

Descoberta de um reactor nuclear pré-histórico

por JAIME DA COSTA OLIVEIRA

(Laboratório de Física e Engenharia Nucleares
da Junta de Energia Nuclear, Sacavém)

No domínio nuclear, o ano de 1972 ficou assinalado por uma descoberta espectacular: a dos restos de um reactor nuclear pré-histórico, que terá funcionado num jazigo de urânio da República do Gabão.

Tal descoberta foi mantida secreta até 25 de Setembro de 1972, altura em que o Commissariado de Energia Atómica francês a divulgou à comunidade científica internacional sob a forma de duas comunicações à Academia das Ciências, após se ter assegurado da realidade do fenómeno com algumas provas sérias. No dia seguinte, André Giraud, Administrador Geral Delegado do CEA, anunciava também a descoberta, durante a sessão inaugural da conferência da Agência Internacional de Energia Atómica reunida no México.

Cerca de quatro meses tinham passado desde a observação de importantes anomalias de composição isotópica nos minérios de urânio provenientes do jazigo de Oklo no Gabão. Recordar-se que, desde os anos 30, se admitia que no urânio natural, isto é, no urânio proveniente de uma mina e que apenas foi sujeito a epurações químicas, a percentagem de urânio-235 (^{235}U) era de 0,720 2%. Um grande número de análises efectuadas por diferentes laboratórios sobre minérios provenientes das origens mais diversas (até da Lua) jamais forneceu desvios em relação àquela concentração média superiores a 0,1% (0,000 7% em ^{235}U).

No início do mês de Junho de 1972,

os laboratórios da Direcção de Produções do CEA, ao efectuar análises de controlo do hexafluoreto de urânio natural produzido em Pierrelatte, detectaram concentrações anormalmente baixas em ^{235}U . Os resultados obtidos variavam entre 0,621 e 0,641% para um grande número de lotes de concentrados de minérios provenientes do jazigo de Oklo, representando cada lote algumas toneladas de urânio. Análises efectuadas sobre certas amostras representando algumas centenas de gramas de urânio forneceram mesmo as concentrações espantosas de 0,592 e de 0,440% em ^{235}U , sendo os valores mais baixos encontrados em minérios cujo teor em urânio era mais elevado. Além disso, algumas amostras revelaram um ligeiro enriquecimento em ^{235}U que podia atingir 0,730%. Note-se que estas análises, embora de grande precisão, destinavam-se a um controlo de rotina, dado que o valor de 0,720% constituía um dado científico sólido, como se referiu.

Os geólogos, os químicos e os físicos do CEA, postos ao corrente destes dados imprevistos colhidos pelos laboratórios industriais, iniciaram imediatamente um estudo pormenorizado do fenómeno, chegando à conclusão que as anomalias observadas só podiam ser explicadas pela ocorrência natural, num passado muito remoto, de uma reacção em cadeia de cisões nucleares.

Um primeiro argumento a favor de tal conclusão foi fornecido pela observação de uma repartição anormal na re-

gião dos lantanídeos («terras raras») (fig. 1) em resultado da análise por espectrografia de massa de uma amostra de minério: os picos correspondentes aos elementos de número de massa superior a 166 praticamente não existiam. Todavia, tais elementos figuram de forma apreciável na repartição normal dos lantanídeos. Como os rendimentos de cisão do

didadas as razões $^{140}\text{Ce}/^{142}\text{Ce}$ e $^{149}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$. No Quadro I, estão coligidos os resultados obtidos a partir da análise de duas amostras de minério (Oklo M e Oklo 310), bem como a composição isotópica dos elementos naturais.

A comparação destes valores revela diferenças consideráveis em relação aos elementos naturais. A fraquíssima per-

1	IA																VIII B										2
1	H																					He					
2	3	4	II A III A										6	7	8	9	10										
2	Li	Be	B											C	N	O	F	Ne									
3	11	12	13											14	15	16	17	18									
3	Na	Mg	Al	IV A V A VI A VII A VIII A										Si	P	S	Cl	Ar									
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36									
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr									
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54									
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe									
6	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72									
6	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Rn									
7	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104									
7	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Mn	Yb	Lu	Rn									

Fig. 1 — Os elementos a sombreado são os lantanídeos («terras raras»).

^{235}U (fig. 2) são muito baixos para números de massa superiores a 166, parecia estar-se em presença de consequências de cisões nucleares em cadeia.

O estudo passou a incidir então sobre os lantanídeos contidos nas amostras de minério, os quais foram separados por meio de uma técnica cromatográfica, sendo o neodímio (Nd) e o európio (Eu), assim obtidos, analisados isotopicamente com um espectrógrafo de massa. Para o cério (Ce) e o samário (Sm) foram me-

centagem de ^{149}Sm (menos de 1% em vez de 13% no samário natural) poderá ser atribuída ao seu desaparecimento por captura neutrónica, uma vez que a secção eficaz (1) é muito elevada ($\sigma = 60 \times 10^3 \text{ b}$),

(1) A secção eficaz, σ , de um núcleo atómico, para uma dada reacção nuclear, define-se por forma que, dado um feixe homogéneo de I partículas por cm^2 e por segundo, o número de interações observadas por segundo é $I\sigma$. Se a secção eficaz, que se exprime em *barn* ($1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$), é grande, é muito provável que a reacção se dê.

o mesmo se passando com o ^{151}Eu ($\sigma = 9 \times 10^3 \text{ b}$). Estaríamos pois em presença de consequências de uma forte irradiação neutrónica.

Os valores respeitantes ao neodímio (Nd) são particularmente interessantes. É o caso do ^{142}Nd cuja presença é um testemunho do neodímio natural, dado

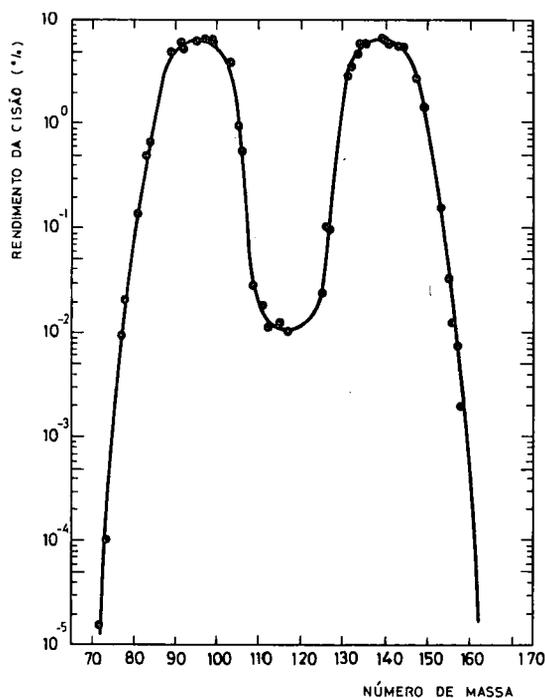


Fig. 2 — PROPORÇÃO DO NÚMERO TOTAL DE CISÕES DO ^{235}U DE QUE RESULTAM FRAGMENTOS COM UM DADO NÚMERO DE MASSA.

que aquele isótopo não é um produto de cisão. É pois possível fazer uma correcção das composições das amostras para ter em conta este facto e compará-las então com as concentrações dos diversos isótopos de neodímio provenientes da cisão do ^{235}U .

Observa-se no Quadro II que o ^{143}Nd aparece com uma concentração ligeiramente inferior à que corresponde ao rendimento de cisão, ao passo que o inverso

se verifica em relação ao ^{144}Nd . Uma compensação análoga, embora mais ténue, ocorre entre os isótopos 145 e 146.

Se agruparmos os pares $^{143}\text{Nd} + ^{144}\text{Nd}$ e $^{145}\text{Nd} + ^{146}\text{Nd}$, obtém-se um acordo no-

QUADRO I

Análise das amostras

	Amostras			
	Oklo M. (38,5% de U)	Oklo 310 (14,3% de U)	Elemento natural	
Composição isotópica (%)	$^{235}\text{U} \dots$	0,440 0	0,592	0,720 2
		$\pm 0,000 5$	$\pm 0,001$	
	$^{142}\text{Nd} \dots$	1,38	5,49	27,11
	$^{143}\text{Nd} \dots$	22,1	23,0	12,17
	$^{144}\text{Nd} \dots$	32,0	28,2	23,85
	$^{145}\text{Nd} \dots$	17,5	16,3	8,30
	$^{146}\text{Nd} \dots$	15,6	15,4	17,22
	$^{148}\text{Nd} \dots$	8,01	7,70	5,73
	$^{150}\text{Nd} \dots$	3,40	3,90	5,62
		99,99	99,99	100,00
Precisão relativa	2 a 3%	1%	0,2%	
$^{151}\text{Eu} / ^{153}\text{Eu} \dots$	0,145	0,852	0,916	
$^{140}\text{Ce} / ^{142}\text{Ce} \dots$	1,57		7,99	
$^{149}\text{Sm} / ^{147}\text{Sm} \dots$	$\approx 0,003$		0,924	

tável entre as concentrações medidas e as deduzidas dos rendimentos de cisão do urânio (Quadro III), parecendo provável que se tenha registado uma taxa de cisões rápidas do ^{238}U da ordem de 5% e uma ausência quase completa de cisões do ^{239}Pu .

É ainda possível corrigir as concentrações dos isótopos que figuram no

Quadro II para ter em conta a elevada secção eficaz do ^{143}Nd ($\sigma_{143} = 346 \text{ b}$) e do ^{145}Nd ($\sigma_{145} = 70 \text{ b}$, secção eficaz sensível à fracção de neutrões epitérmicos). Para efectuar este cálculo, é necessário estimar

QUADRO II

Composição isotópica do Nd corrigida da contribuição devida ao elemento natural

	Oklo M	Oklo 310	Cisão ^{235}U
^{142}Nd	0%	0%	0%
^{143}Nd	22,6	25,7	23,8
^{144}Nd	32,4	29,3	26,5
^{145}Nd	18,05	18,4	18,9
^{146}Nd	15,55	14,9	14,4
^{148}Nd	8,13	8,20	8,26
^{150}Nd	3,28	3,46	3,12

a fluência de neutrões $\tau = \int \phi dt$ (ϕ é a densidade de fluxo neutrónico), o que se pode fazer a partir das relações que regem a evolução dos isótopos de neodímio. Obtém-se assim $\tau = 1,28 \times 10^{21} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ para a amostra Oklo M e $\tau = 0,62 \times 10^{21} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ para a Oklo 310.

Os resultados apresentados permitem, por conseguinte, apoiar a ideia de que a ocorrência de uma reacção em cadeia de cisões nucleares poderá explicar as anomalias isotópicas encontradas nos resultados das análises do hexafluoreto de urânio preparado a partir de minérios provenientes do Gabão.

O facto de se poder excluir quase por completo as contribuições devidas à cisão do ^{239}Pu (já assinalado a propósito do Quadro III) indicaria que a reacção em cadeia terá sido lenta em relação ao período deste isótopo ($24\,400 \text{ a}$):

$$\sigma \phi \ll \lambda \text{ ou seja } \sigma \phi t \ll \lambda t$$

donde

$$\sigma \phi t \approx 10^{-21} (\text{cm}^2) \times 10^{21} (\text{cm}^{-2}) = 1 \ll \lambda t.$$

A duração da reacção terá sido, portanto:

$$t \gg 35 \times 10^5 \text{ anos.}$$

Tendo em conta o valor do período do isótopo ^{236}U ($T = 24 \times 10^6 \text{ a}$), a sua ausência nas amostras de minério ($^{236}\text{U}/^{238}\text{U} < 10^{-5}$) indica que uma reacção em cadeia só poderia ter ocorrido no jazigo de Oklo há mais de cem milhões de anos. Ora a medição da idade da bacia sedimentar de Franceville, onde está situado

QUADRO III

Composição do neodímio: valores medidos e deduzidos dos rendimentos de cisão

	Oklo M	Oklo 310	Cisão			
			^{235}U	^{238}U	^{239}Pu	95% ^{235}U +5% ^{238}U
$^{143}\text{Nd} + ^{144}\text{Nd}$	55,0%	55,0%	55,3%	46,4%	50,3%	54,85%
$^{145}\text{Nd} + ^{146}\text{Nd}$	33,6	33,3	33,3	36,4	33,5	33,45
^{148}Nd	8,13	8,20	8,26	10,7	10,3	8,38
^{150}Nd	3,28	3,46	3,12	6,61	5,87	3,30

o jazigo, forneceu o resultado de 1740 ± 20 milhões de anos (pré-câmbrico). Por essa altura, atendendo aos períodos do ^{235}U ($7,1 \times 10^8$ a) e do ^{238}U ($4,5 \times 10^9$ a), o enriquecimento em ^{235}U era de 3% (Quadro IV), aproximadamente o valor do enriquecimento do urânio utilizado como combustível nos reactores a água natural actuais.

Finalmente, o estudo geológico das condições de formação deste depósito sedimentar revelou a presença de água na época da mineralização.

QUADRO IV

Variação do enriquecimento com a idade

Idade ($\times 10^9$ a)	0	1	1,5	1,75	2	3
$\frac{^{235}\text{U}}{^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}}$ (%)	0,72	1,6	2,4	3	3,6	7,8

Jazigo antigo, contendo grandes volumes de urânio com elevado teor, presença de água muito provável e fraca concentração de elementos absorventes de neutrões formam um conjunto de circunstâncias propícias ao estabelecimento de uma reacção em cadeia de cisões nucleares. A simultaneidade destas condições é, todavia, muito rara o que explica que o fenómeno de Oklo seja, até agora,

o único do género de que se tem conhecimento.

Não está terminado o estudo deste reactor nuclear fóssil: as questões relativas ao arranque da reacção, ao mecanismo da sua regulação, à sua duração (1 milhão de anos?), à potência desenvolvida (alguns quilowatt?), à migração do plutónio formado e dos produtos de cisão para fora da zona reactiva, e muitas outras, apresentam um interesse inegável do ponto de vista científico, sendo difícil imaginar onde tal descoberta poderá conduzir. Já no plano económico, o interesse que lhe podem dedicar os produtores de urânio natural ou enriquecido parece ser pequeno: mesmo que outros reactores fósseis se revelem, não é de esperar que tais descobertas os levem à fortuna ou à ruína, quer, como já foi referido, pela pequena probabilidade de realização simultânea das condições propícias à ocorrência de um fenómeno como o de Oklo, quer pela reduzida porção de jazigo afectada pela reacção em cadeia de cisões nucleares.

BIBLIOGRAFIA

- R. BODU et al., *Sur l'existence d'anomalies isotopiques rencontrées dans l'uranium du Gabon*. C. R. Acad. Sc. Paris, t. 275, Série D, p. 1731 (1972).
- M. NEUILLY et al., *Sur l'existence dans un passé reculé d'une réaction en chaîne naturelle de fissions dans le d'uranium d'Oklo (Gabon)*. C. R. Acad. Sc. Paris, t. 275, Série D, p. 1847 (1972).