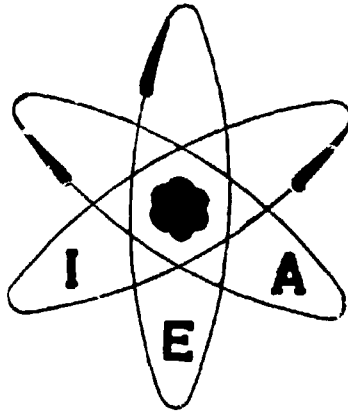


CNEN - DPC
R. Gen. Soveriano, 80
Rio, GB.
29/5/73



FISSÃO NUCLEAR

J. GOLDEMBERG

PUBLICAÇÃO IEA N.º 279
Novembro — 1972

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SAO PAULO — BRASIL

FISSÃO NUCLEAR

J. Goldemberg (*)

Divisão de Física Nuclear
Instituto de Energia Atômica
São Paulo - Brasil

Publicação IEA Nº 279
Novembro - 1972

(*) Diretor do Instituto de Física

Instituto de Energia Atômica

Superintendente: Rômulo Ribeiro Pieroni

Conselho Superior

Eng^o Roberto N. Jafet – Presidente

Prof.Dr. Emilio Mattar – Vice-Presidente

Prof.Dr. José Augusto Martins

Dr. Affonso Celso Pastore

Prof.Dr. Milton Campos

Eng^o Helcio Modesto da Costa

FISSÃO NUCLEAR

J. Goldemberg

Resumo

Esboçam-se as idéias básicas relativas ao processo de fissão nuclear. Ressalta-se o renovado interesse neste campo de pesquisa, com as investigações recentes relativas à fissão de núcleos leves.

A fissão nuclear é provavelmente o mais espetacular dos fenômenos de desintegração que ocorrem nos núcleos dos átomos: nela, pedaços inteiros do núcleo - aproximadamente metade, em geral - são emitidos com grandes velocidades. Este processo parece pouco usual e pouco provável quando comparado com os processos usuais de desintegração nuclear em que uma (ou umas poucas) partícula(s) é (são) emitida(s) por um processo parecido com o da evaporação de um líquido. Na evaporação, moléculas são emitidas, uma por uma, da superfície do líquido. Há, porém, outros processos macroscópicos em que a "fissão" ou "ruptura" de um sólido é o processo preferido: se aquecermos um copo de vidro, ele não se liquefaz ou evapora como ocorreria com um bloco de gelo, mas se parte em vários pedaços: esta ruptura ocorre ao longo de direções em que existem tensões internas e representa um dos caminhos possíveis para a dissipação da energia que se comunica ao copo quando ele é aquecido.

Veremos abaixo que a fissão nuclear não é um processo raro nem peculiar e que, pelo contrário, praticamente todos os núcleos atômicos podem fissionar quando submetidos a condições adequadas.

A maneira mais simples de discutir o problema é lembrar que a energia de ligação ou energia potencial de um núcleo (isto é, a energia necessária para separar todos os prótons, e todos os nêutrons e levá-los a uma distância infinita uns dos outros) é dada por uma fórmula muito simples que é a seguinte (Weizsäcker, 1935):

$$E = - a_1 A + a_2 A^{2/3} + a_3 \frac{Z^2}{A^{1/3}} + a_4 \frac{D^2}{4A}$$

onde $A = N$ (nº de nêutrons) + Z (nº de prótons)

Nesta fórmula,

$a_1 A$ é a energia de volume, proporcional ao número de massa A (que por sua vez é proporcional ao volume do núcleo, pois o raio nuclear R é proporcional a $A^{1/3}$);

$a_2 A^{2/3}$ a energia de superfície, proporcional ao número de massa $A^{2/3}$.

2

$a_3 \frac{Z^2}{A^{1/3}}$ a energia de Coulomb, proporcional ao quadrado da carga Z);

$a_4 \frac{D^2}{4A}$ a energia de simetria (onde $D = N - Z$).

Os valores das constantes são os seguintes:

$$\begin{aligned} a_1 &= 15,826 \text{ MeV,} \\ a_2 &= 17,970 \text{ MeV,} \\ a_3 &= 0,7183 \text{ MeV,} \\ a_4 &= 94,068 \text{ MeV.} \end{aligned}$$

Na energia de ligação, o termo dominante é a energia de volume que varia linearmente com A; os demais termos não são lineares em A: o afastamento da linearidade não é muito grande mas essencial para a fissão; a energia de superfície é a segunda em importância a não ser para elementos pesados em que a energia de Coulomb predomina.

A energia de volume é negativa (aproximadamente 15 MeV por núcleon) e as demais energias, positivas; como um todo, a energia de ligação é fortemente negativa, o que explica porque os núcleos são tão estáveis.

Na fig. 1, representamos estas energias para todos os núcleos até $A = 250$.

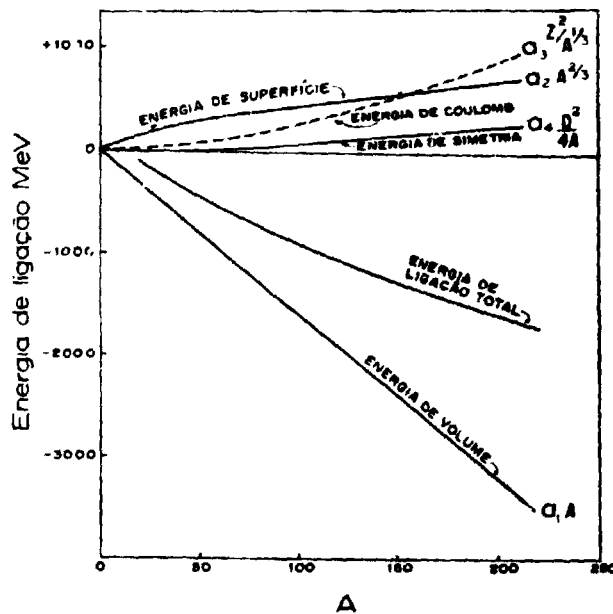


Fig. 1. Energia de ligação (MeV) para os núcleos até $A = 250$; são indicadas as várias contribuições para a energia de ligação total.

Para $A = 125$, por exemplo, as energias são as seguintes:

$$\begin{array}{rcl}
 - a_1 A & = & - 1480 \text{ MeV} \quad (\text{energia de volume}) \\
 + a_2 A^{2/3} & = & + 450 \text{ MeV} \quad (\text{energia de superfície}) \\
 + a_3 \frac{Z^2}{A^{1/3}} & = & + 390 \text{ MeV} \quad (\text{energia de Coulomb}) \\
 + a_4 \frac{D^2}{4A} & = & + 80 \text{ MeV} \quad (\text{energia de simetria}) \\
 & & \underline{\hspace{1.5cm}} \\
 & & - 1060 \text{ MeV} \quad \text{ENERGIA TOTAL}
 \end{array}$$

Seria preciso fornecer 1060 MeV para separar todos os núcleons do elemento com $A = 125$, ou seja, aproximadamente 8 MeV por núcleon.

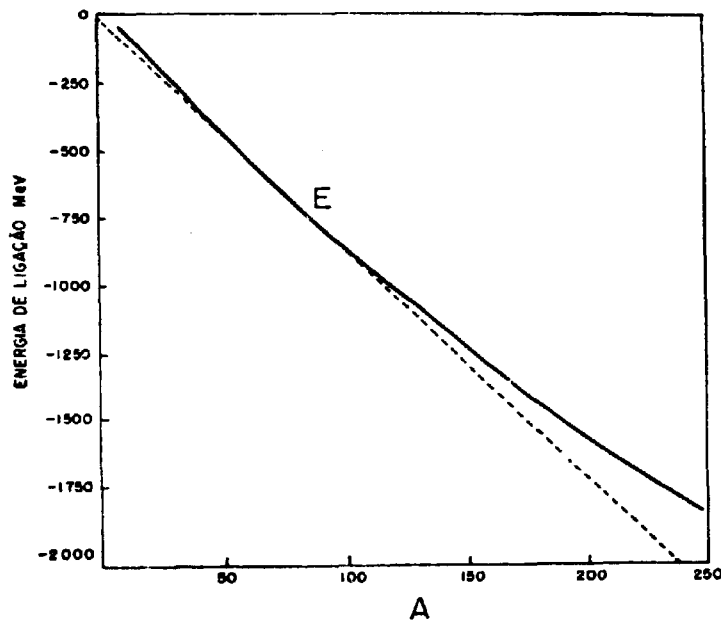


Fig. 2. Energia de ligação (MeV) para os núcleos até $A = 250$ notando-se o desvio da linearidade.

Observe-se, porém, que a energia total dos núcleos não varia linearmente com o número atômico (figura 2).

Este fato é extremamente importante. Com efeito, comparemos a energia de ligação de um núcleo com $A = 240$ (cerca de 1900 MeV) com a energia de ligação de dois núcleos de $A = 120$ (cerca de 1050 MeV):

$$\begin{array}{l}
 E_{240} = - 1900 \text{ MeV,} \\
 2E_{120} = - 2100 \text{ MeV.}
 \end{array}$$

O núcleo de $A = 240$ tem 200 MeV a mais do que a soma dos dois núcleos com $A = 120$, isto é, $A = 240$ é instável em relação à desintegração em dois fragmentos iguais (um núcleo é tanto mais estável quanto maior a sua energia de ligação).

A rigor, portanto, todos os núcleos com $A \gtrsim 100$ são instáveis em relação à divisão em dois fragmentos pois, para $A \gtrsim 100$, é claro o afastamento da linearidade da curva da energia de ligação em função de A .

O que os impede de fissionar espontaneamente? Em outras palavras, como se explica que estes núcleos existam na natureza?

A razão é a seguinte (Roy e Nigam, 1967): para que um núcleo se fissione (mesmo que isto seja energeticamente possível) é preciso que ele se deforme (figura 3).

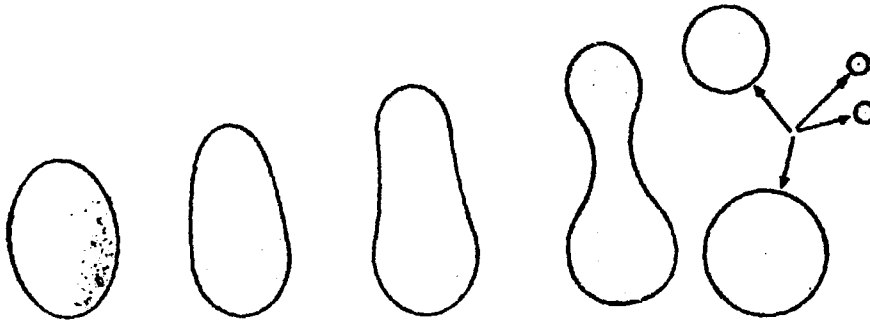


Fig. 3. Deformação de um núcleo no caminho da fissão.

Quando isto ocorre, a superfície aumenta, o que consome energia - parte dela é, porém, economizada porque a distância entre as partículas carregadas aumenta; à medida que a deformação aumenta, atinge-se uma situação crítica de equilíbrio instável, situação essa que exige uma energia E_f chamada de barreira para a fissão; atingido este ponto, o núcleo se separa em dois fragmentos.

Em geral, representam-se as deformações (afastamento da esfericidade) pela expressão:

$$r(\theta) = R [1 + \alpha_2 P_2(\cos\theta) + \alpha_4 P_4(\cos\theta) + \dots]$$

onde θ é uma coordenada angular e $P_2(\cos\theta)$, $P_4(\cos\theta)$, \dots , são polinômios de Legendre (Kreyszig, 1969).

Os coeficientes α_2 e α_4 são uma boa forma de parametrizar a deformação. A energia potencial associada com uma deformação arbitrária do núcleo (figura 4) pode ser representada por superfícies de nível num espaço de coordenadas α_2 e α_4 (e de outros α de ordem superior, se necessário); a deformação crítica corresponde a um "ponto de sela" ou "passagem" nas montanhas que as superfícies de nível determinam.

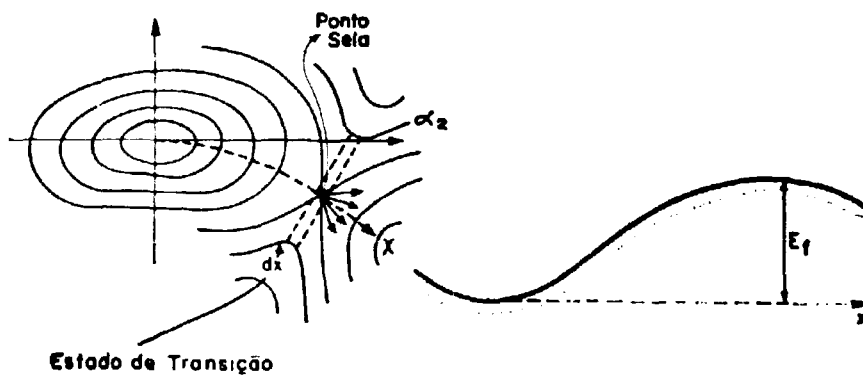


Fig. 4. Superfícies equipotenciais da energia de deformação em função dos parâmetros α_2 e α_4 e barreira para fissão.

Para que o núcleo se fissione, é preciso que a barreira de fissão seja atravessada: como a barreira é usualmente de alguns MeV, a fissão espontânea é muito rara exceto nos elementos muito pesados.

As barreiras de fissão calculadas no modelo da gota líquida, que é um modelo semiclássico, são indicadas na Figura 5. Para núcleos transurânicos, a barreira tende a zero o que significa que eles fissionam espontaneamente sem a inibição da barreira.

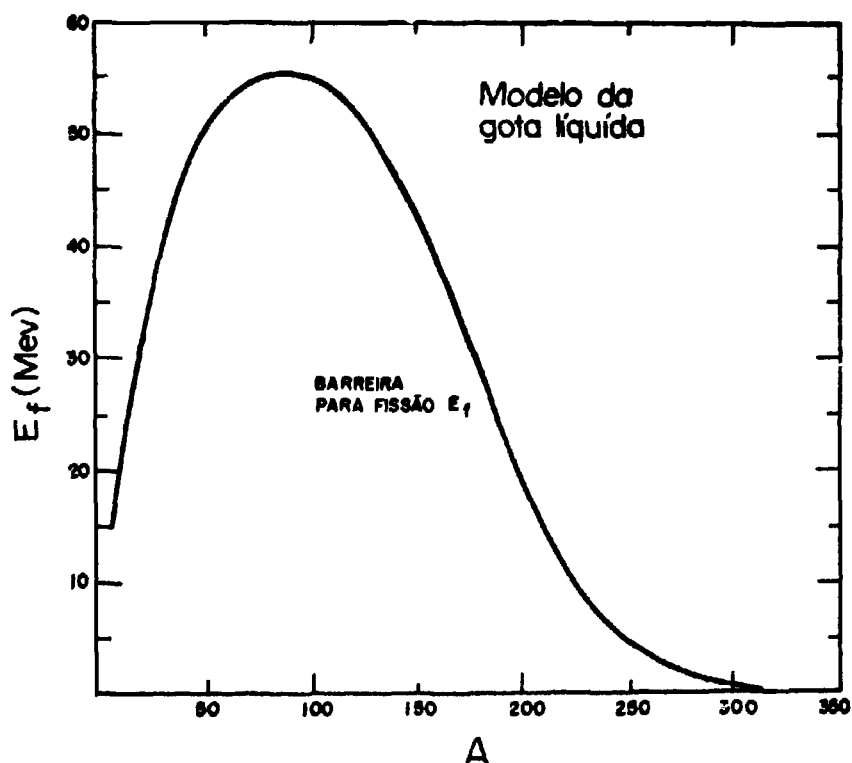


Fig. 5. Barreiras para fissão calculadas no modelo de gota líquida.

O método de acelerar os processos de fissão é adicionar energia ao sistema (por meio de um nêutron incidente ou raio gama): o sistema assim excitado é representado por uma bolinha no fundo de um poço de potencial que, ao receber um impulso, executa um movimento complicado no espaço dos α (Figura 6). A linha tracejada na figura 6 representa a região permitida; eventualmente a bolinha poderá passar sobre o ponto de sela, como a trajetória indica e a fissão ocorre.

O modelo de camadas introduz complicações várias na análise do problema da fissão, uma das quais é a de fazer com que a "barreira de fissão" tenha uma estrutura fina.

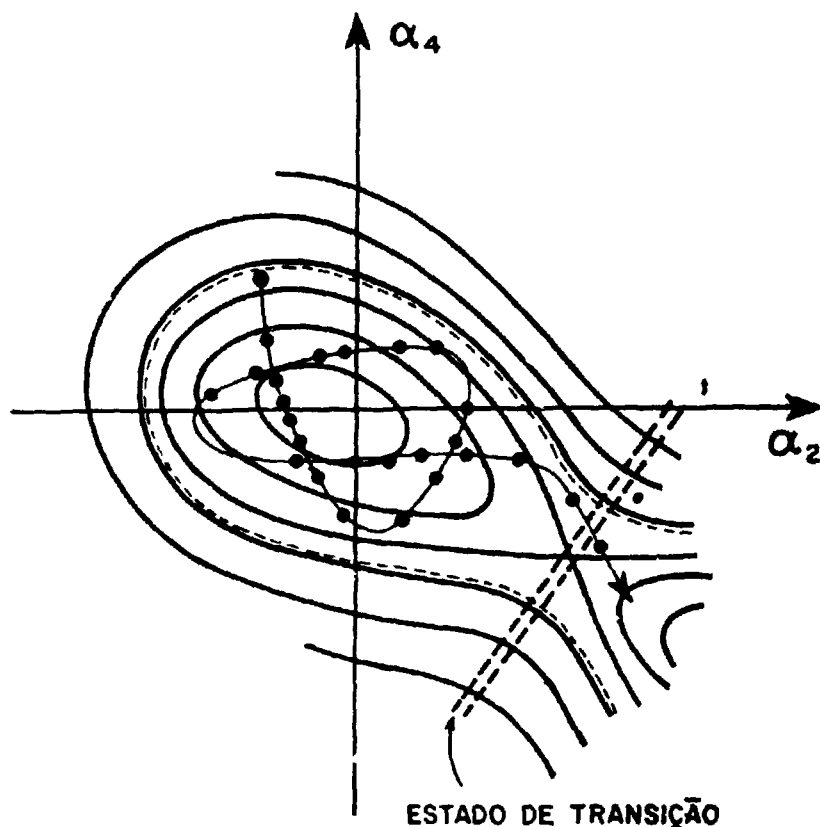


Fig. 6. Trajetória do núcleo num espaço dos α (α_2 e α_4) a caminho da fissão.

A figura 7 representa a situação energética para a fissão de um elemento pesado. Aproximadamente 200 MeV são libertados por fissão.

Para elementos leves, nada há também que impeça a fissão a não ser o fato que as barreiras são mais elevadas. Além disso, como se pode ver da figura 2, os núcleos leves não são instáveis por fissão, como os pesados: devido à curvatura da curva de energia de ligação em função de A , um núcleo de ^{24}Mg é estável em relação à divisão em dois núcleos de ^{12}C :

$$\begin{aligned} \text{Energia de ligação } (^{24}\text{Mg}) &= -194 \text{ MeV,} \\ \text{Energia de ligação de dois } ^{12}\text{C} &= -166 \text{ MeV.} \end{aligned}$$

É preciso fornecer cerca de 28 MeV para fissionar ^{24}Mg em dois ^{12}C . A barreira E_f do modelo da gota líquida neste caso é de aproximadamente 35 MeV.

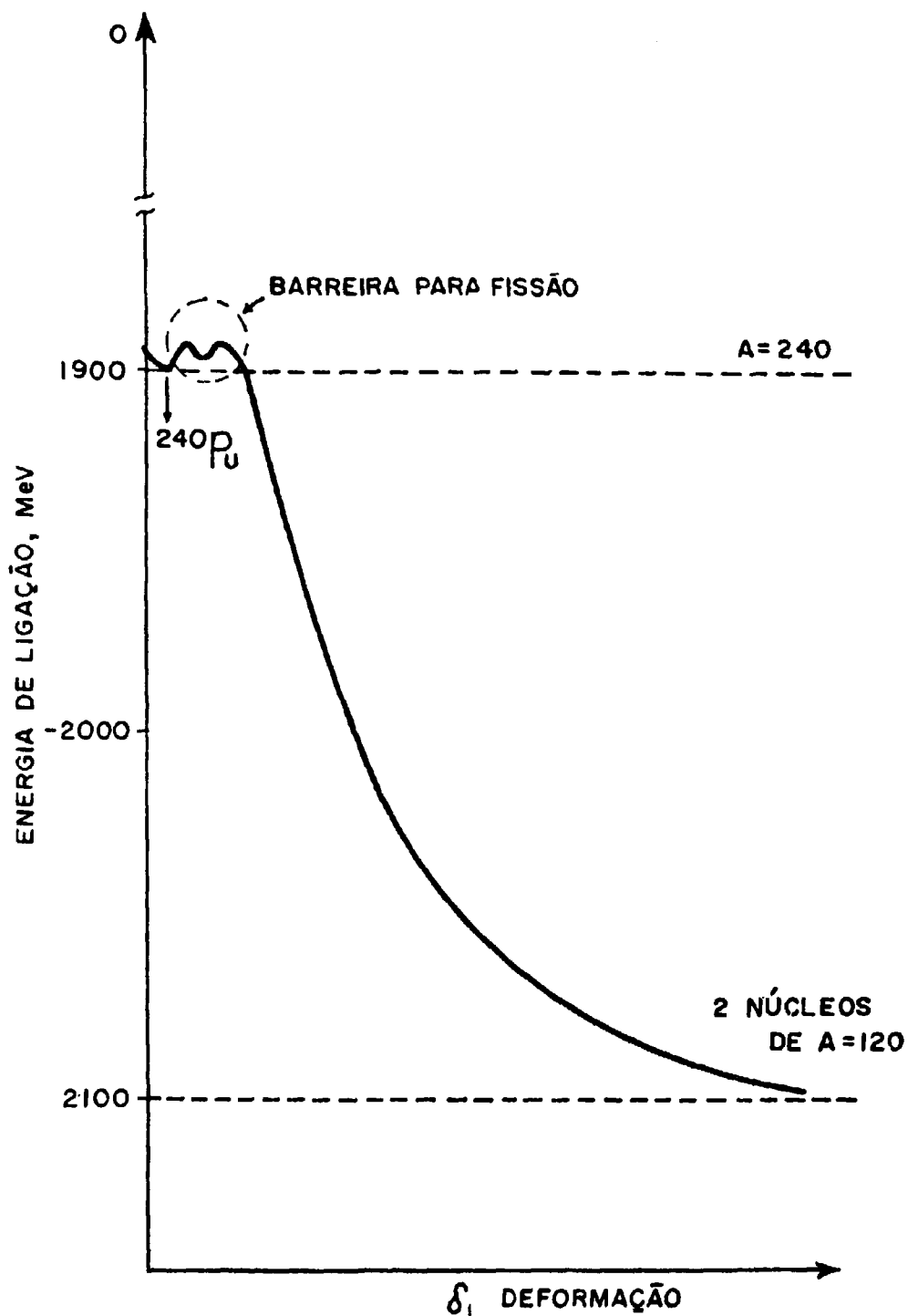


Fig. 7. A situação energética para a fissão de um elemento pesado.

A figura 8 representa a situação energética neste caso. Na realidade a diferença de massas entre o ^{24}Mg e o ^{12}C é tal que são necessários apenas 14 MeV para tornar a fissão energeticamente possível. Este processo de fissão parece, portanto, possível mas altamente improvável.

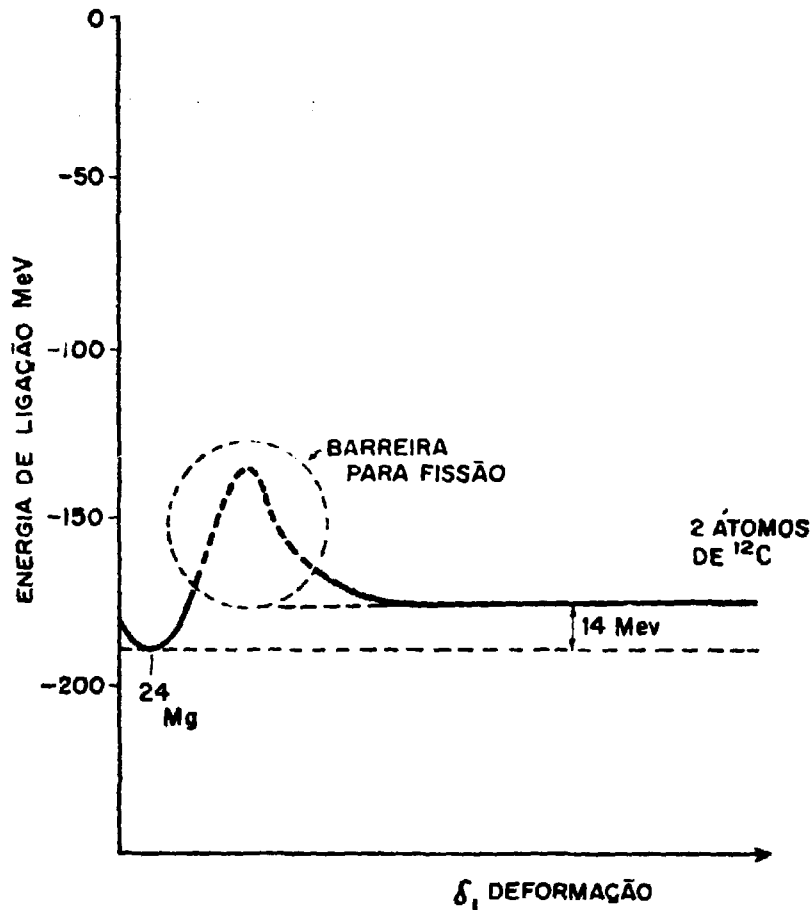


Fig. 8. A situação energética para a fissão de um elemento leve.

Experiências recentes do autor realizadas na Universidade de Toronto, em colaboração com um grupo canadense do qual participam o Prof. A.E. Litherland e o Dr. Lin Pai (Litherland, 1972), mostraram experimentalmente que a fissão do ^{24}Mg em dois ^{12}C ocorre efetivamente e que a barreira de fissão é praticamente inexistente, neste caso. A análise teórica desta descoberta encontra-se em andamento.

Bibliografia

Kreyszig, E. (1969) Matemática Superior II. Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., Rio de Janeiro GB.

Litherland, A.E. (1972) The Electrofission of Magnesium (Simpósio Internacional sobre Estrutura Nuclear, São Paulo, Nov. 8-12, 1971), Rev. Brasil. Fis. 2, 101-118.

Roy, R.R. e Nigam, B.P. (1967) Nuclear Physics - Theory and Experiment. John Wiley and Sons Inc., Nova York N. Y.

Weizsäcker, C.F. von (1935) Z. Physik 96, 431-458.

Abstract

Basic ideas on the progress of nuclear fission are outlined, the renewed interest in this field of research due to recent investigations on the fission of light elements is emphasized.

Résumé

Les idées basiques sur le progrès de la fission nucléaire sont ébauchées. L'intérêt renouvelé dans ce champs dû a des récentes investigations sur la fission des éléments légers est mis en évidence.