



Oklo: Nature is always one step ahead...

PE - Astrosiesta 2009-02-26

Uranio



^{238}U : 99.284%

^{235}U : 0.711%

^{234}U : 0.006%



Weizsäcker's SEMF

$$m = Zm_p + Nm_n - \frac{E_B}{c^2}$$

$$E_B(Z, A) = a_V A - a_S A^{2/3} - a_C \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_A \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta(Z, A)$$

$$\delta(Z, A) = \begin{cases} +\delta_0 & Z, N \text{ pari (A pari)} \\ 0 & A \text{ dispari} \\ -\delta_0 & Z, N \text{ dispari (A pari)} \end{cases}$$

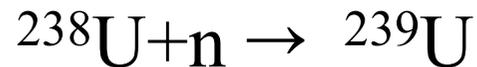
^{238}U e ^{235}U e fissione

^{235}U : basta un n di energia cinetica nulla

^{238}U : serve $E > 1.42 \text{ MeV}$:

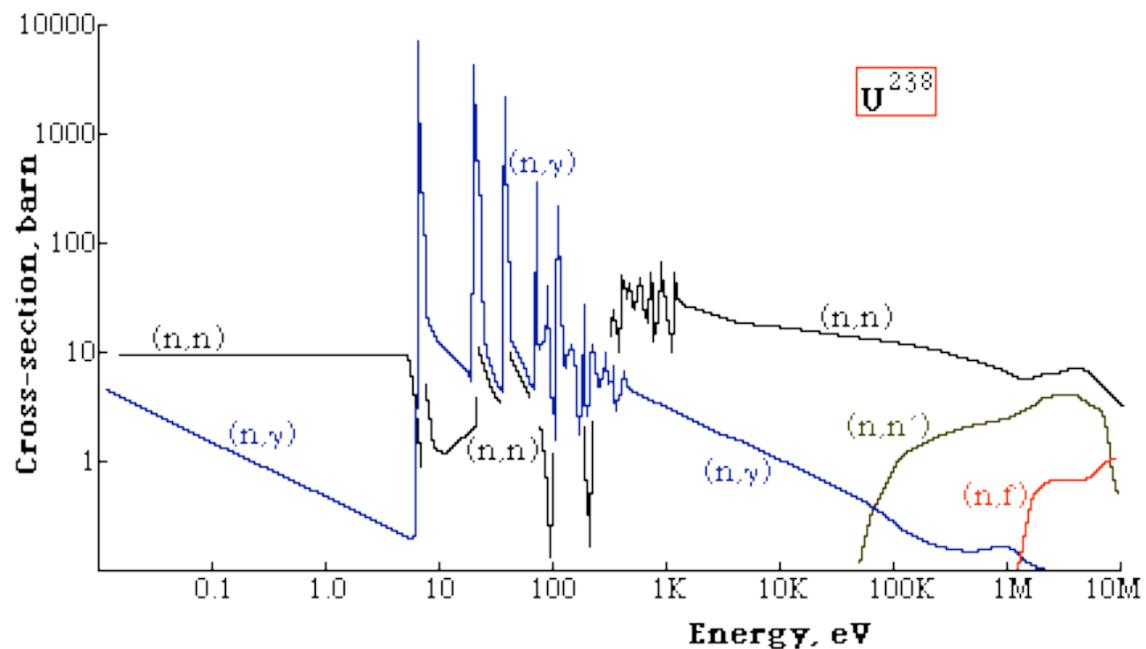
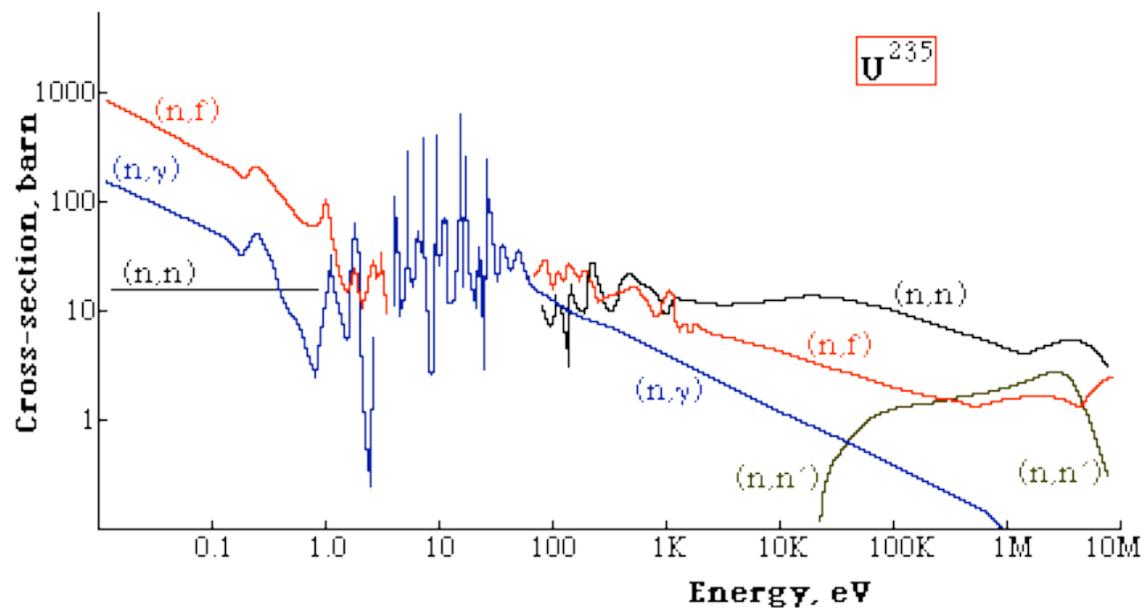


è un p-p con energia legame/nucleone più alta rispetto al p-d originale

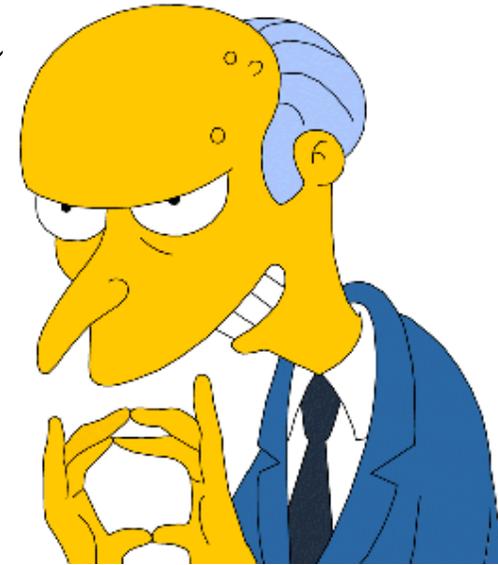
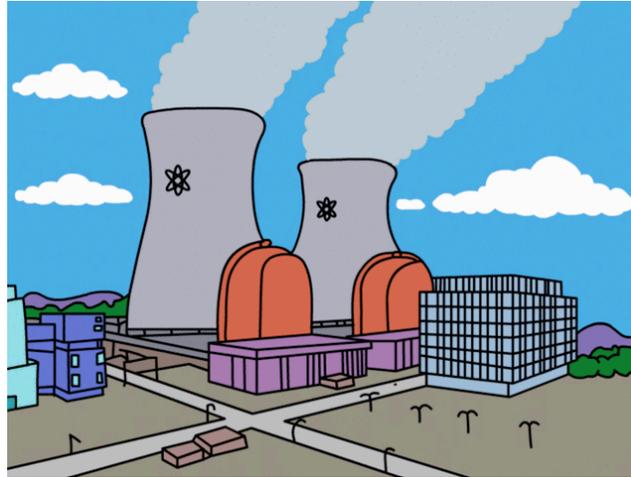


è un p-d, meno legato rispetto al p-p originale

^{238}U e ^{235}U e fissione



La fissione indotta



Nei reattori: **uranio arricchito** di ^{235}U al 3% o al 30%.



L'Uranio naturale

^{238}U e ^{235}U sono entrambi instabili α con :

- $\tau_{238} = 6.5 \times 10^9$ anni
- $\tau_{235} = 1.0 \times 10^9$ anni

I due isotopi si sono formati circa 5 Gy fa in quantità simili e sono decaduti secondo le rispettive vite medie fino all'attuale rapporto:

$$R = N_{235} / N_{\text{tot}} = 0.0071$$

L'Uranio naturale

$$R(t) = \frac{N_0^{235} e^{-\lambda_{235} t}}{N_0^{235} e^{-\lambda_{235} t} + N_0^{238} e^{-\lambda_{238} t}} = 0.03$$

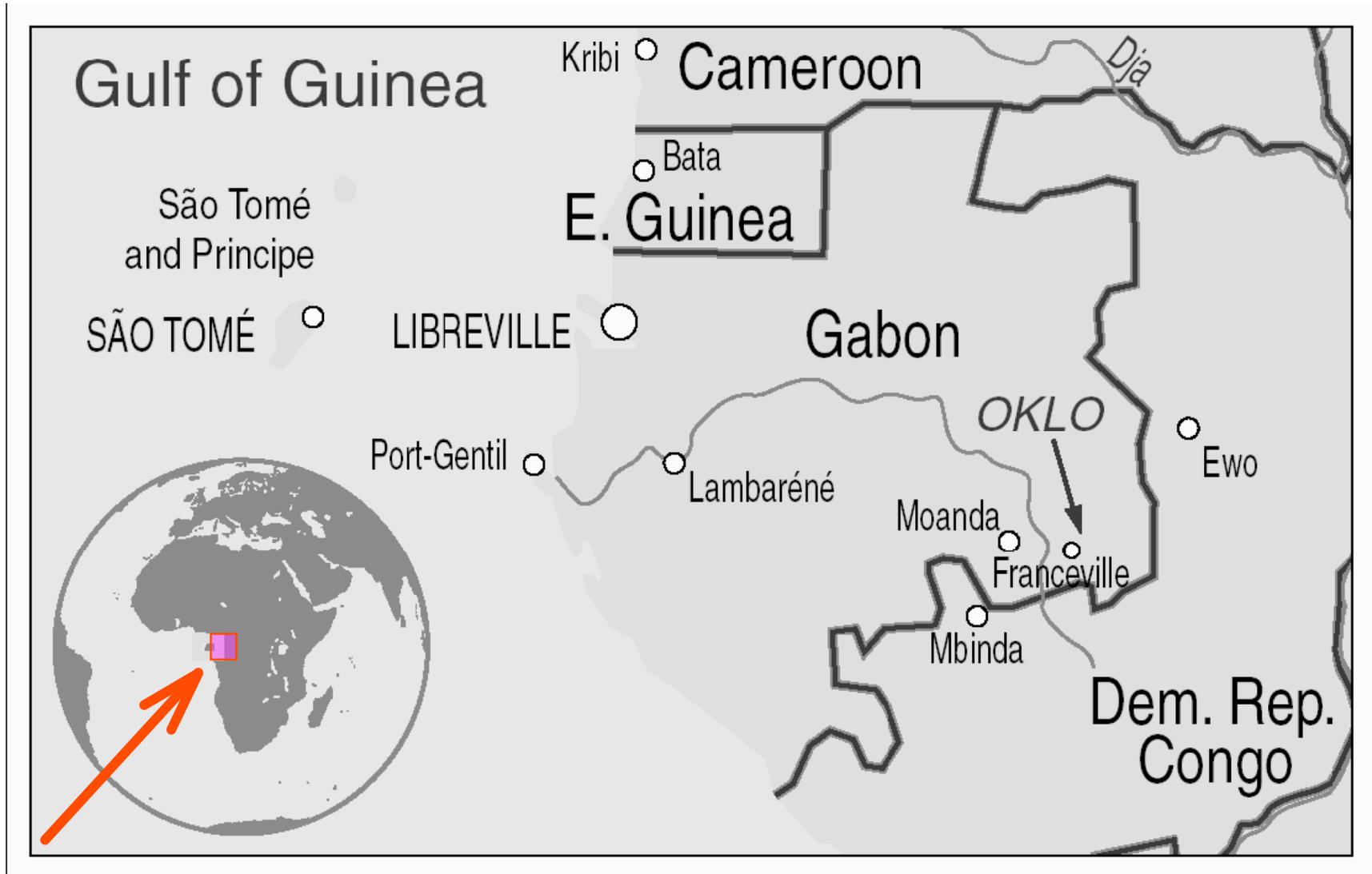
2 Gy fa la concentrazione di ^{235}U era pari a quella dell'U arricchito utilizzato oggi nei reattori nucleari !!!

Il sospetto

- 1972: i fisici della Commissione Francese per l'Energia Atomica (F. Perrin) scoprirono che l'uranio usato a Pierrelatte presentava valori di $R = \frac{^{235}\text{U}}{^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}}$ anche molto minori rispetto a quanto atteso.
- Il minerale proveniva dalle miniere di Oklo, Gabon, scoperte negli anni Sessanta.

Si trattava quindi di **URANIO IMPOVERITO**, e mancavano all'appello alcune centinaia di Kg di ^{235}U .

Fino ad oggi sono stati scoperti 16 siti



Fino ad oggi sono stati scoperti 16 siti

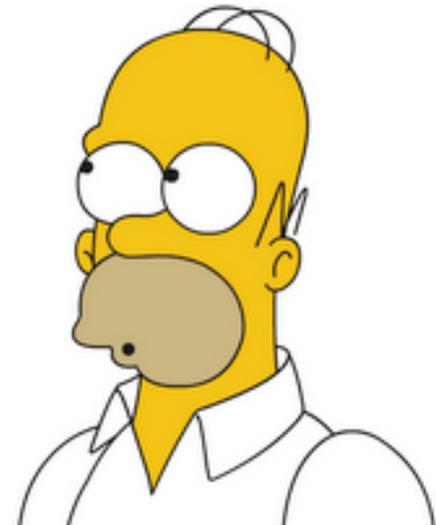


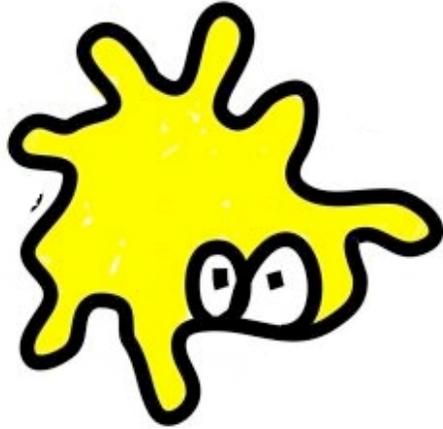
Un reattore naturale?

2 Gy fa c'era la giusta concentrazione di ^{235}U per poter sostenere una reazione a catena.

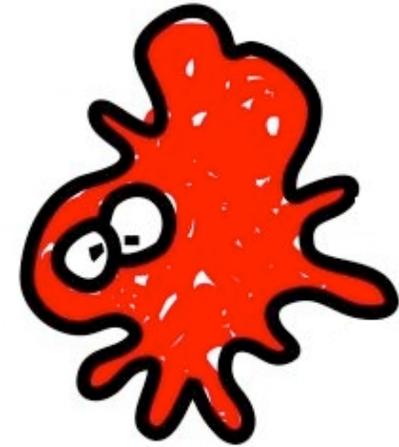
... OK, ma ...

l'uranio si trovava in forma metallica sul fondo dei **corsi d'acqua** nelle miniere: in che modo ha raggiunto massa e concentrazione sufficienti per dar luogo al reattore ?





That's life!

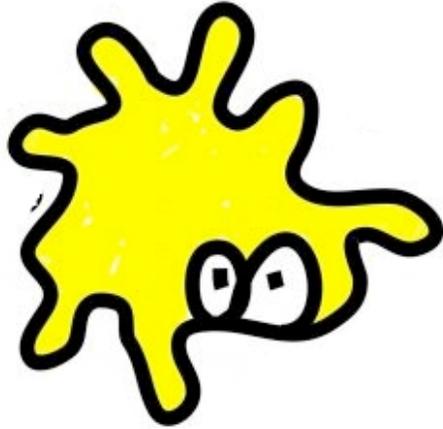


2 Gy: sviluppo di alghe azzurre (cianobatteri e altro): l' H_2O viene ossigenata: UO_2 solubile in H_2O !

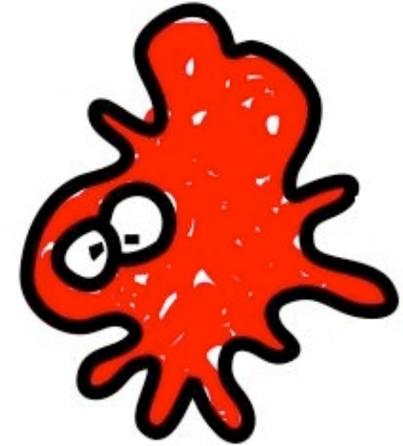
L'U si è accumulato in pozze in cui si sono raggiunte concentrazione e massa sufficienti per la reazione a catena.

Questa si è sostenuta nel tempo grazie all' H_2O del fiume, che termalizzava i neutroni.

UN REATTORE NATURALE MODERATO AD ACQUA!



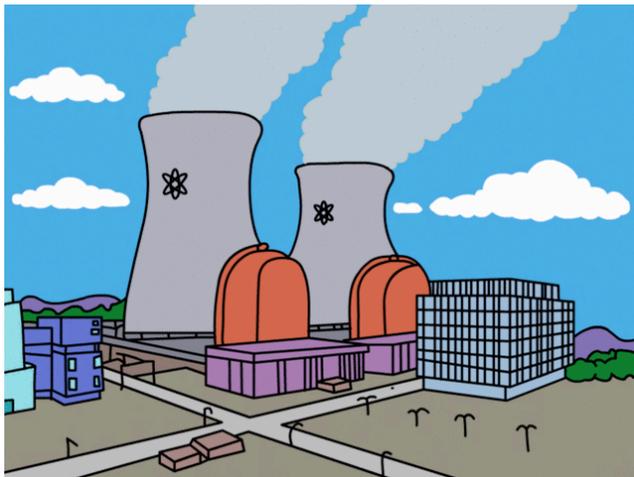
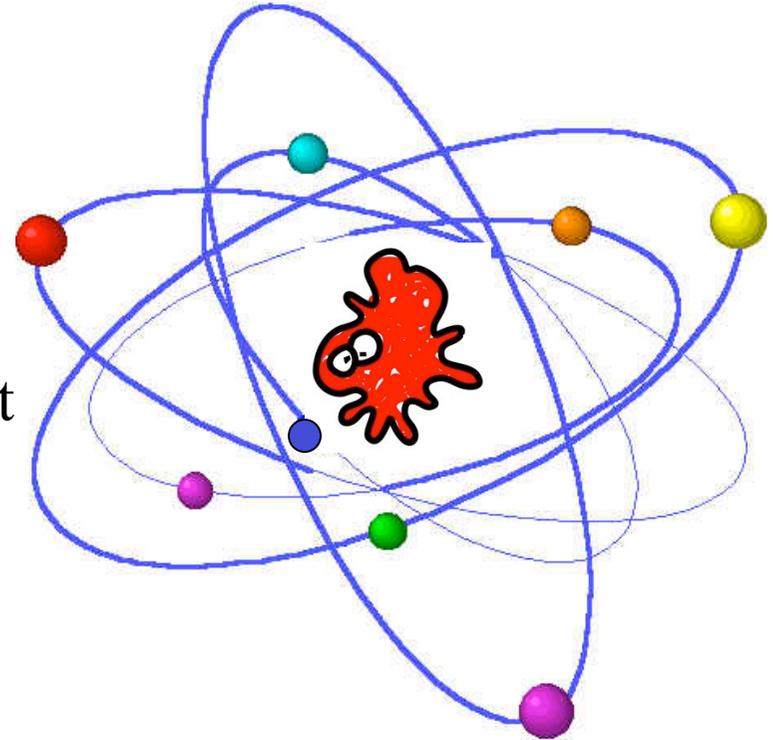
That's life!



Se i batteri si fossero diffusi prima, quando ^{235}U era in proporzione maggiore, si sarebbe probabilmente sviluppata un'esplosione; se fossero comparsi dopo, non si sarebbe attivata la reazione a catena!

Caratteristiche del reattore

| | |
|-------------------------|--|
| Età del fenomeno | (1.75 ± 0.10) Gy |
| Durata | 200–500 ky |
| Flusso | 10^7 – 10^8 cm ⁻² s ⁻¹ |
| Burn-up | $(10$ – $25)$ GW·dU/dt |
| Potenza operativa | 100 kW |
| Energia totale prodotta | 10^8 MWh |



Per confronto con un reattore nucleare:

| | |
|-------------------|--|
| Burn up | 33 GW·dU/dt |
| Flusso | 10^{13} – 10^{14} cm ⁻² s ⁻¹ |
| Potenza operativa | fino a 1 000 MW |

Il sistema di controllo

Quando la potenza aumentava, l' H_2O evaporava, riducendo il suo potere moderatore. In questo modo veniva meno la criticità e il reattore si spegneva.



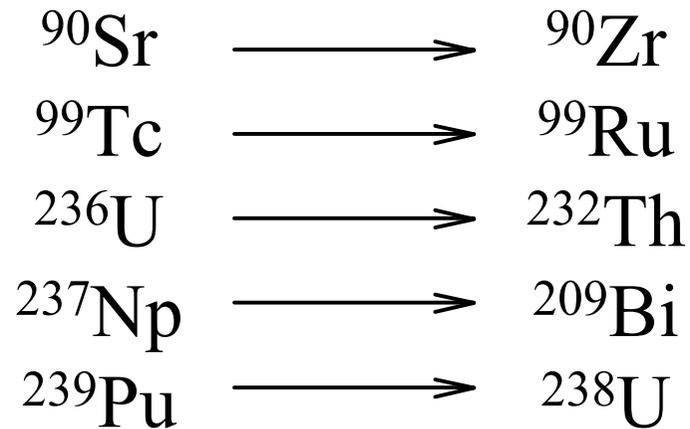
È stato calcolato che il reattore ha funzionato per intervalli di mezz'ora, intervallati da periodi di 2.5 h di shut down. Durante tali intervalli la roccia aveva il tempo di raffreddarsi (rendendo possibile una nuova saturazione d' H_2O) ed i veleni di fissione potevano decadere.

Prove della teoria

- Presenza di prodotti di fissione di ^{235}U diversi da quelli che si trovano in natura;
- Studio della proporzione dell'isotopo di ^{100}Ru ;
- Studio delle diverse frazioni di ^{235}U rispetto al quantitativo di minerale di U nelle varie zone del reattore naturale.

Prodotti di fissione

Si sono riscontrate abbondanze di elementi caratteristici della fissione di ^{235}U , in particolare isotopi di Nd. Tra questi mancano gli A con $> \sigma$ di cattura. Le anomalie nelle quantità di isotopi sono spiegate col decadimento radioattivo dei prodotti:



Frazione di ^{235}U

Un'altra prova convincente è l'arricchimento di ^{235}U e la presenza di ^{232}Th riscontrate in alcune zone del reattore. Maggiore presenza di ^{235}U è indice di cattura n da parte di ^{238}U , che avrebbe così generato ^{239}Pu , che decade in ^{235}U .

**L'U non è l'elemento più pesante
presente in natura sulla Terra!**



Il Th deriva da:



Destino dei prodotti di fissione

La maggior parte dei prodotti sono restati nella miniera per 2 Gy, grazie alla particolare conformazione geologica

- Gli isotopi degli elementi che facilmente idrolizzano sono rimasti in situ: Nb, Y, Zr, U, Nb, Pu si sono spostati di meno di 5 cm;
- Gli isotopi di Sr e Tc sono decaduti in situ senza migrazione;
- I, Mo, Cd, metalli alcalini e terre rare sono migrati per il 90%;
- Solo l'1% dei gas di fissione è stato trattenuto.

Conclusioni

Ricerca altamente interdisciplinare (fisica, geologia, biologia, ingegneria).

Prova che in natura può formarsi il **Pu**.

Esiste la possibilità di trattenere in modo sicuro **scorie di fissione**.

Costante universale **α** : $|\dot{\alpha}/\alpha| < 10^{-15} \text{ yr}^{-1}$

References

- A. P. Meshik et al. 2004, Record of cycling operation of the natural nuclear reactor in the Oklo/Okelobondo area in Gabon; Phys. Rev. Lett. 93, 182302
- S. K. Lamoreaux & J. R. Torgerson 2004, Neutron moderation in the Oklo natural reactor and the time variation of α ; Phys. Rev. Lett. 69, 121701
- T. Damour, F & Dyson 1996, The Oklo bound on the time variation of the fine-structure constant revised; Nu. Phys. B 480, 37