

JERZY NIEWODNICZAŃSKI
AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

OKLO

JERZY NIEWODNICZAŃSKI

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

Przypomnijmy:

Uran „naturalny” to trzy izotopy:

Uran 238 (abundancja 99,2745%) $T_{1/2} = 4,46 \times 10^9$ a

Uran 235 (abundancja 0,7200%); $T_{1/2} = 7,04 \times 10^8$ a

Uran 234 (abundancja 0,0055%); $T_{1/2} = 2,45 \times 10^5$

ok. 2 miliardy lat temu abundancja uranu-235 wynosiła ponad 3%

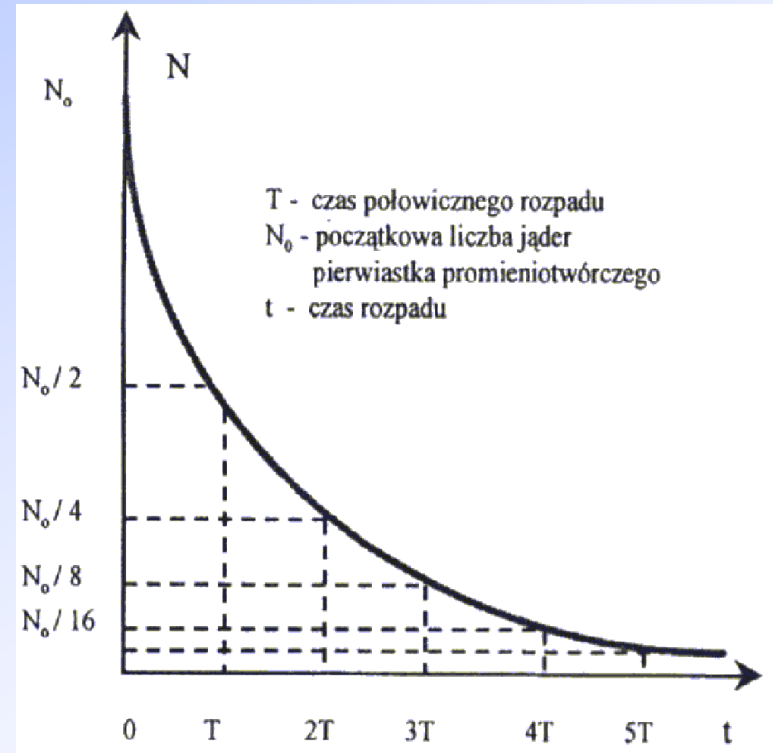
$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{t \ln 2}{T_{0,5}}} \Rightarrow \frac{N}{N_0} = e^{-\frac{t \ln 2}{T_{0,5}}}$$

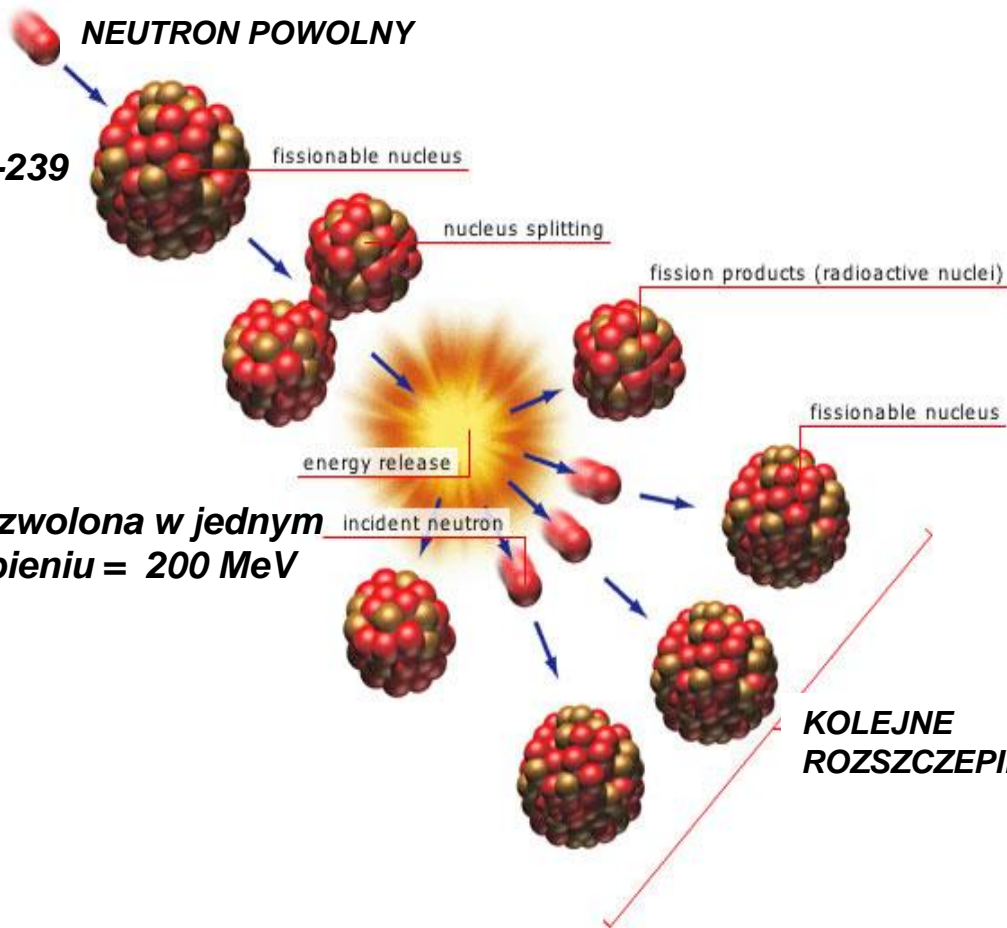
$$\ln \frac{N}{N_0} = \ln 2 \cdot \left(-\frac{t}{T_{0,5}} \right)$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = \ln 2 \cdot \left(-\frac{t}{T_{0,5}} \right) \Rightarrow \frac{N}{N_0} = 2^{-\frac{t}{T_{0,5}}}$$

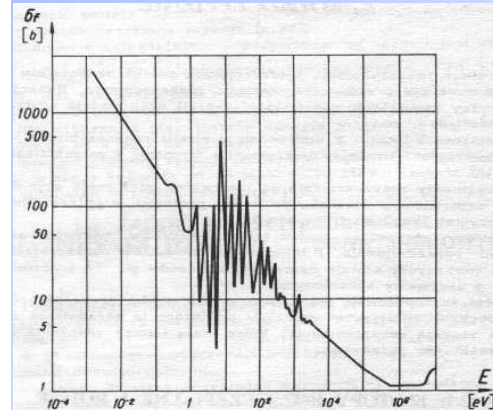
$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{0,5}}} \Rightarrow m = m_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{0,5}}}$$

**Prawo
rozpadu
promienio-
twórczego**





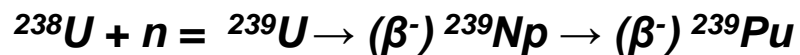
Energia wyzwolona w jednym rozszczepieniu = 200 MeV

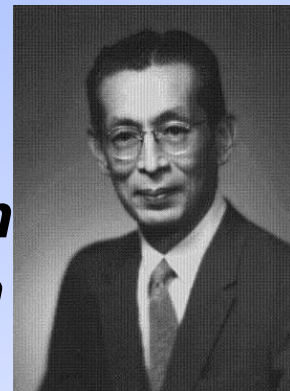


Przekrój czynny na rozszczepienie neutronami jąder dla U-235

Przekrój czynny na rozszczepienie neutronami termicznymi ($E=0.025$ eV) jąder U-235: $\sigma_f = 577b$, jąder Pu-239: $\sigma_f = 748 b$

Wytwarzanie plutonu Pu-239:





1953 George W. Wetherill z UCLA, Mark G. Inghram z uniwersytetu w Chicago i Paul K. Kuroda z uniwersytetu stanowego Arkansas powiedzieli, że w złożach uranu powinniśmy znaleźć ślady po działających tam niegdyś „naturalnych” reaktorach jądrowych, jeśli: (tzw. warunki Kurody*)

- 1. Zawartość uranu w złożu jest wysoka a złożo ma „grubość” co najmniej $\sim 2/3$ m i geometrię umożliwiającą zainicjowanie spontanicznej reakcji rozszczepienia uranu-238 prowadzącej do rozszczepienia U-235**
- 2. Abundancja uranu-235 wynosi ponad 3,5 %**
- 3. Złożo zawiera moderator – substancję spowalniającą neutrony (wodę)**
- 4. W złożu (i w wodzie) jest niska zawartość pierwiastków zawierających izotopy silnie absorbujące neutrony.**

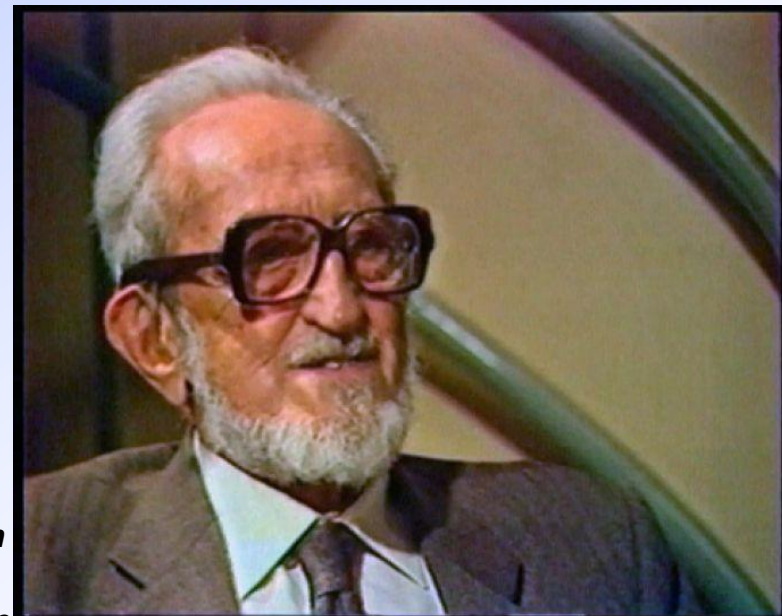
* Kuroda, 1956. On the nuclear physical stability of uranium minerals. *Journal of Chemical Physics*, vol. 25: 781-782.

***Maj 1972 - Francis Perrin: w zakładach
wzbogacania uranu w Pierrelatte (Francja)
stwierdzono (H. Bouziges), że w rudzie uranu
pochodzącej z kopalni w Oklo (Gabon) zawartość
izotopu U-235 w pierwiastku uranie wynosi
0,717% (winna wynosić 0,720%)
Anomalię tę nazwano „OKLO phenomenon”***

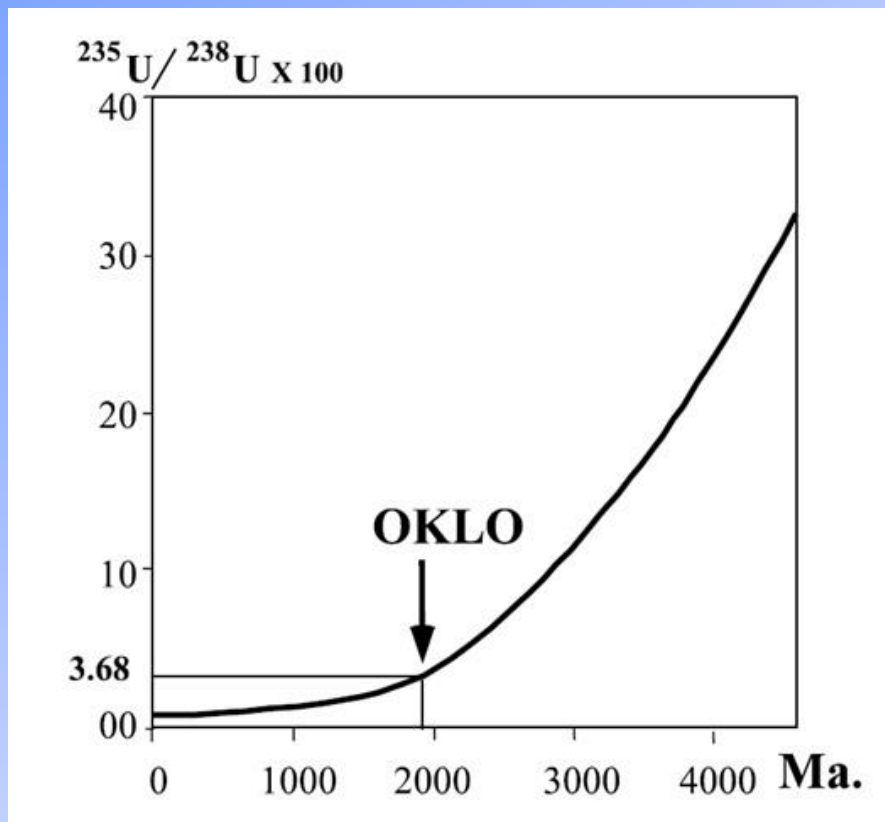


Francis Perrin Jean Perrin Otto Stern

*Francis Henri Jean Siegfried Perrin,
1901 -1992*



Abundancja izotopu U-235 niższa niż 0,720% (później zidentyfikowano strefy w złożu, gdzie zawartość U-235 wynosiła nawet 0,440%!) oznacza, że izotop ten musiał się **wypalić! JAK? W reakcji rozszczepienia!**

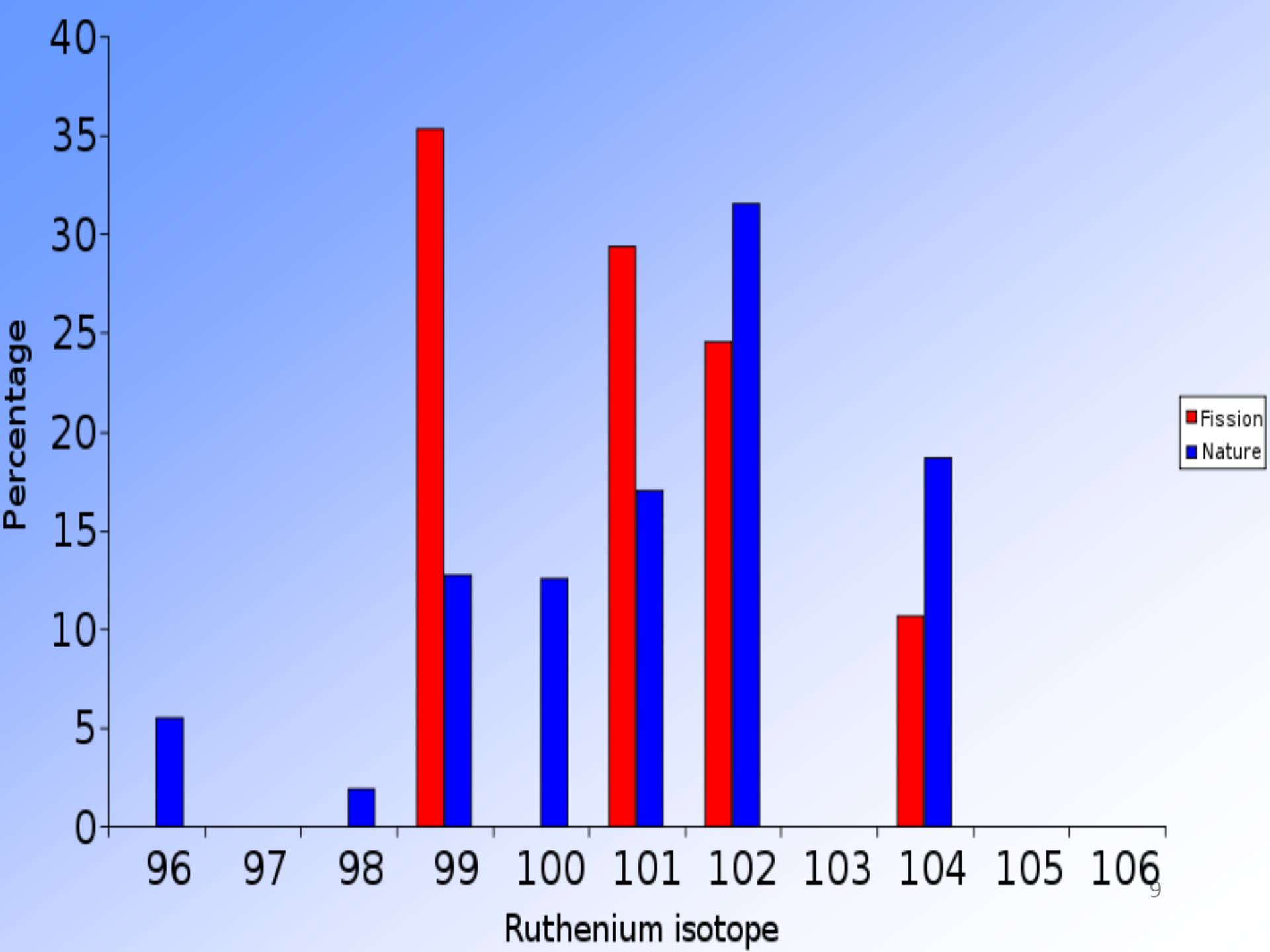


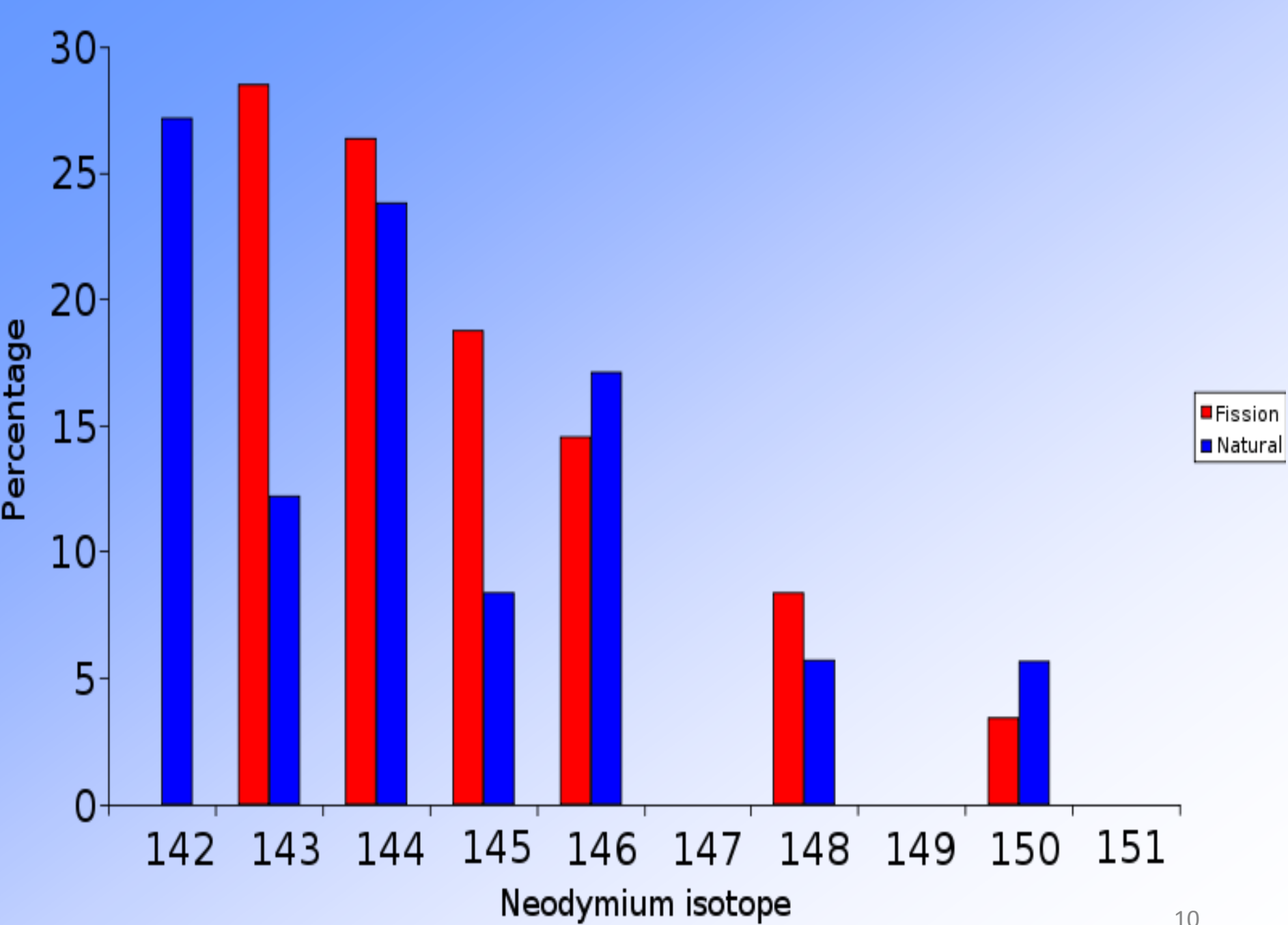
Z wieku skał (wg. metody Rb-87/Sr-87 to ok. 1,8 miliarda lat) wynikało, że stosunek zawartości izotopów U-235 i U-238 wynosił wówczas ok. 0,0368 (obecnie stosunek ten wynosi 0,00725).

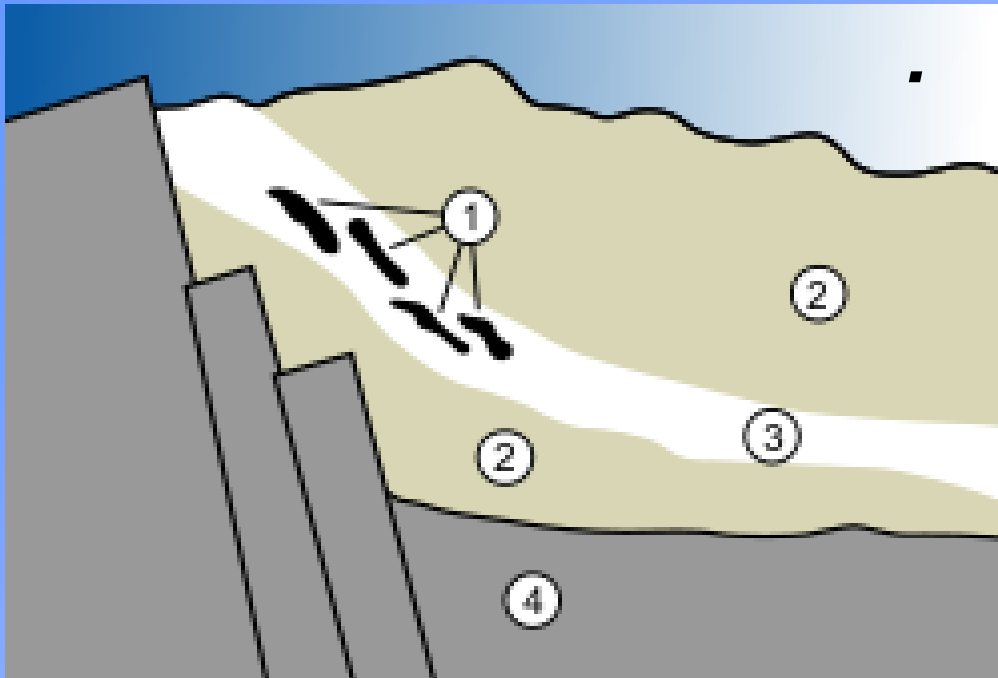
W Oklo i w pobliskim Okolobondo zidentyfikowano 16 „reaktorów”, w których:

- jest niższa niż obecnie obserwowana abundancja U-235 oraz***
- są produkty rozszczepienia jąder uranu, czyli niewystępujące gdzie indziej izotopy (np. Ce-142, Mo-100) lub inny niż „normalnie” skład izotopowy niektórych pierwiastków (np. rutenu, ksenonu, neodymu).***

Wniosek: w Oklo musiały działać naturalne reaktory jądrowe! Zachodzenie reakcji rozszczepienia było możliwe, bo warunki Kurody zostały spełnione: ok. 2 mld lat temu na skutek sedymentacji w delcie rzeki Ogowe wzrosła koncentracja uranu w złożu (miejscami do ponad 70%), miąższość złoża wynosiła ponad 1 m, zawartość rozszczepialnego U-235 w uranie wynosiła ok. 3,1 %, a woda (nie zawierająca związków boru) wypełniająca porowaty piaskowiec była moderatorem i reflektorem neutronów. Były to reaktory samoregulujące się!

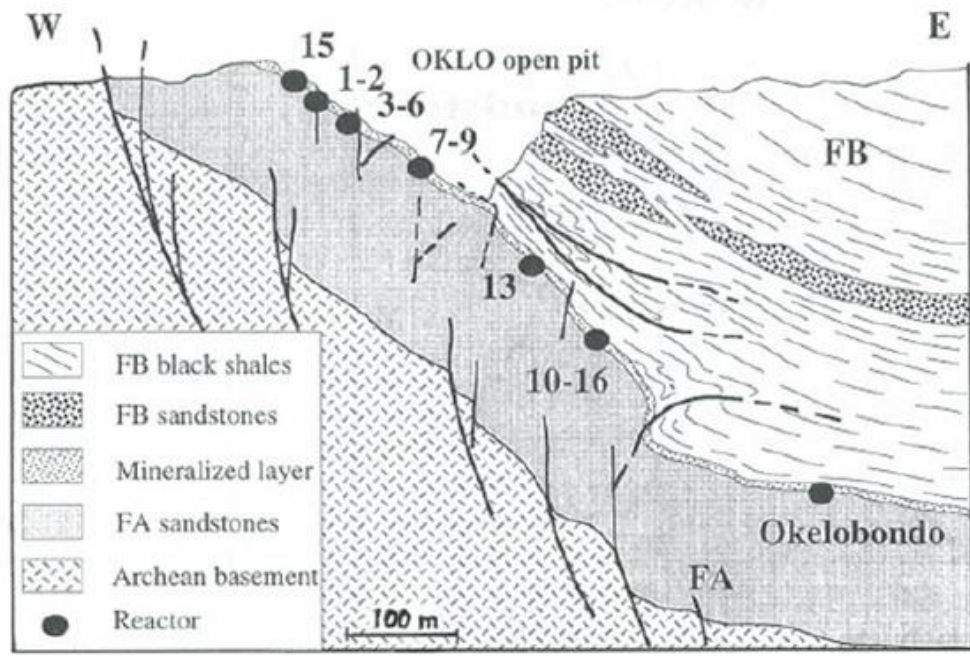




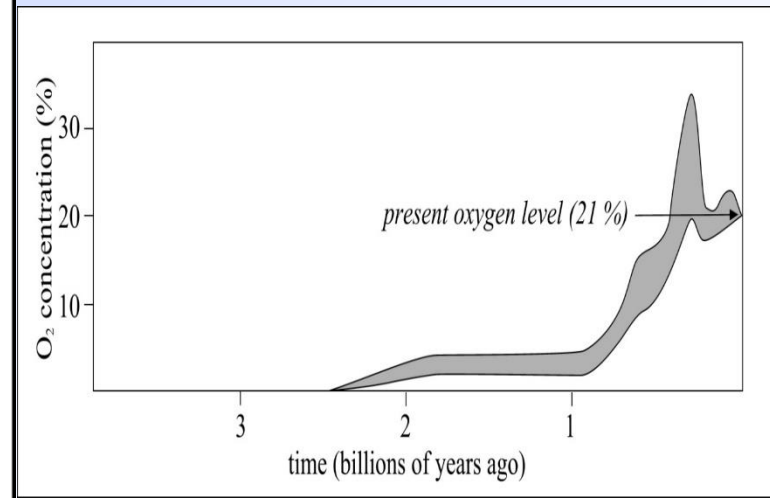
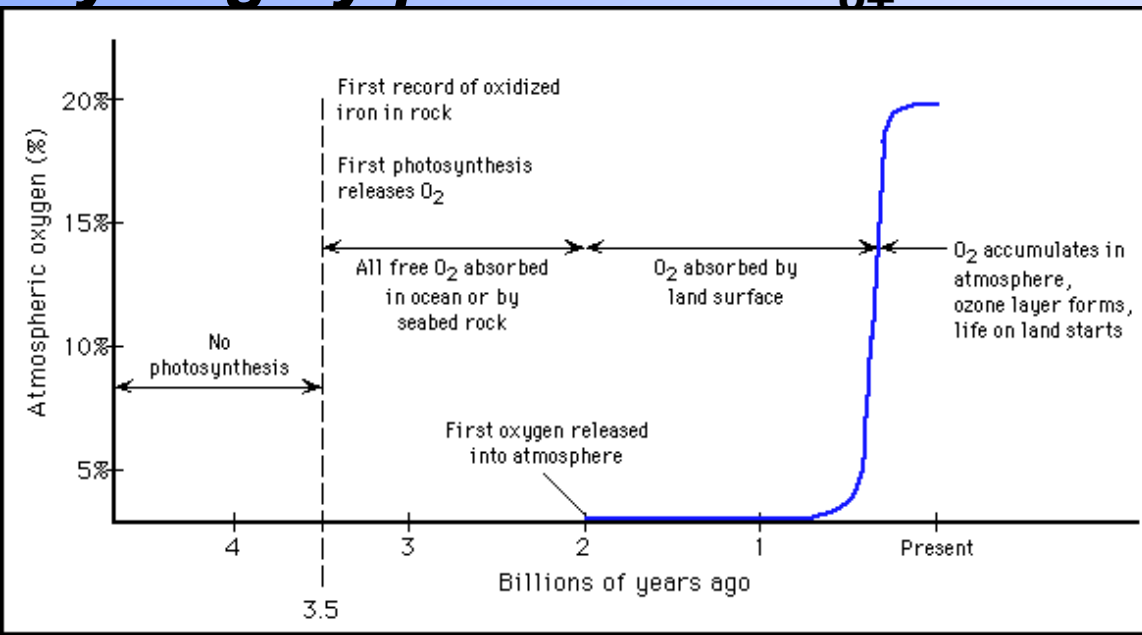


- 1 – miejsca z uranem zubożonym w izotop U-235
- 2 – piaskowiec
- 3 - pokład rudy uranu
- 4 - granit





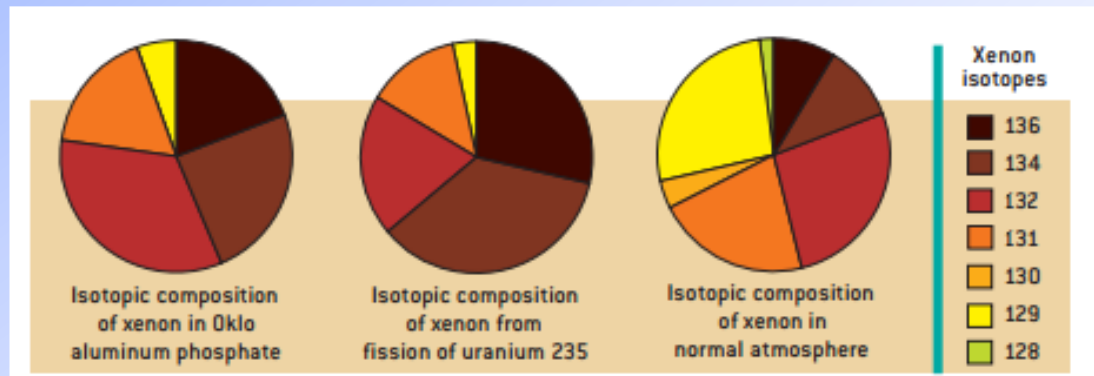
Czy mogły działać takie reaktory wcześniej (przecież abundancja U-235 była jeszcze wyższa!)? NIE, bo nie było złóż uranu o wysokiej zawartości tego pierwiastka. Koncentracja uranu w postaci bogatych złóż tlenków – to proces zapoczątkowany przez GOE (Great Oxygenation Event) – pojawienie się ok. 2,45 miliarda lat temu tlenu w atmosferze. Procesy prowadzące do transportu i koncentracji uranu wymagały powstania U_{6+}



Izotopy ksenonu

	Xe-124	126	128	129	130	131	132	134	136
<i>naturalny</i>	0,1	0,09	1,90	26,4	3,3	21,2	27,0	10,5	8,9
<i>Rozpad w reaktorze produktów rozszczeplenia</i>			0,17 $\times 10^{-3}$	3,07	1,5 $\times 10^{-3}$	13,08	19,45	35,45	28,95

Ze stosunków zawartości izotopów Xe-131 i Xe-132 do Xe-134 i Xe-136 w fosforanach glinu z rejonu Oklo, Meshik i współpracownicy* wyliczyli cykle działania reaktorów Oklo (to były „gejzery jądrowe”!).



*/ A. P. Meshik, C. M. Hohenberg, O. V. Pravdivtseva, "Record of Cycling Operation of the Natural Nuclear Reactor in the Oklo/Okelobondo Area in Gabon," *Phys. Rev. Lett.* 93,1482302 (2004).

Jak to przebiegało?

- **reakcja rozszczepienia** → **produkty rozszczepienia, m.in. izotopy Te i I**
→ **Xe-136 i Xe-134, ale wymywane z „reaktora”**. **Temperatura rośnie, w gorącej wodzie powstaje fosforan glinu $AlPO_4$, woda wyparowuje, reakcja rozszczepienia zamiera.**
- **krystalizacja minerałów fosforanu glinu („berlinitu”), w kryształach uwięzione zostają dłużej żyjące izotopy telluru i jodu i/lub produkty ich rozpadu - Xe-132, Xe-131 i Xe-129, co chroni je przed wymyciem przez powracającą wodę (nawet gdy temperatura jest wysoka).**
- **reakcja rozszczepienia jest wznowiona.**

W rezultacie izotopy ksenonu 136 i 134 są częściowo usunięte za złoża uranu, natomiast są tam obecne izotopy ksenonu 132, 131 i 129, uwięzione w fosforanie glinu.

Po prawie 2 miliardach lat! cykle impulsów pracy samokontrolującego się reaktora: 30 min pracy, 2,5 godz. przerwy, 30 min pracy.

Uwięzienie izotopów ksenonu w powstających wówczas kryształach $AlPO_4$ również potwierdziło znaczną (ponad 5%?) obecność tlenu w atmosferze.

Znaleziono 16 stref „impulsowych reaktorów”, średnia moc (całkowita) wynosiła ok. 100 kW, czas pracy oceniono na ok. 500 tys. lat (lub dłużej?), całkowita energia wytworzona to ok. 15 tys. MWlat, wypalonych zostało ok. 5 ton U-235, wytworzone zostały również ok. 2 tony Pu-239 (którego już nie ma, bo się rozpadł lub/i rozszczepił).



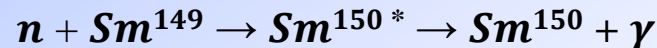
Niestety fotografa przy tym nie było, ale chyba to tak wyglądało

W 1937 roku Paul Dirac zasugerował, że stałe fizyczne (zwłaszcza stała grawitacji G) mogą się zmieniać wraz z upływem czasu. Wśród licznych badań weryfikujących tę hipotezę wykorzystano też „OKLO phenomenon”.

Stała struktury subtelnej $\alpha = (2\pi e^2)/(hc) = 1/(137,036)$

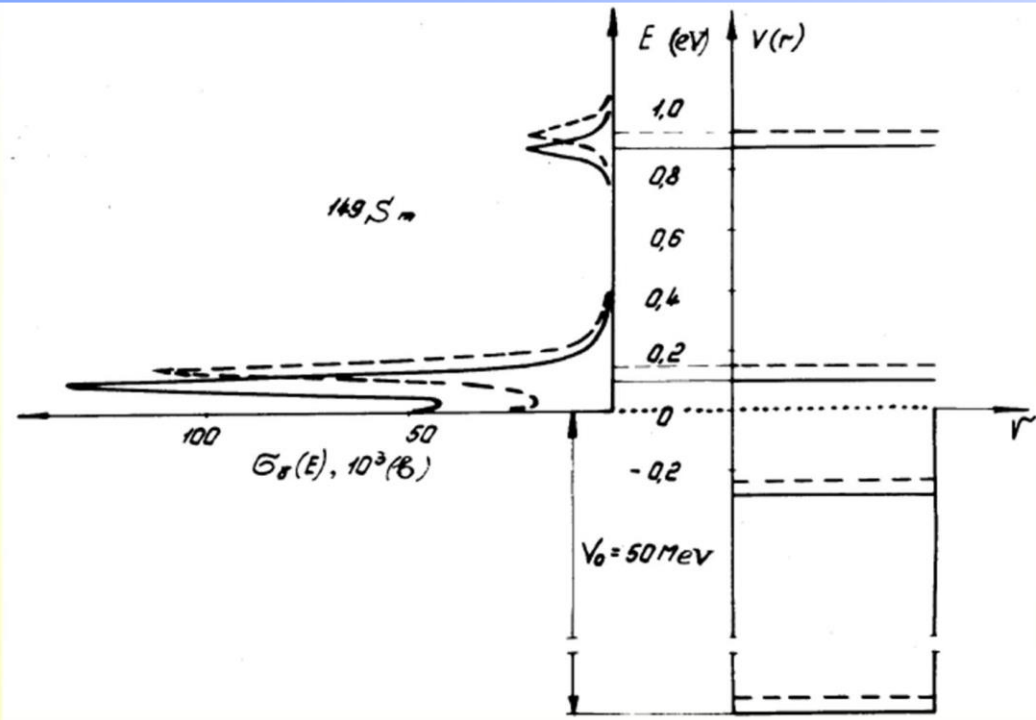
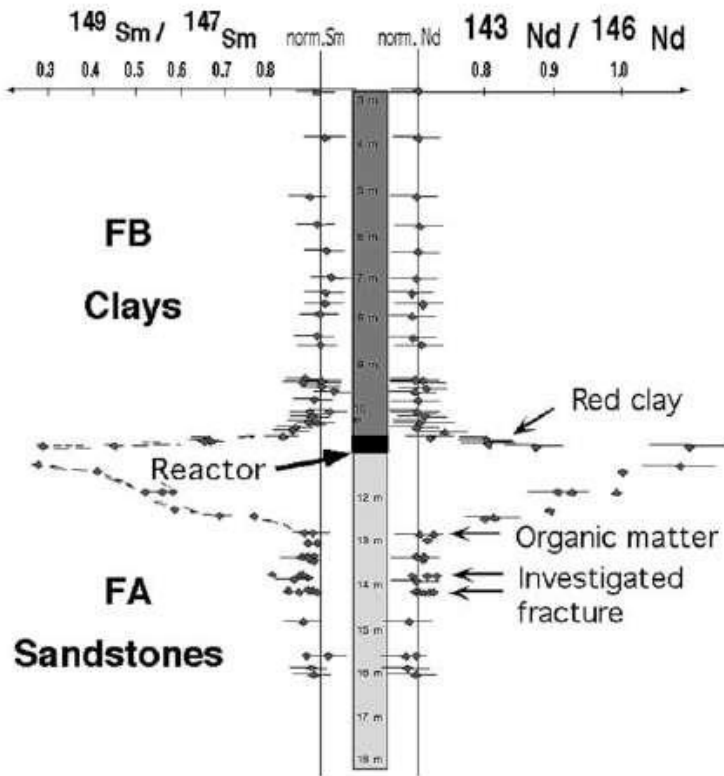
Lamoreaux i Torgerson (2004)* na podstawie danych z OKLO ocenili zmianę wartości tej stałej w ciągu ostatnich 2 miliardów lat na 45 ppb, co jest "probably accurate to within 20%". Petrov i współpracownicy (2006) określili tempo zmiany (?) wartości stałej w czasie w przedziale $-4 \times 10^{-17} \leq da/dt/\alpha \leq 3 \times 10^{-17} \text{ yr}^{-1}$.**

Podstawą tych wyliczeń była porównanie średniej wartości przekroju czynnego na wychwyty radiacyjny neutronu przez jądro ^{149}Sm dla samaru w próbkach z OKLO i przesunięcia na skali energii położenia rezonansu tej reakcji:

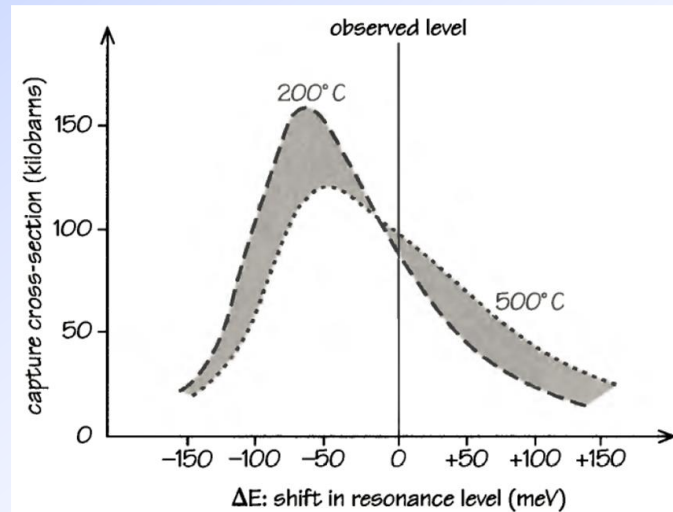


*** / Lamoreaux S.K.; Torgerson J.R. (2004). "Neutron Moderation in the Oklo Natural Reactor and the Time Variation of Alpha". *Physical Review D*. 69 (12): 121701.**

**** / Petrov, Yu. V.; Nazarov, A. I.; Onegin, M. S.; Sakhnovsky, E. G. (2006). "Natural nuclear reactor at Oklo and variation of fundamental constants: Computation of neutronics of a fresh core". *Physical Review C*. 74 (6): 064610.**

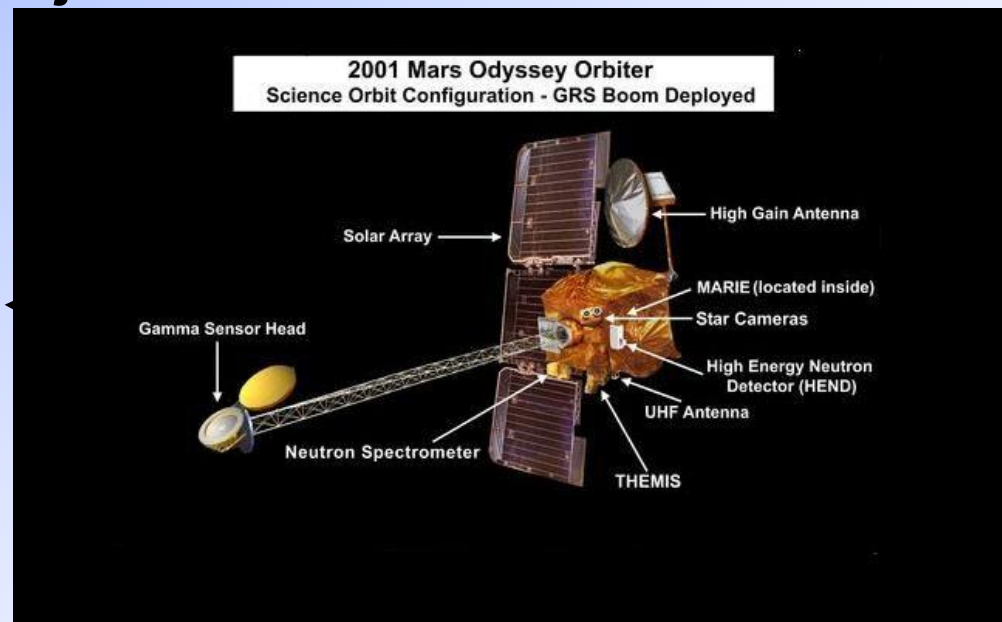
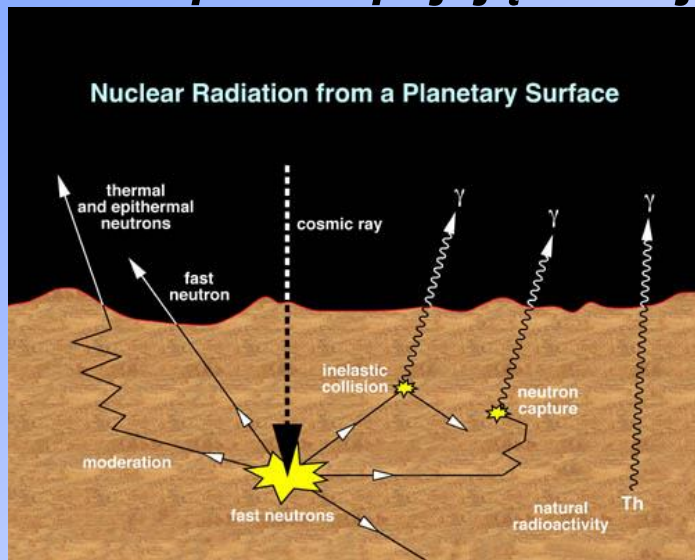


Dwie skale energii jadra: skala rezonansu neutronu eV oraz skala MeV studni potencjału. Linie ciągłe pokazują aktualna energie rezonansu natomiast przerywane pokazują pozycje zmieniona.



OKLO mogło być nie jedynym naturalnym reaktorem jądrowym na Ziemi. Istnieje możliwość znalezienia śladów podobnych zjawisk (obniżona abundancja izotopu U-235, fragmenty rozszczepienia) na starych kontynentach (Ameryka Północna, Australia?).

Sonda Odyssey Orbiter stwierdziła w widmie promieniowania gamma emitowanego z powierzchni Marsa istnienie linii wskazujących na obecność U i Th. W atmosferze Marsa znaleziono Xe-129. Pod powierzchnią Marsa występuje lód, na powierzchni są ślady istnienia w przeszłości cieków wodnych. Stąd hipotezy o istnieniu w przeszłości również na Marsie naturalnie zachodzących reakcji rozszczepienia. Może nawet hiper erupcji jądrowej w rejonie Mare Acidalium*.



*** / Brandenburg J. E. „Evidence for a Large, Natural Paleo Reactor on Mars”, 42nd Lunar and Planetary Science Conference (2011)**