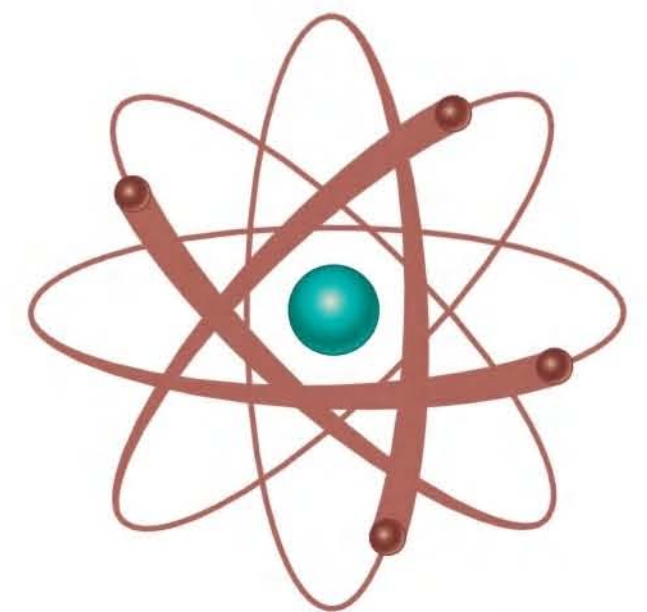


# UN ANTICO REATTORE NATURALE

Due miliardi di anni fa, in un giacimento di uranio in Africa, si scatenarono reazioni spontanee di fissione nucleare. Ma i dettagli di questo straordinario fenomeno si stanno chiarendo solo ora

di Alex P. Meshik



L'estrazione a cielo aperto dell'uranio dal giacimento di Oklo, in Gabon, ha rivelato oltre una dozzina di aree dove in un remoto passato hanno avuto luogo reazioni di fissione spontanee.



## Maggio 1972: in Francia, un tecnico al lavoro in un impianto per il trattamento di combustibile nucleare nota qualcosa di sospetto.

L'uomo era impegnato in un'analisi di routine su uranio ricavato da un minerale apparentemente regolare. Il campione sottoposto ad analisi conteneva tre isotopi, vale a dire tre forme dell'elemento con differenti masse atomiche, una proprietà comune a tutto l'uranio di origine naturale: uranio-238, la varietà più abbondante, uranio-234, la più rara, e uranio-235, l'isotopo più ricercato, poiché è in grado di alimentare una reazione a catena.

In tutta la crosta terrestre, sulla Luna e persino nei meteoriti, l'uranio-235 costituisce appena lo 0,720 per cento del totale.

Ma nei campioni analizzati dal



**FENOMENI AFRICANI.** I reattori nucleari naturali finora sono stati identificati solo nel Gabon, in particolare nelle miniere uranifere di Oklo e di Okelobondo e nel sito di Bangombe, situato a circa 35 chilometri di distanza.

tecnico, che provenivano dal giacimento di Oklo, in Gabon (un'ex colonia della Francia nell'Africa equatoriale occidentale), l'uranio-235 arrivava solo allo 0,717 per cento. La microscopica differenza fu sufficiente a far sospettare agli scienziati francesi che fosse successo qualcosa di strano. Ulteriori analisi dimostrarono che il minerale proveniente da almeno una parte della miniera era carente di uranio-235: era come se ne fossero scomparsi 200 chilogrammi, quanto bastava per realizzare 5 o 6 bombe nucleari.

Gli specialisti del Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), la Commissione francese per l'energia atomica, rimasero perplessi per settimane. La soluzione del mistero giunse solo quando si ricordarono di uno studio pubblicato 19 anni prima. Nel 1953, George W. Wetherill, dell'Università della California a Los Angeles, e Mark G. Inghram, dell'Università di Chicago, avevano avanzato l'ipotesi che in passato alcuni giacimenti di uranio avessero funzionato come versioni naturali dei reattori a fissione nucleare, una tecnologia che si andava diffondendo proprio in quegli anni. Poco tempo dopo, Paul K. Kuroda, un chimico dell'Università dell'Arkansas, aveva calcolato le condizioni in cui una massa di minerale contenente uranio è in grado di generare spontaneamente un processo di fissione nucleare autosostenuto. In questo processo, il

nucleo di un atomo di uranio-235 subisce fissione per impatto con un neutrone; nella reazione si liberano altri neutroni, che a loro volta vanno a colpire altri nuclei di uranio-235, provocando una reazione a catena.

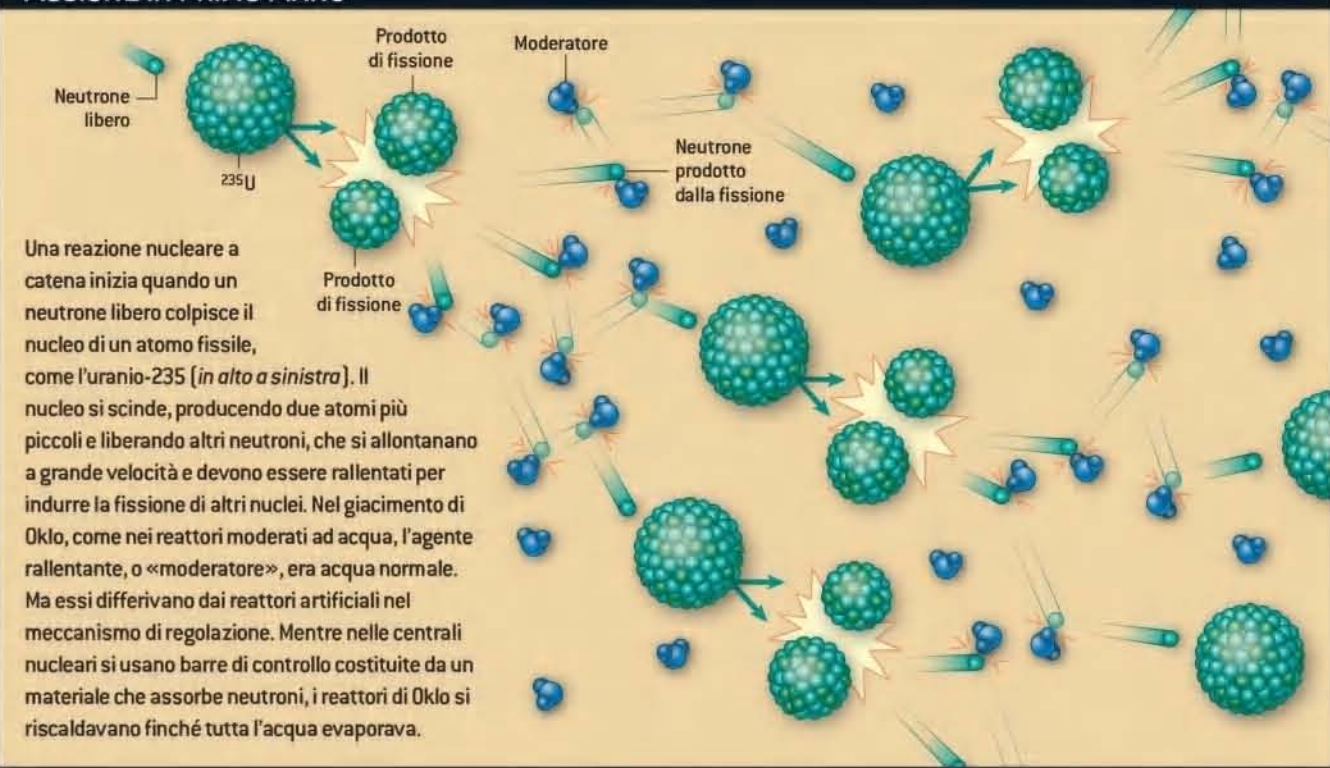
La prima condizione individuata da Kuroda perché ciò potesse accadere riguardava la dimensione del deposito di uranio: doveva essere maggiore del cammino medio dei neutroni che inducono fissione, ossia circa due terzi di metro. In questo modo, i neutroni emessi dalla fissione di un nucleo potevano essere assorbiti da un altro nucleo prima di fuoriuscire dalla vena mineraria.

Inoltre, doveva essere disponibile una quantità sufficiente di uranio-235. Oggi persino il deposito di uranio più grande e concentrato non può diventare un reattore nucleare naturale, perché la concentrazione dell'isotopo 235, inferiore all'uno per cento, è troppo bassa. Ma l'uranio-235 è radioattivo, e decade quasi sei volte più velocemente dell'uranio-238, il che vuol dire che in passato la frazione di materiale fissile era molto più elevata. Per esempio, due miliardi di anni fa (il periodo in cui si è formato il giacimento di Oklo) l'isotopo 235 doveva essere circa il tre per cento del totale dell'uranio, un livello pari a quello ottenuto artificialmente nell'uranio arricchito usato per alimentare la maggior parte delle centrali nucleari.

Il terzo ingrediente fondamentale è un «moderatore» di neutroni, ossia una sostanza in grado di rallentare i neutroni emessi nel corso della fissione di un nucleo, così da indurre più facilmente la scissione dei nuclei di uranio. Infine, non dovrebbero essere presenti quantità significative di boro, litio o altri «veleni» che, assorbendo i neutroni, fanno cessare rapidamente la reazione nucleare.

Sorprendentemente, due miliardi di anni fa (e, come è stato poi accertato, in ben 16 aree distinte all'interno delle miniere d'uranio di Oklo e della vicina Okelobondo) si sono verificate condizioni molto vicine a quelle delineate da Kuroda. Queste zone sono state identificate decine di anni fa, ma soltanto di recente io e i

### FISSIONE IN PRIMO PIANO



miei colleghi abbiamo finalmente chiarito alcuni dettagli fondamentali di ciò che accadde realmente in uno di questi antichi reattori naturali.

### L'indiscutibile prova degli elementi leggeri

L'ipotesi che l'impovertimento dell'uranio-235 rilevato a Oklo fosse da attribuire a reazioni di fissione naturale fu confermata poco dopo la scoperta dell'anomalia. L'analisi degli elementi leggeri, generati dalla scissione di un nucleo pesante, fornì prove indiscutibili, poiché l'abbondanza di questi prodotti di fissione si rivelò così elevata da escludere a priori qualsiasi altra conclusione. Dunque, una reazione nucleare a catena molto simile a quella celeberrima realizzata in laboratorio nel 1942 da Enrico Fermi e colleghi, era già avvenuta due miliardi di anni prima, e in modo del tutto spontaneo.

Subito dopo questa straordinaria scoperta, i fisici di tutto il mondo esaminarono le prove esistenti sui reattori nucleari naturali, e nel 1975 si riunirono a Libreville, la capitale del Gabon, in una conferenza speciale per discutere gli studi sul «fenomeno di Oklo». L'anno successivo, George A. Cowan, che rappresentava

gli Stati Uniti, pubblicò un articolo per «Scientific American» intitolato *Un reattore nucleare a fissione* (si veda «Le Scienze», n. 99, novembre 1976), in cui illustrò le conclusioni raggiunte dagli scienziati sul funzionamento di questi antichi reattori.

Per esempio, Cowan descrisse come

L'abbondanza di elementi leggeri ha permesso di calcolare che le reazioni di fissione durarono per centinaia di migliaia di anni. Inoltre, dalla quantità di uranio-235 consumato è stata calcolata l'energia totale prodotta – 15.000 megawatt all'anno – e da questo valore, assieme ad altre informa-

## Come mai questi reattori naturali non sono esplosi subito dopo l'inizio della reazione a catena?

alcuni dei neutroni liberati durante la fissione dell'uranio-235 fossero stati catturati dall'uranio-238, più abbondante, che in questo modo si trasformava in uranio-239 e, con l'emissione di due elettroni, decadeva in plutonio-239. All'interno del giacimento di Oklo furono generate oltre due tonnellate di plutonio-239; e anche se nel frattempo la maggior parte di questo materiale è scomparsa, poiché ha un tempo di dimezzamento di 24.000 anni, una parte del plutonio è andata incontro a una reazione di fissione, come dimostra la presenza dei caratteristici prodotti di reazione di questo processo.

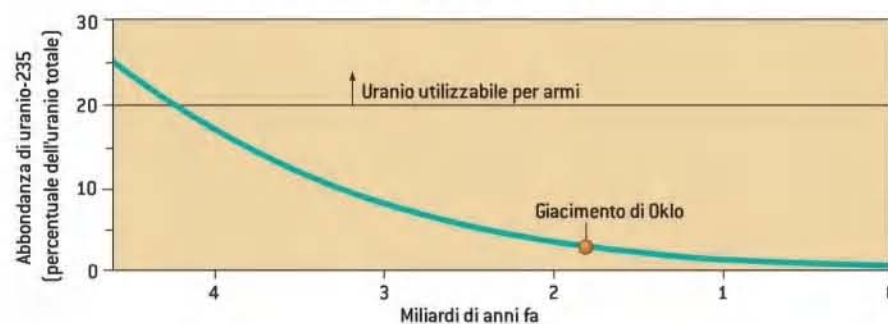
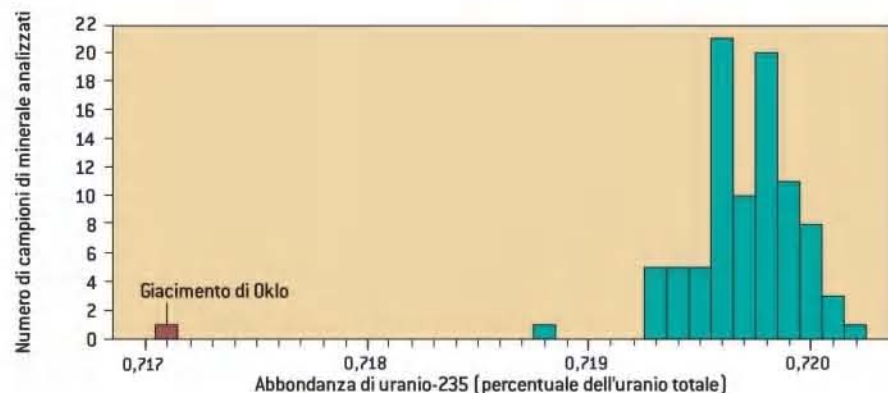
zioni, è stata ricavata l'emissione media, che probabilmente era inferiore a 100 chilowatt: più o meno quanto basta per far funzionare qualche decina di tostapane.

È sbalorditivo che oltre una dozzina di reattori naturali si siano attivati spontaneamente e che siano riusciti a produrre quantità sia pur modeste di energia forse per centinaia di migliaia di anni. Ma come è possibile che queste zone dei giacimenti non siano esplose, distruggendosi, subito dopo l'inizio delle reazioni a catena? Qual è stato il meccanismo di autoregolazione? I reattori funzionavano in continuo o a intermittenza? Dopo la scoperta

### In sintesi/Reattori fossili

- Trent'anni fa, alcuni scienziati francesi scoprirono che alcune zone di un giacimento di uranio in corso di sfruttamento nel Gabon, in un remoto passato avevano funzionato come reattori a fissione naturali.
- Recentemente un gruppo di ricerca di cui fa parte l'autore di queste pagine ha usato misurazioni degli isotopi dello xeno (un gas inerte prodotto dalla fissione dell'uranio) per calcolare che uno di questi antichi reattori probabilmente ha funzionato in modo ciclico: a mezz'ora di attività seguivano due ore e mezza di quiescenza.
- Ulteriori studi dello xeno contenuto nei minerali forse riveleranno l'esistenza di reattori nucleari naturali anche in altri siti. Per il momento, quelli scoperti in Gabon sono un'opportunità davvero unica per studiare sia i possibili cambiamenti di costanti fisiche fondamentali sia la migrazione nel tempo di scorie nucleari immagazzinate nel sottosuolo.





GLI ATOMI DI URANIO-235 costituiscono quasi ovunque sul pianeta lo 0,720 per cento circa dell'uranio presente in natura. Così fu una vera sorpresa scoprire che l'uranio estratto dalla miniera di Oklo ne conteneva poco più dello 0,717, che si discosta nettamente dall'intervallo normale rilevato per i minerali di uranio (*in alto*). La spiegazione è che in passato il rapporto tra uranio-235 e 238 era molto più alto, dato che l'isotopo 235 ha un tempo di dimezzamento assai più breve. In certe condizioni, questo rapporto più elevato rese possibili reazioni di fissione che consumarono una parte dell'uranio-235. Quando si formò il giacimento di Oklo, 1,8 miliardi di anni fa, il livello naturale di isotopo 235 era intorno al tre per cento, analogo a quello che si raggiunge oggi in molti combustibili per reattori nucleari.



LO XENO ESTRATTO dai grani di fosfato di alluminio in un campione di Oklo mostra una composizione isotopica peculiare (*a sinistra*), che non concorda con quella prevista dalla fissione dell'uranio (*al centro*), né assomiglia alla composizione isotopica dello xeno nell'atmosfera (*a destra*). Si noti che i livelli di xeno-131 e 132 sono più elevati e quelli di xeno-134 e 136 sono più bassi di quelli che si ottengono normalmente dalla fissione dell'uranio-235. All'inizio queste osservazioni sembravano inspiegabili, ma in seguito si è capito che rappresentavano la chiave per descrivere il funzionamento di questo antico reattore nucleare.

#### L'AUTORE

ALEX P. MESHIK ha studiato fisica all'Università Statale di San Pietroburgo, in Russia, ottenendo il dottorato nel 1988 presso l'Istituto Vernadsky dell'Accademia delle Scienze con una tesi dedicata a geochimica, geocronologia e chimica nucleare di xeno e kripton. Dal 1996 lavora al Laboratory for Space Sciences della Washington University a Saint Louis, dove attualmente studia i campioni di gas nobili del vento solare raccolti e portati a terra dalla sonda Genesis.

del fenomeno di Oklo, le risposte a questi interrogativi sono arrivate un po' alla volta, ma l'ultima ha dovuto attendere oltre trent'anni, finché i miei colleghi e io, alla Washington University, abbiamo iniziato a occuparcene, analizzando un frammento dell'enigmatico minerale africano.

### La rivelazione dei gas nobili

Le nostre recenti ricerche su uno dei reattori di Oklo si sono concentrate sull'analisi dello xeno, un gas inerte e pesante che può rimanere imprigionato nei minerali per miliardi di anni. Lo xeno ha nove isotopi stabili, prodotti in varie proporzioni da differenti processi nucleari. Poiché è un gas nobile, non tende a formare legami chimici con altri elementi, quindi è facile da ottenere in forma pura per l'analisi isotopica. Lo xeno è estremamente raro, il che consente agli scienziati di sfruttarlo per individuare e seguire il corso delle reazioni nucleari, persino quelle che avvennero in meteoriti primordiali, in un'epoca precedente alla nascita del sistema solare.

Per analizzare la composizione isotopica dello xeno occorre lo spettrometro di massa, uno strumento che separa gli atomi in base al peso atomico; nel caso, ci siamo serviti di uno strumento estremamente preciso, costruito da Charles M. Hohenberg, un collega della Washington University. Ma prima di usarlo dovevamo estrarre il gas dal campione. Di solito si riscalda il materiale in cui è intrappolato lo xeno così da far perdere alla roccia la sua struttura cristallina e liberare il gas. Ma per raccogliere più informazioni abbiamo deciso di adottare un metodo meno brutale, l'estrazione con il laser, che libera selettivamente lo xeno da un singolo grano di minerale, lasciando intatte le aree di roccia adiacenti.

Abbiamo applicato questa tecnica a diverse aree dell'unico frammento di roccia di Oklo di cui disponevamo, che misura appena quattro millimetri di diametro per un millimetro di spessore. Ovviamente la prima cosa da decidere è stata dove puntare il fascio laser. A questo scopo, ci siamo affidati alla nostra collega Olga Pravdivtseva, che aveva realizzato una mappa dettagliata del campione ai raggi X, e ne aveva identificato i minerali costituenti. Dopo ogni estrazione, abbiamo purificato il gas e poi l'abbiamo trasferito

#### NEL CUORE DELLA ROCCIA.

Un tecnico indica i resti del «nocciolo» del reattore naturale identificato nella zona del giacimento di uranio denominata Oklo 15. In tutto, a Oklo sono stati trovati 16 reattori.

nello spettrometro di massa, che ha indicato il numero di atomi di ciascun isotopo.

La prima sorpresa è stata la collocazione dello xeno. Anziché trovarne quantità significative nei grani di minerale ricchi di uranio, come ci attendevamo, la maggior parte era intrappolata in quelli di fosfati di alluminio, che non contengono uranio. Ed è da sottolineare che la concentrazione di xeno presente in questi grani è la più elevata mai misurata in un materiale naturale. Inoltre, e questa è stata la seconda sorpresa, il gas estratto aveva una composizione isotopica sensibilmente diversa dal gas prodotto nei reattori nucleari, come se fosse andata perduta una notevole frazione degli isotopi 136 e 134, che certamente devono essere stati creati nella fissione, mentre le varietà più leggere dell'elemento mostravano minori anomalie.

Come poteva essersi verificata una simile alterazione della composizione isotopica? Non attraverso reazioni chimiche, perché tutti gli isotopi sono chimicamente identici. Forse mediante reazioni nucleari, come la cattura di neutroni? Un'attenta analisi ci ha permesso di escludere questa possibilità. Abbiamo anche considerato i fenomeni di separazione fisica di isotopi differenti riscontrati in alcuni casi: gli atomi pesanti si muovono un po' più lentamente delle loro controparti leggere e in questo modo possono allontanarsi gli uni dagli altri. Gli impianti per l'arricchimento dell'uranio – installazioni industriali di costruzione assai complessa – sfruttano questa proprietà per produrre combustibile per i reattori. Ma anche se la natura riuscisse a dare vita a un processo simile su scala microscopica, la miscela di isotopi dello xeno nei grani di fosfato di alluminio da noi studiati sarebbe stata differente rispetto a quanto trovato. Per esempio, se fosse avvenuto un processo di separazione fisica, l'impoverimento di xeno-136 rispetto alla quantità di xeno-132 presente avrebbe dovuto essere doppio se confrontata con quella dello xeno-134. Ma non abbiamo rilevato nulla di simile.

Siamo arrivati a capire il perché di questa anomalia solo dopo aver riflettuto a



## Anche se in quantità modeste, i reattori di Oklo produssero energia per centinaia di migliaia di anni

lungo. Nessuno degli isotopi dello xeno da noi misurati era il risultato diretto della fissione dell'uranio. Erano, invece, prodotti del decadimento di isotopi radioattivi dello iodio, che a sua volta derivavano da tellurio radioattivo e così via, secondo una ben nota sequenza di reazioni nucleari che termina con l'isotopo stabile di xeno.

L'intuizione chiave è stata capire che i diversi isotopi di xeno nel campione di Oklo furono generati in momenti diversi, in una successione che dipendeva dal tempo di dimezzamento dei loro predecessori, gli isotopi dello iodio e del tellurio. Quanto maggiore è la durata di vita media di un particolare precursore, tanto più è distante la formazione di xeno che ne deriva. Per esempio, nel caso di Oklo la produzione di xeno-136 ebbe inizio un minuto circa dopo l'instaurarsi della fissione. Un'ora più tardi si formò l'isotopo immediatamente più leggero, lo xeno-134, e dopo qualche giorno, arrivarono lo xeno-132 e 131. Infine, dopo milioni di anni, molto tempo dopo l'esaurimento delle reazioni

nucleari a catena, si formò lo xeno-129.

Se il giacimento di Oklo fosse rimasto un sistema chiuso, lo xeno accumulato durante il funzionamento dei reattori avrebbe conservato la normale composizione isotopica prodotta dalla fissione. Ma nulla fa pensare che il sistema fosse chiuso. Anzi, ci sono buone ragioni per pensare il contrario, soprattutto se si considera che i reattori di Oklo si autoregolavano. Il meccanismo più probabile chiama in causa l'azione di una falda freatica che, presumibilmente, evaporava quando la temperatura raggiungeva un certo livello critico. In assenza di acqua che facesse da moderatore di neutroni, le reazioni nucleari a catena cessavano temporaneamente. La fissione poteva riprendere solo dopo un raffreddamento e un afflusso d'acqua in quantità sufficiente a permeare di nuovo la zona di reazione.

Questa ipotesi sul funzionamento dei reattori di Oklo mette in evidenza due punti importanti. Anzitutto, è verosimile che fossero attivi in modo intermittente.



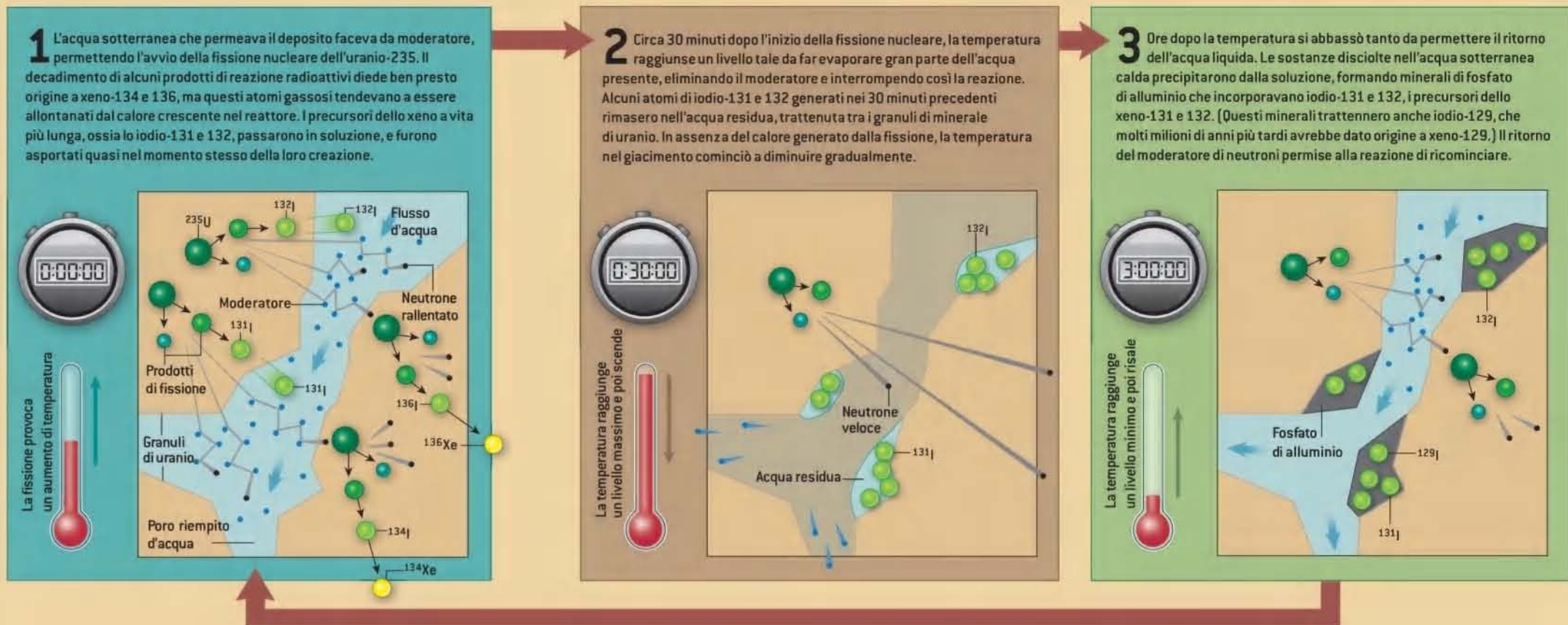
Inoltre, ci deve essere stato un ingente movimento di acqua attraverso le rocce circostanti, sufficiente per asportare una parte dei precursori dello xeno – tellurio e iodio – entrambi idrosolubili. La presenza di acqua consente anche di spiegare perché oggi gran parte dello xeno si trova nei grani di fosfato di alluminio anziché nei minerali ricchi di uranio, dove i precursori radioattivi furono generati per fissione. Lo xeno non passò da un tipo di minerale preesistente a un altro, perché è improbabile che fossero presenti fosfati di alluminio prima che i reattori di Oklo iniziassero a funzionare. Probabilmente, i grani di fosfato di alluminio si formarono *in situ* per azione dell'acqua riscaldata dalle reazioni nucleari, dopo il suo raffreddamento fino a una temperatura di circa 300 gradi.

Buona parte dello xeno (compresi gli isotopi 136 e 134, che erano generati in maniera relativamente rapida) fu allontanata dal sistema, sia durante il periodo di attività dei reattori di Oklo, sia nel periodo successivo, finché la temperatura rimase abbastanza elevata. Quando il reattore si raffreddò, i precursori dello xeno a vita più lunga (che in seguito avrebbero prodotto gli isotopi 132, 131 e 129, presenti in quantità relativamente abbondante) furono incorporati soprattutto nei grani di fosfato di alluminio in accrescimento. Poi, quando nella zona di reazione tornò a esserci acqua a sufficienza, il processo di moderazione attraverso i neutroni poté di nuovo svolgersi adeguatamente e la reazione di fissione riprese a funzionare, consentendo al ciclo di riscaldamento e raffreddamento di ripetersi. Come risultato si è avuta la separazione peculiare degli isotopi di xeno che abbiamo osservato.

Non è chiaro quali forze mantennero lo xeno all'interno dei grani di fosfato di alluminio, per quasi metà della vita del nostro pianeta. In particolare, perché lo xeno generato durante una certa fase di attività non fu espulso dal sistema nel corso della successiva? Probabilmente lo xeno rimase imprigionato nella struttura a forma di gabbia dei minerali di fosfato di alluminio, che, quindi, furono in grado di trattenerne il gas generato al loro interno anche a temperature elevate. I dettagli sono ancora poco definiti ma, a prescindere dalle risposte certe, un punto è chiaro: la capacità di cattura dello xeno da parte del fosfato di alluminio è davvero sbalorditiva.

## IL CICLO DEL REATTORE

Per riuscire a spiegare la composizione isotopica dello xeno a Oklo è stato necessario prendere in considerazione anche altri elementi. Lo iodio, in particolare, ha attratto l'attenzione perché lo xeno deriva dal suo decadimento radioattivo. I modelli della genesi dei prodotti di fissione e del loro decadimento hanno rivelato che la peculiare composizione isotopica dello xeno è il risultato del funzionamento ciclico del reattore. Questo ciclo è raffigurato nei tre riquadri a destra.



## Il progetto della natura

Dopo aver ricostruito il meccanismo che generò la miscela di isotopi dello xeno nei grani di fosfato di alluminio, abbiamo cercato di realizzare un modello matematico del processo. In questo modo siamo riusciti a raccogliere molte informazioni sugli aspetti temporali del funzionamento del reattore, ottenendo pressoché gli stessi risultati con tutti gli isotopi dello xeno. Il reattore di Oklo da noi studiato si «accese» per 30 minuti e si «spense» per almeno 2,5 ore. Questo andamento non è diverso da ciò che si osserva in alcuni geyser, che si riscaldano lentamente, vaporizzano in un getto spettacolare l'acqua accumulata, si riempiono di nuovo e ripetono il ciclo giorno dopo giorno, anno dopo anno.

L'analogia conferma l'ipotesi che l'acqua sotterranea che permeò il giacimento di Oklo, oltre a fare da moderatore di neutroni, rese possibile, vaporizzandosi a intermittenza, il processo di autoregolazione che protesse dalla distruzione questi

reattori nucleari naturali. Da questo punto di vista, il meccanismo fu estremamente efficace, visto che in centinaia di migliaia di anni non si è verificato neppure un episodio di fusione o un'esplosione.

Si potrebbe pensare che l'industria dell'energia nucleare abbia qualcosa da imparare da Oklo, ed è così, ma non necessariamente per quel che riguarda la progettazione di reattori. Le lezioni più importanti potrebbero interessare, invece, la gestione delle scorie nucleari. Dopo tutto, Oklo è un buon modello di deposito geologico a lungo termine, e per questo motivo gli scienziati hanno studiato dettagliatamente come si è svolta nel tempo la migrazione dei prodotti di fissione generati da questi reattori naturali.

È stata anche esaminata un'analoga zona che in passato fu sede di fissione nucleare, nella località di Bangombe, a circa 35 chilometri da Oklo. Il reattore di Bangombe è di particolare interesse perché era situato a minore profondità di quelli individuati nelle miniere di Oklo e Okelobondo, e

quindi è stato più esposto alla circolazione dell'acqua in tempi recenti. Nel complesso, le osservazioni suggeriscono che sia possibile segregare in sicurezza nel sottosuolo vari tipi di scorie nucleari.

Oklo indica anche come si potrebbero immagazzinare alcuni tipi di rifiuti nucleari di cui un tempo si riteneva quasi impossibile evitare la dispersione nell'ambiente. Da quando è iniziata la produzione di energia nucleare, sono stati liberati nell'atmosfera enormi quantitativi di xeno-135, kripton-85 e altri gas inerti e radioattivi, generati nelle centrali. I reattori naturali suggeriscono la possibilità di immagazzinare queste sostanze inquinanti in minerali di fosfato di alluminio, che hanno la particolare capacità di catturare e trattenere questi gas per miliardi di anni.

I reattori di Oklo potrebbero anche fornire informazioni sulle possibili variazioni di quella che un tempo era ritenuta una costante fisica fondamentale, chiamata  $\alpha$ , che controlla grandezze universali come la velocità della luce (si veda l'articolo *Costanti*

*incostanti*, di John D. Barrow e John K. Webb, «Le Scienze» n. 444, agosto 2005). Da trent'anni a questa parte, il fenomeno di Oklo, verificatosi due miliardi di anni fa, è chiamato in causa per sostenere che  $\alpha$  non è mai cambiata. Ma lo scorso anno Steven K. Lamoreaux e Justin R. Torgerson del Los Alamos National Laboratory sono partiti proprio dai dati di Oklo per ipotizzare che questa «costante» abbia in realtà subito variazioni significative (e, stranamente, nel senso opposto a quanto altri hanno proposto recentemente). I calcoli di Lamoreaux e

Torgerson dipendono da alcuni dettagli del funzionamento di Oklo, e il lavoro svolto da me e i miei colleghi potrebbe contribuire a chiarire questo spinoso problema.

Gli antichi reattori del Gabon furono i soli a essersi mai formati sulla Terra? Due miliardi di anni fa, le condizioni necessarie per una reazione di fissione in grado di autosostenersi non dovevano essere rare, quindi si può pensare che un giorno si scopriranno altri reattori naturali. Qualche sbuffo rivelatore di xeno aiuterà enormemente questa ricerca.

## PER APPROFONDIRE

KURODA P.K., *On the Nuclear Physical Stability of the Uranium Minerals*, in «Journal of Chemical Physics», Vol. 25, n. 4, pp. 781-782, 1956.

COWAN G.A., *Un reattore nucleare naturale*, in «Le Scienze», novembre 1976.

LAMOREAUX S.K. e TORGERSON J.R., *Neutron Moderation in the Oklo Natural Reactor and the Time Variation of Alpha*, in «Physical Review D», Vol. 69, n. 12, giugno 2004.

MESHIAK A.P., HOHENBERG C.M. e PRAVDIVTSEVA O.V., *Record of Cycling Operation of the Natural Nuclear Reactor in the Oklo/Okelobondo Area in Gabon*, in «Physical Review Letters», Vol. 93, n. 18, ottobre 2004.