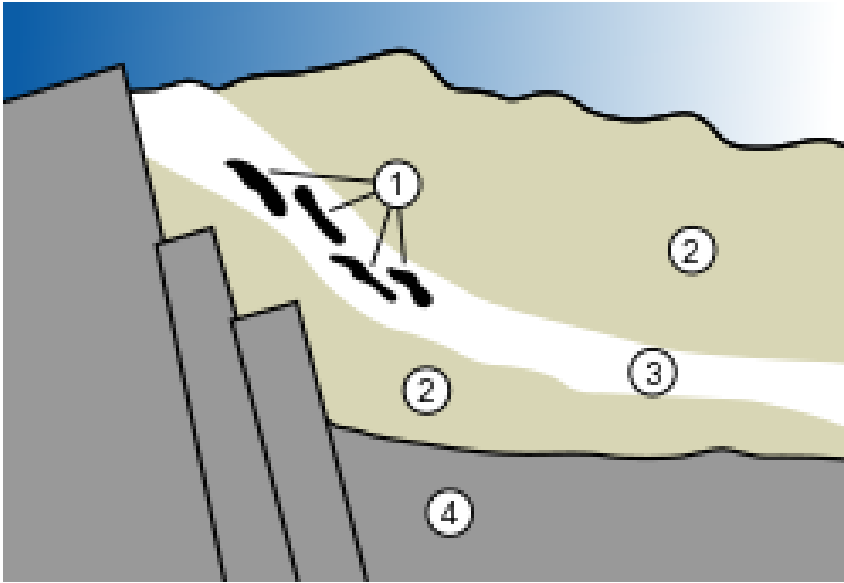
- **1972** Dr. Francis Perrin, Gabon uránbánya
 - ^{235}U és a ^{238}U aránya nem a szokásos
 - 19 helyen is megmérték ezt az effektust
 - 0,72% helyett \rightarrow 0,716% gyakoriság (0,6%)
 - 200 kg ^{235}U hiányzott,
- Magyarázat: természetes hasadás & láncreakció
 - ≈ 4 t uránt felhasználtunk volna

Helyszín



Gabon, Egyenlítői Afrika

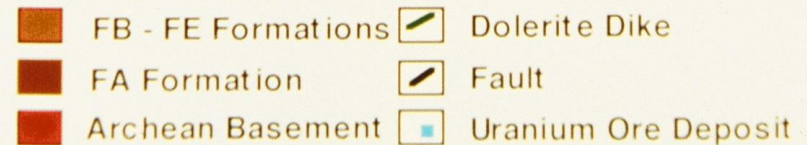
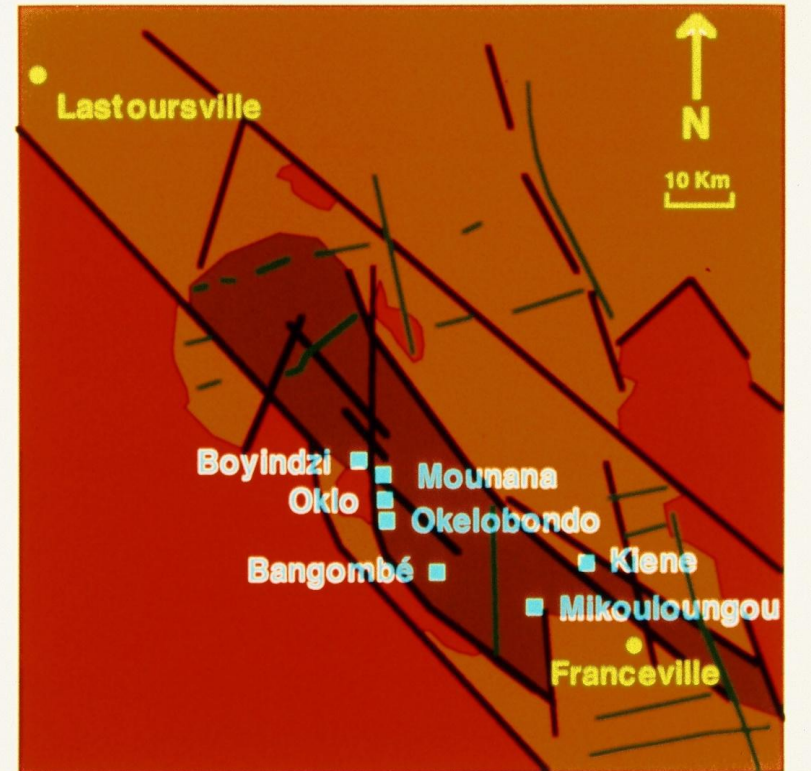
Helyszín geológiája



Az oklói természetes nukleáris reaktorok:

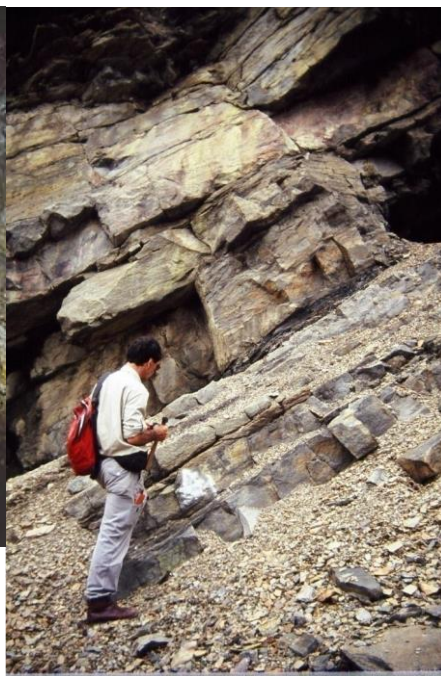
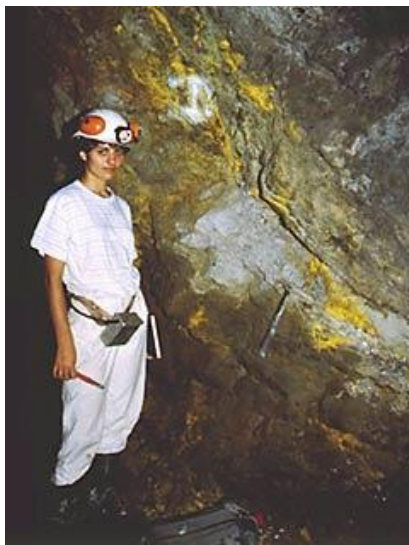
- (1) Nukleáris reaktor zónák,
- (2) Homokkő,
- (3) Uránérc,
- (4) Gránit

Generalized Geologic Map of Southeastern Gabon

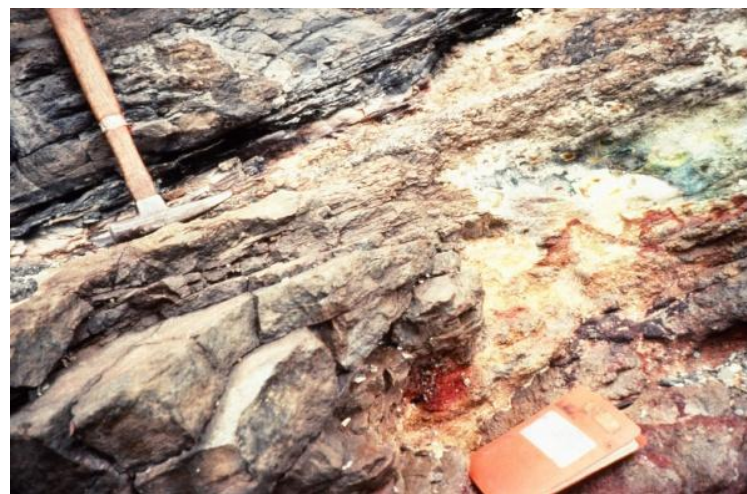


Helyszín

A magasabb
hőmérséklet miatt
megolvadt kőzetek



Palás kőzet
agyag



Az urán izotópok aránya

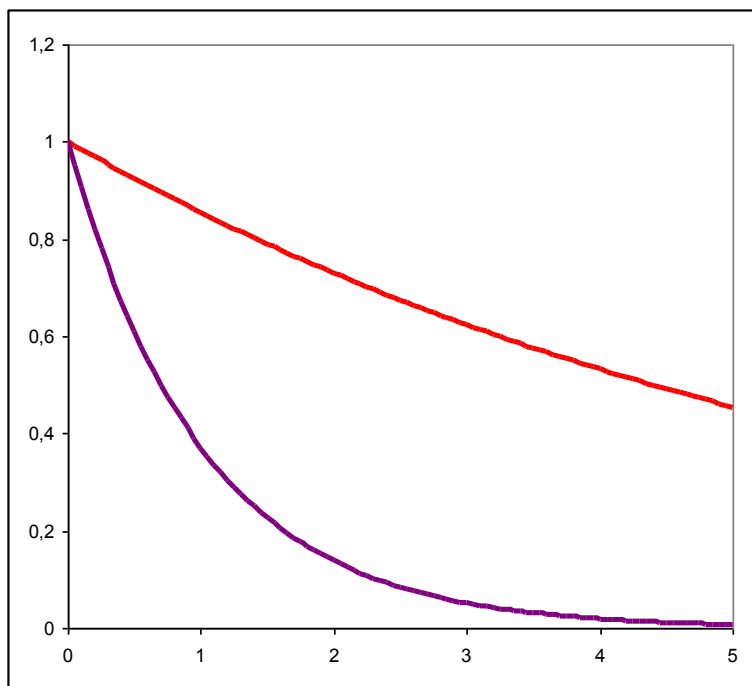
^{235}U 92p+143n

$T_{1/2} = 0,7$ milliárd év

^{238}U 92p+146n

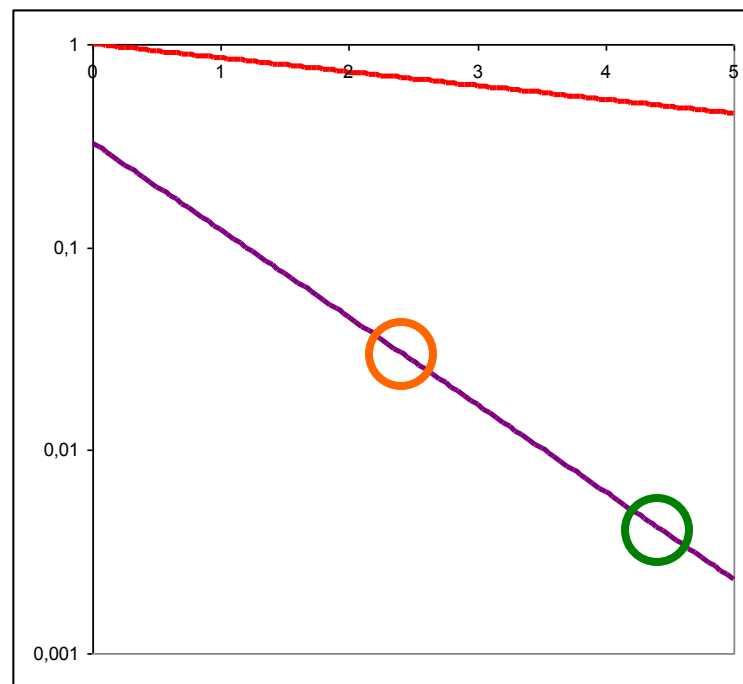
$T_{1/2} = 4,4$ milliárd év

Urán darab



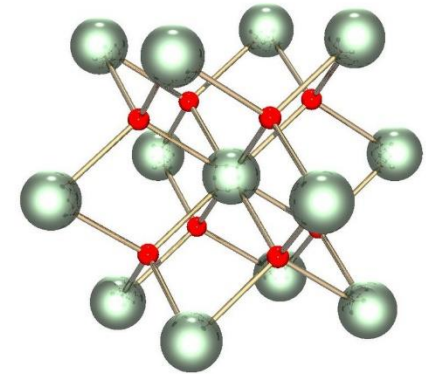
Eltelt idő Gév

Arány (logaritmikusan)



Eltelt idő Gév

Természetes reaktor feltételei



- 1% feletti uránérc,
20-60%-os uránérc UO_2
3%-os dúsulás
- Lencse típusú geometriában vált ki az urán
- Közeli víz és átjárható, repedezett kőzetek
- Nincs neutronelnyelő elem
- ^{239}Pu keletkezett, 45%-a a hasadásnak ebből jött

A reaktor zónák

Reactor zones ^a	Size (length × width) (m × m)	Thickness of the core (cm)	Maximum UO ₂ (%)	Maximum ²³⁵ U/ ²³⁸ U depletion (%)
RZ1	40 × 18	20–30	40	0.409
RZ2	12 × 18	20–50 locally 100	50–60	0.292
RZ7-8-9	Total length 30	A few	25–30	0.543 RZ9 0.579 RZ7
RZ10	27 × 30 × 15	a few to 100	65	0.479
RZ13	10 × 6	20–30	87	0.380
Bangombe	1.5 km ²	5–15	54	0.590

^a The region that show the anomaly in isotopes of uranium. They are considered

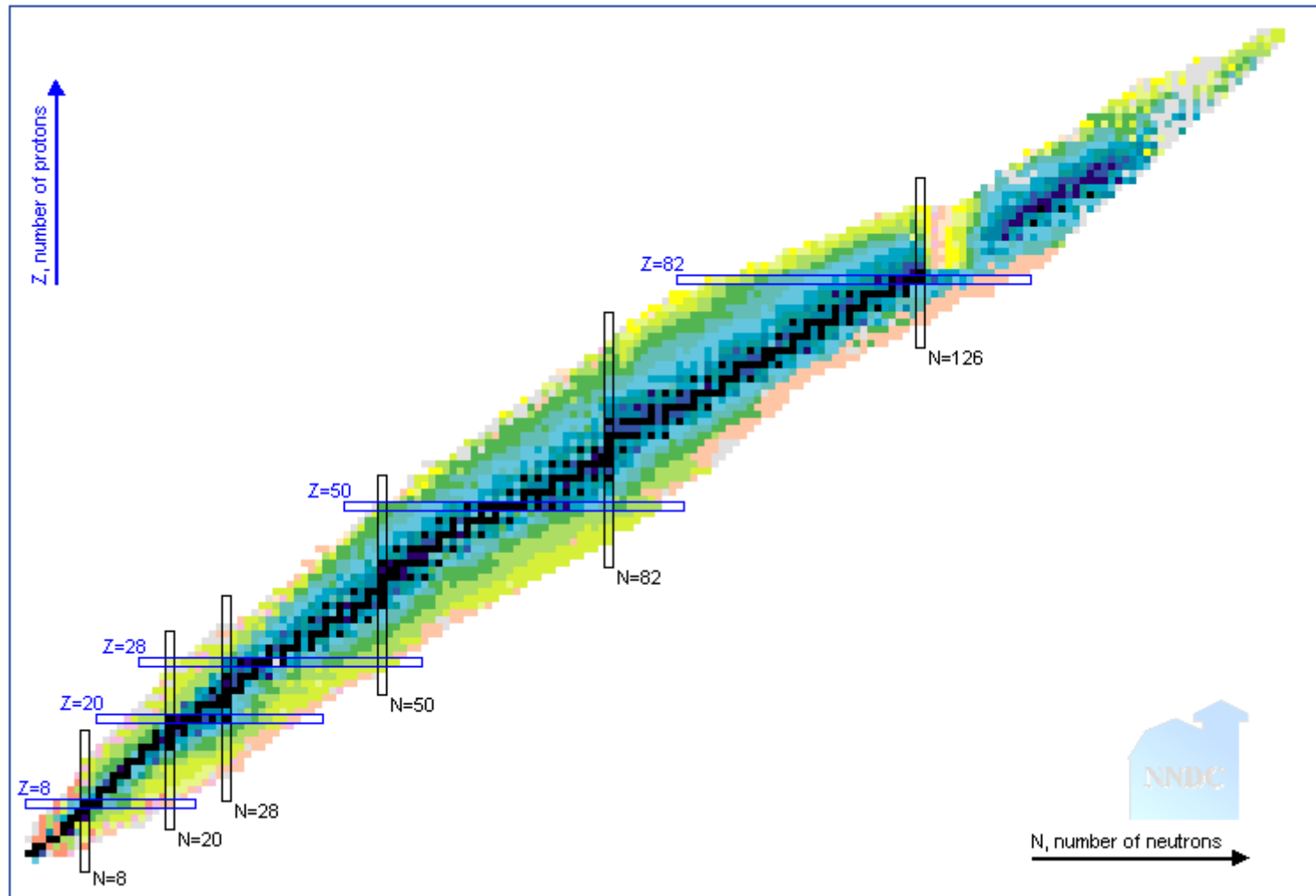
A reaktor működése

- 1,8 milliárd éve keletkezett az uránérc
- Impulzus üzemmódban működött
- $k = \rho / \beta$
- Saját szabályozás: elforr a moderátor leáll a láncreakció, 30 percig ment, 2,5 óráig pihent
- Közben a hasadvány atommagok keletkeznek és béta bomlással bomlanak stabil atommaggá
- Új izotópok keletkeznek és elállítják a természetes izotóp gyakoriságot

A reaktor működése

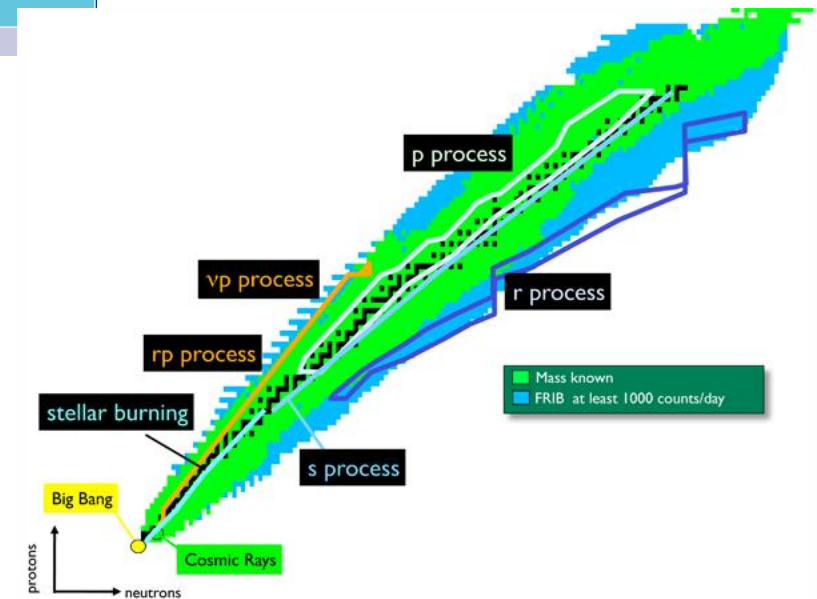
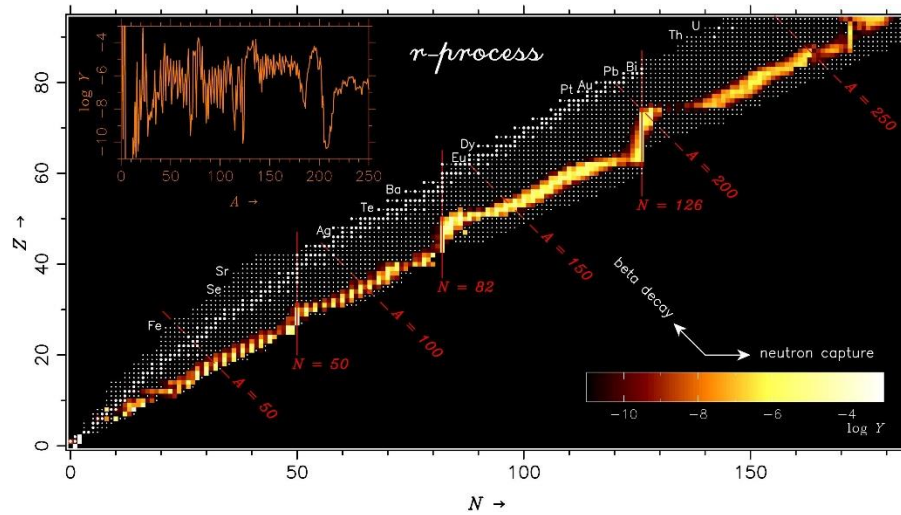
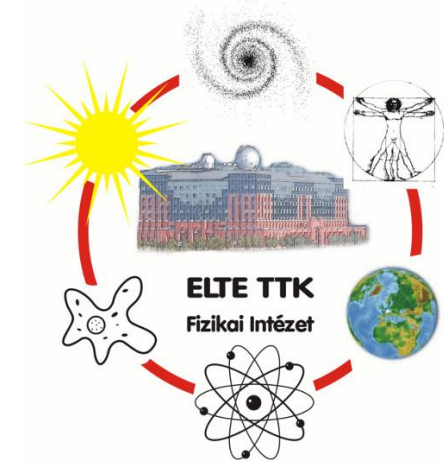
- 20-800 ezer évig működtek
- kb. 2 milliárd éve
- 100 kW teljesítmény átlagosan
- kb. 90 TWh energiát termeltek összesen
- Ennek megfelelő radioaktív hulladék keletkezett
- Bangombé régióban a felszín közelében vannak az uránlencsék

Izotópgyakoriságok

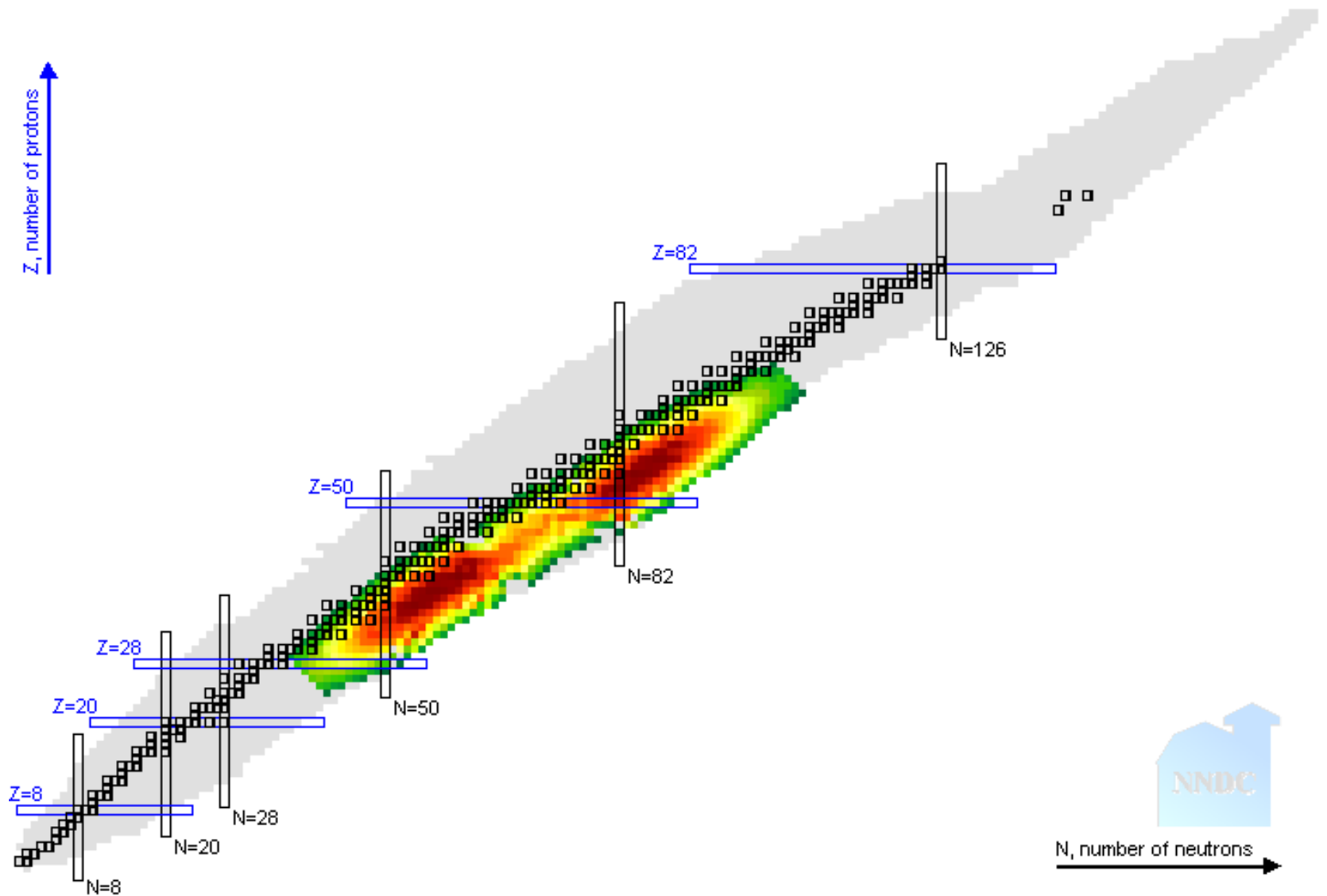


Természetes izotópgyakorítás

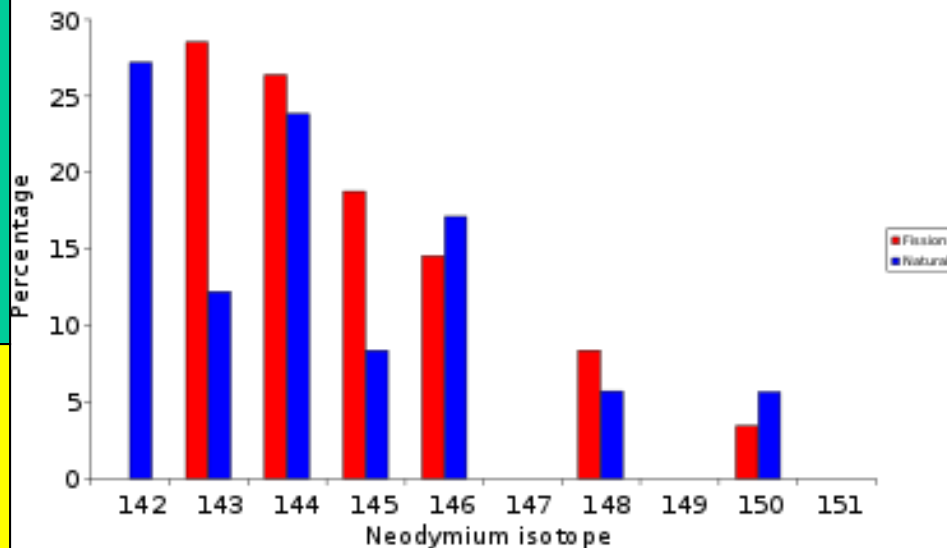
Z	¹⁴⁵ Eu 5.93 D ε: 100.00%	¹⁴⁶ Eu 4.61 D ε: 100.00%	¹⁴⁷ Eu 24.1 D ε: 100.00% α: 2.2E-3%	¹⁴⁸ Eu 54.5 D ε: 100.00% α: 9.4E-7%	¹⁴⁹ Eu 93.1 D ε: 100.00%	¹⁵⁰ Eu 36.9 Y ε: 100.00%	¹⁵¹ Eu ≥1.7E+18 Y 47.81% α	¹⁵² Eu 13.517 Y ε: 72.10% β ⁻ : 27.90%	¹⁵³ Eu STABLE 52.19%
62	¹⁴⁴ Sm STABLE 3.07%	¹⁴⁵ Sm 340 D ε: 100.00%	¹⁴⁶ Sm 10.3E+7 Y α: 100.00%	¹⁴⁷ Sm 1.060E11 Y 14.99% α: 100.00%	¹⁴⁸ Sm 7E+15 Y 11.24% α: 100.00%	¹⁴⁹ Sm STABLE 13.82%	¹⁵⁰ Sm STABLE 7.38%	¹⁵¹ Sm 90 Y β ⁻ : 100.00%	¹⁵² Sm STABLE 26.75%
61	¹⁴³ Pm 265 D ε: 100.00%	¹⁴⁴ Pm 363 D ε: 100.00%	¹⁴⁵ Pm 17.7 Y ε: 100.00% α: 2.8E-7%	¹⁴⁶ Pm 5.53 Y ε: 65.70% β ⁻ : 34.30%	¹⁴⁷ Pm 2.6234 Y β ⁻ : 100.00%	¹⁴⁸ Pm 5.368 D β ⁻ : 100.00%	¹⁴⁹ Pm 53.08 H β ⁻ : 100.00%	¹⁵⁰ Pm 2.698 H β ⁻ : 100.00%	¹⁵¹ Pm 28.40 H β ⁻ : 100.00%
60	¹⁴² Nd STABLE 27.152%	¹⁴³ Nd STABLE 12.174%	¹⁴⁴ Nd 2.29E+15 Y 23.798% α: 100.00%	¹⁴⁵ Nd STABLE 8.293%	¹⁴⁶ Nd STABLE 17.189%	¹⁴⁷ Nd 10.98 D β ⁻ : 100.00%	¹⁴⁸ Nd STABLE 5.756%	¹⁴⁹ Nd 1.728 H β ⁻ : 100.00%	¹⁵⁰ Nd 0.91E19 Y 5.638% 2β ⁻
59	¹⁴¹ Pr STABLE 100%	¹⁴² Pr 19.12 H β ⁻ : 99.98% ε: 0.02%	¹⁴³ Pr 13.57 D β ⁻ : 100.00%	¹⁴⁴ Pr 17.28 M β ⁻ : 100.00%	¹⁴⁵ Pr 5.984 H β ⁻ : 100.00%	¹⁴⁶ Pr 24.15 M β ⁻ : 100.00%	¹⁴⁷ Pr 13.4 M β ⁻ : 100.00%	¹⁴⁸ Pr 2.29 M β ⁻ : 100.00%	¹⁴⁹ Pr 2.26 M β ⁻ : 100.00%
	82	83	84	85	86	87	88	89	



Izotópgyakoriságok eltolódása



Izotópgyakoriságok eltolódása



Color code	Half-life	Decay Mode	Q _{β-}	Q _{EC}	Q _{β+}	S _n	S _p	Q _α	ΔQ _α	S _{2n}	S _{2p}	Q _{2β-}	Q _{2EC}	Q _{ECp}	Q _{β-n}
Q _{β-2n}	BE/A	(BE-LDM Fit)/A	Pair. gap	E _{1st ex. st.}	E ₂₊	E ₃	E ₄₊	E _{4+/E₂₊}	β ₂	B(E ₂) _{42/B(E₂)₂₀}	σ(n,γ)	σ(n,f)	235U FY	239Pu FY	252Cf FY
Z	141Nd 2.49 H ε: 100.00%	142Nd STABLE 27.152%	143Nd STABLE 12.174%	144Nd 2.29E+15 Y 23.798% α: 100.00%	145Nd STABLE 8.293%	146Nd STABLE 17.189%	147Nd 10.98 D β-: 100.00%	148Nd STABLE 5.756%	149Nd 1.728 H β-: 100.00%						
59	140Pr 3.39 M ε: 100.00%	141Pr STABLE 100%	142Pr 19.12 H β-: 99.98% ε: 0.02% 2.3E+11	143Pr 13.57 D β-: 100.00%	144Pr 17.28 M β-: 100.00%	145Pr 5.984 H β-: 100.00%	146Pr 24.15 M β-: 100.00%	147Pr 13.4 M β-: 100.00%	148Pr 2.29 M β-: 100.00%						
58	139Ce 137.641 D ε: 100.00%	140Ce STABLE 88.450%	141Ce 32.511 D β-: 100.00%	142Ce >5E+16 Y 11.114% 2β-	143Ce 33.039 H β-: 100.00%	144Ce 284.91 D β-: 100.00%	145Ce 3.01 M β-: 100.00%	146Ce 13.49 M β-: 100.00%	147Ce 56.4 S β-: 100.00%						
57	138La 1.02E+11 Y 0.09881% ε: 65.60% β-: 34.40% 3.2E-7	139La STABLE 99.9119%	140La 1.67855 D β-: 100.00%	141La 3.92 H β-: 100.00%	142La 91.1 M β-: 100.00%	143La 14.2 M β-: 100.00%	144La 40.8 S β-: 100.00%	145La 24.8 S β-: 100.00%	146La 6.27 S β-: 100.00%						
56	137Ba STABLE 11.232%	138Ba STABLE 71.698%	139Ba 83.06 M β-: 100.00%	140Ba 12.7527 D β-: 100.00%	141Ba 18.27 M β-: 100.00%	142Ba 10.6 M β-: 100.00%	143Ba 14.5 S β-: 100.00%	144Ba 11.5 S β-: 100.00%	145Ba 4.31 S β-: 100.00%						
	1.3E-6	4.E-5	7.E-4	0.0049	0.0166	0.0301	0.0410	0.0397	0.0187						
	81	82	83	84	85	86	87	88	N						

Tools

Zoom: 1 (NDS), 2 (Standard), 3, 4 (Screen Size), 5 (Narrow), 6, 7 (Wide)

Uncertainty: On/Off

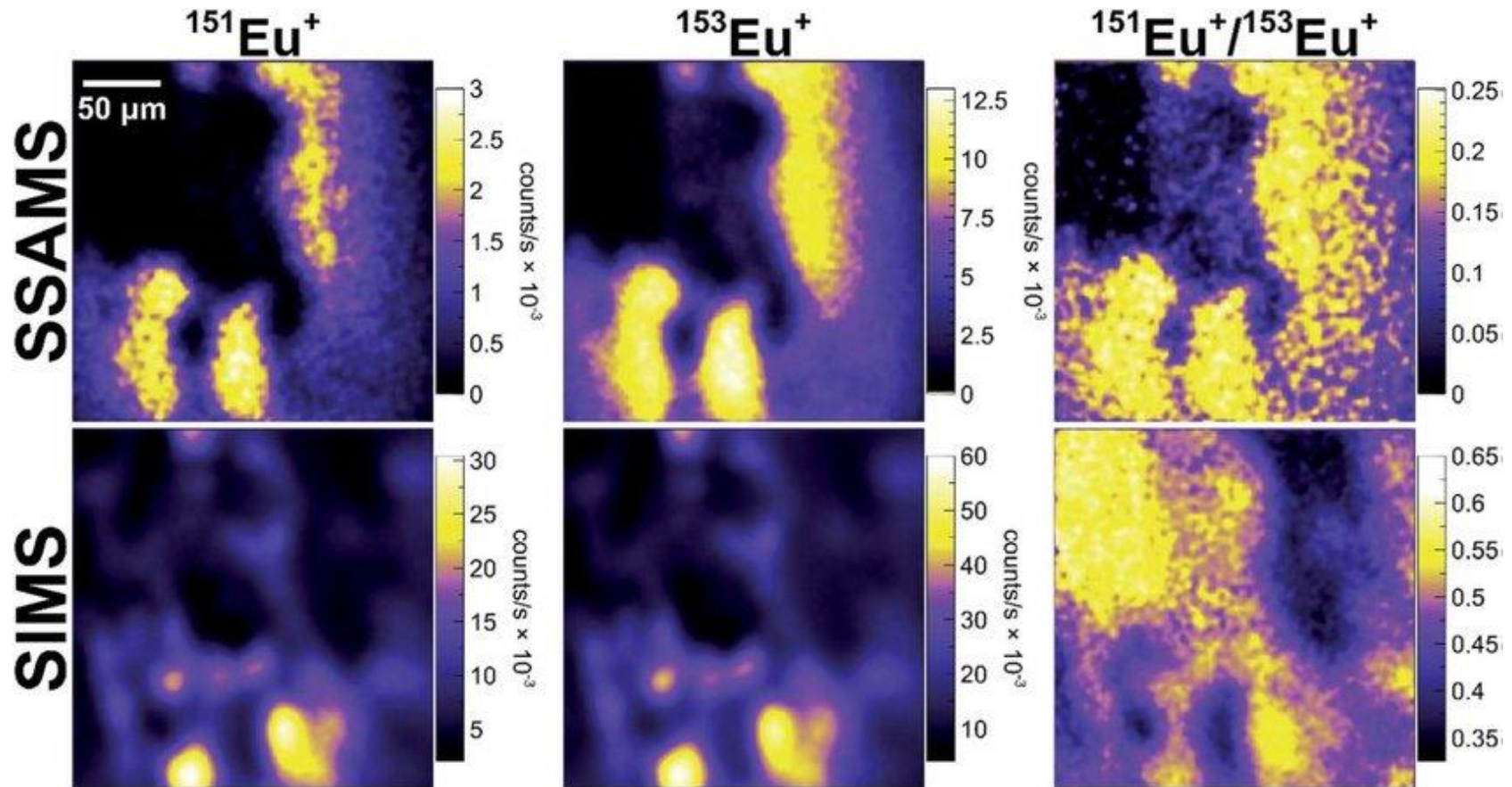
Screen Size: Standard/Narrow/Wide

Nucleus: go

probability: ≥1.00E-1, 1.00E-2, 1.00E-3, 1.00E-4, 1.00E-5, 1.00E-6, 1.00E-7, 1.00E-8, 1.00E-9, 1.00E-11, 1.00E-13, ≤1.00E-15, unknown

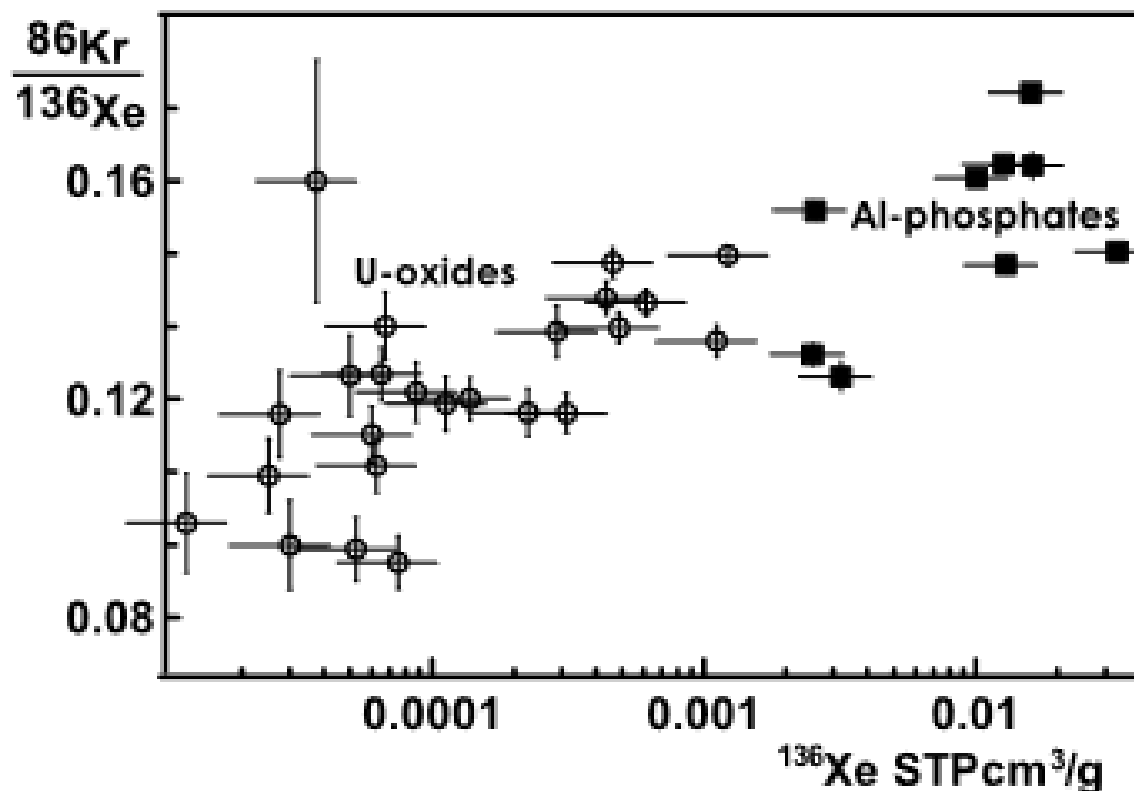
Izotópgyakoriságok eltolódása

$^{151}\text{Eu}/^{153}\text{Eu} \rightarrow 47,8\%/52,2\%$ kb. 1



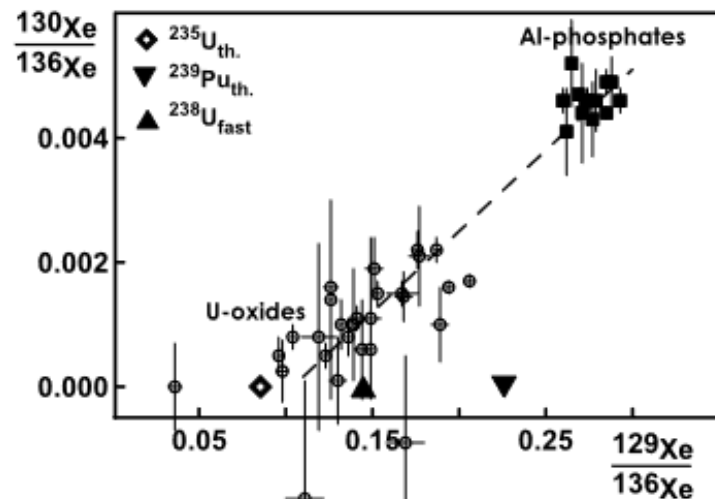
Izotópgyakoriságok eltolódása

- Nemesgáz tömegspektrometria, Xe-Kr



Neutronfluxus kimutatása

- Al-foszfátban több ^{130}Xe van
- ^{129}I -ből keletkezik neutron befogással



$2 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$

Color code	Half-life	Decay Mode	$Q_{\beta-}$	Q_{EC}	$Q_{\beta+}$	S_n	S_p	Q_{α}	ΔQ_{α}	S_{2n}	S_{2p}	$Q_{2\beta-}$	Q_{2EC}	Q_{ECp}	$Q_{\beta-n}$
$Q_{\beta-2n}$	BE/A	(BE-LDM Fit)/A	Pair. gap	$E_{1st \text{ ex. st.}}$	E_{2+}	E_{3-}	E_{4+}	E_{4+}/E_{2+}	β_2	$B(E)_{42}/B(E)_{20}$	$\sigma(n,\gamma)$	$\sigma(n,F)$	$^{235}\text{U FY}$	$^{239}\text{Pu FY}$	$^{252}\text{Cf FY}$
Z	129Cs 32.06 H	130Cs 29.21 M	131Cs 9.689 D	132Cs 6.480 D	133Cs STABLE 100%	134Cs 2.0652 Y	135Cs 2.3E+6 Y	136Cs 13.04 D	137Cs 30.08 Y						
54	128Xe STABLE 1.9102%	129Xe STABLE 26.4006%	130Xe STABLE 4.0710%	131Xe STABLE 21.232%	132Xe STABLE 26.9086%	133Xe 5.2475 D	134Xe >5.8E+22 Y	135Xe 9.14 H	136Xe >2.4E+21 Y						
53	127I STABLE 100%	128I 24.99 M	129I 1.57E+7 Y	130I 12.36 H	131I 8.0252 D	132I 2.295 H	133I 20.83 H	134I 52.5 M	135I 6.58 H						
52	126Te STABLE 18.84%	127Te 9.35 H	128Te 2.41E+24 Y	129Te 69.9 M	130Te $\geq 3.0E+24$ Y	131Te 25.0 M	132Te 3.204 D	133Te 12.5 M	134Te 41.8 M						
51	125Sb 2.75856 Y	126Sb 12.35 D	127Sb 3.85 D	128Sb 9.05 H	129Sb 4.366 H	130Sb 39.5 M	131Sb 23.03 M	132Sb 2.79 M	133Sb 2.34 M						
	74	75	76	77	78	79	80	81	N						

Tooltips
 On
 Off

Zoom
 1
 2
 3
 4
 5
 6
 7

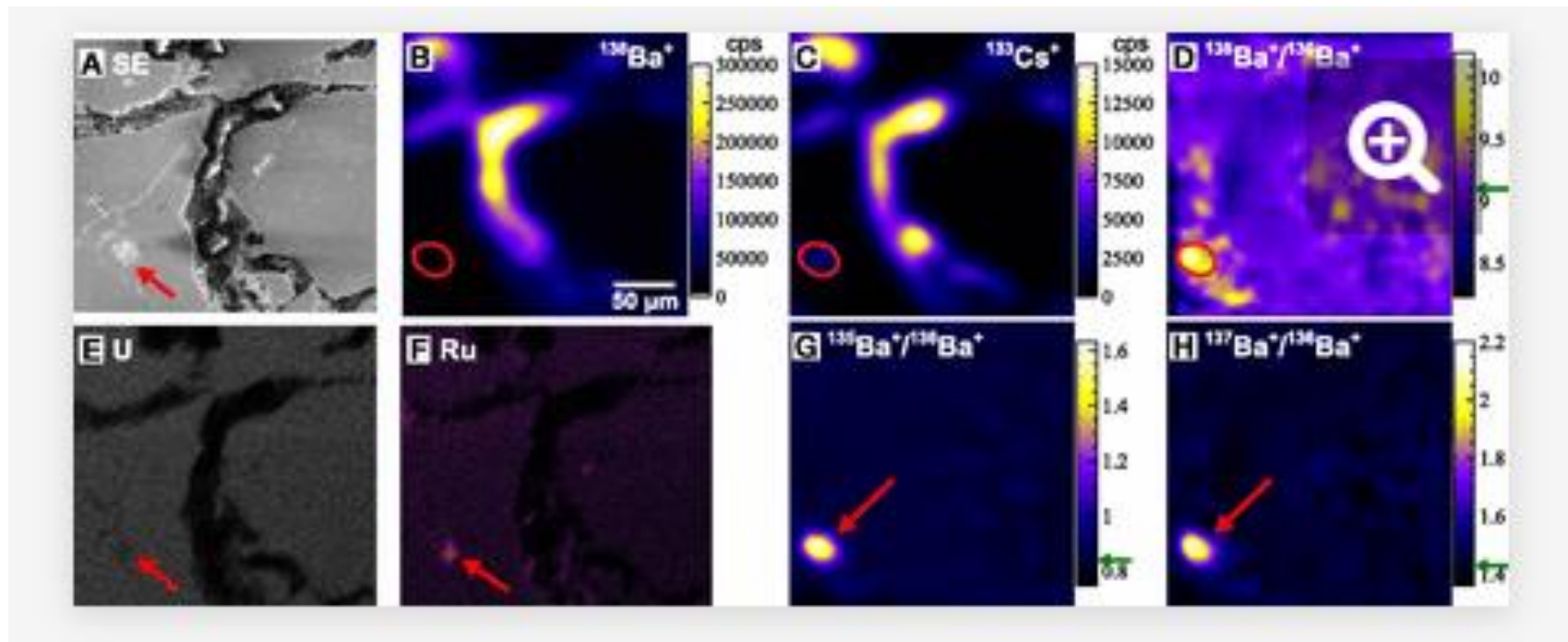
Uncertainty
 NDS
 Standard

Screen Size
 Narrow
 Wide

Nucleus
 go

probability
 $\geq 1.00E-1$
 1.00E-2
 1.00E-3
 1.00E-4
 1.00E-5
 1.00E-6
 1.00E-7
 1.00E-8
 1.00E-9
 1.00E-10
 1.00E-11
 1.00E-12
 1.00E-13
 $\leq 1.00E-15$
 unknown

Környezeti vonatkozás



Az EM kölcsönhatás időfüggése

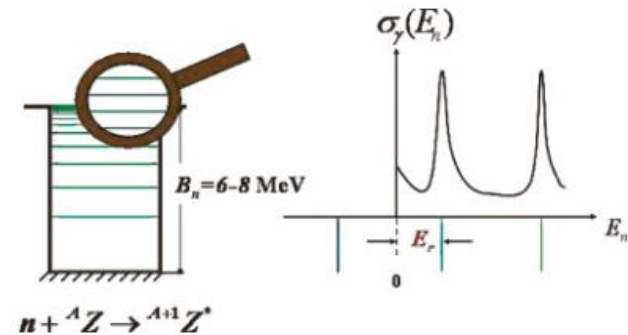
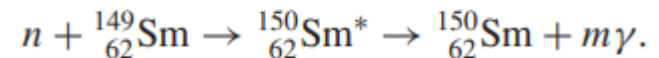
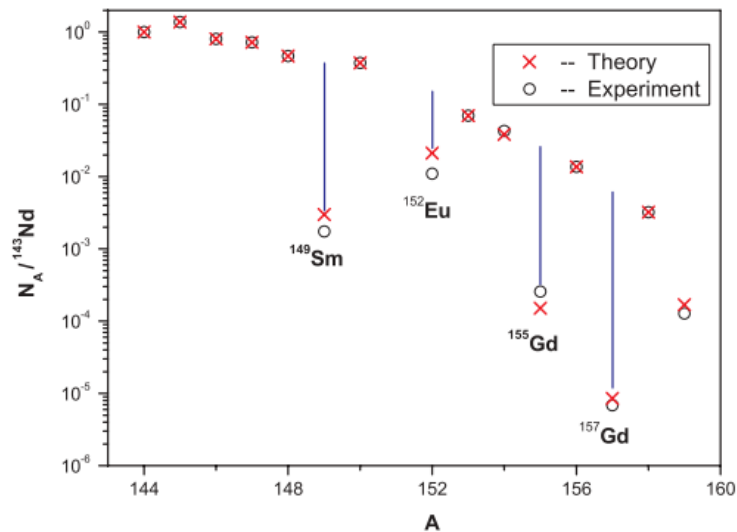
PHYSICAL REVIEW C **74**, 064610 (2006)

Natural nuclear reactor at Oklo and variation of fundamental constants: Computation of neutronics of a fresh core

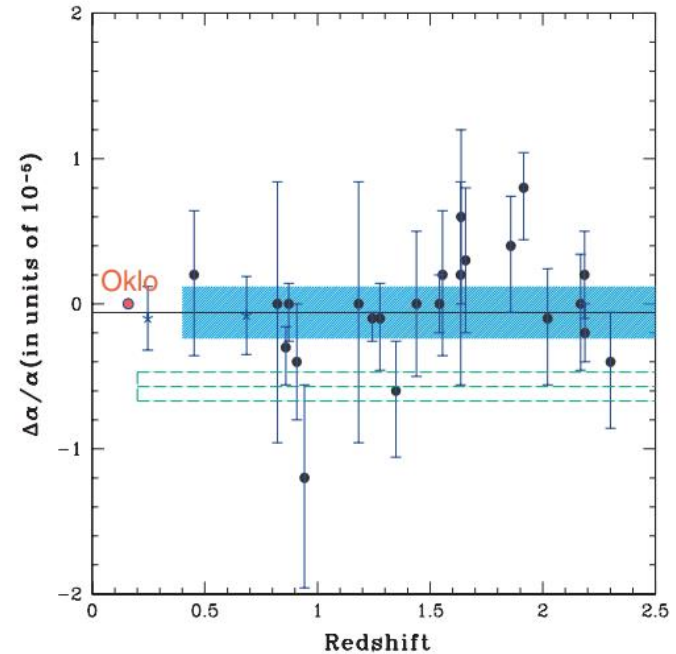
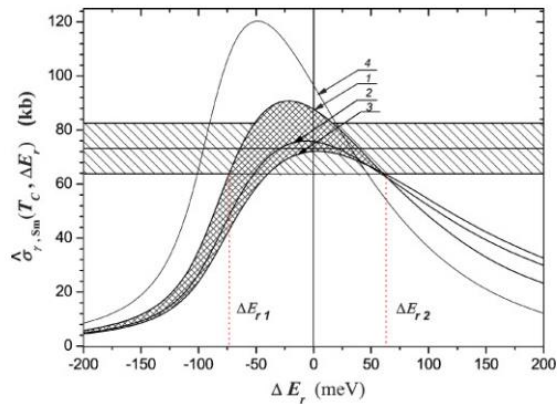
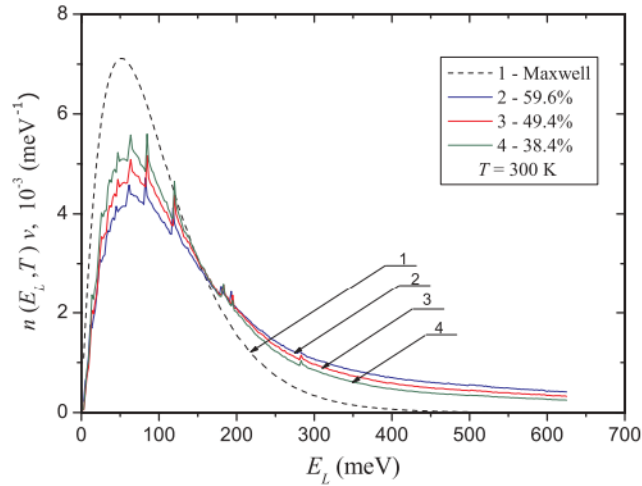
Yu. V. Petrov,* A. I. Nazarov, M. S. Onegin, V. Yu. Petrov, and E. G. Sakhnovsky

St. Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, RU-188-300, St. Petersburg, Russia

(Received 2 July 2005; revised manuscript received 4 August 2006; published 14 December 2006)



Az EM kölcsönhatás időfüggése



$$-25 \times 10^{-17} \leq (\Delta\alpha/\alpha \Delta t) \leq 12 \times 10^{-17} \text{ yr}^{-1}.$$