

PESQUISA EM FÍSICA NUCLEAR COM O REATOR DO I.E.A.

J. GOLDEMBERG

INFORMAÇÃO IEA N.º 22
Agosto — 1972

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

PESQUISA EM FÍSICA NUCLEAR COM O REATOR DO I.E.A.

J. Goldemberg

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

**Informação IEA Nº 22
Agosto - 1972**

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

PESQUISA EM FÍSICA NUCLEAR COM O REATOR DO I.E.A.

J. Goldemberg

Instituto de Física da Universidade de São Paulo

e

Instituto de Energia Atômica, São Paulo

Resumo

Uma descrição das experiências de física nuclear em andamento no Instituto de Energia Atômica de São Paulo é feita com ênfase no trabalho de espalhamento nuclear ressonante, conversão interna de elétrons e fotofissão.

Os reatores nucleares de pesquisa * têm sido utilizados desde o seu desenvolvimento inicial como instrumento de investigação em física nuclear; nestas investigações são utilizados especialmente os nêutrons e a radiação gama produzidos.

Obviamente existem muitos outros campos de aplicação dos reatores como a produção de isótopos radioativos para usos médicos e industriais, além do estudo de propriedades do estado líquido e sólido e do comportamento e características de materiais e componentes utilizados na construção de reatores quando submetidos a radiações intensas. Não discutiremos aqui estas aplicações, restringindo-nos a pesquisas de Física Nuclear.

O elevado fluxo de nêutrons e raios gama (além de outras características que discutiremos abaixo) produzidos nos reatores, aliado ao seu funcionamento simples por longos períodos de tempo (meses, às vezes), torna-os atraentes quando comparados com certos aceleradores.

O uso das radiações produzidas em reatores, porém, apresenta alguns inconvenientes: o espectro de nêutrons é contínuo, o que, às vezes, não é cômodo de utilizar; técnicas especiais (como a termalização dos nêutrons ou o uso de monocromadores) no entanto atenuam, de modo geral, estas dificuldades.

Dentro dessas limitações, reatores de pesquisa têm sido instrumentos utilíssimos no estudo de propriedades nucleares.

No passado, reatores foram utilizados com grande sucesso na medida de secções de choque para captura e espalhamento de nêutrons de baixa energia. Além de nos trazer um melhor conhecimento sobre o núcleo, essas medidas foram de capital importância para o desenvolvimento do uso da energia atômica.

* Referimo-nos aqui exclusivamente a reatores de pesquisa excluindo reatores de potência ou reatores com outras aplicações, pacíficas ou não.

No presente, a ênfase dos trabalhos em Física Nuclear se situa nas seguintes categorias:

1. ESPECTROSCOPIA de núcleos formados pela captura de nêutrons

- 1a. Espectroscopia convencional
- 1b. Conversão interna
- 1c. Ressonância fluorescente

2. Estudo do fenômeno de FISSÃO NUCLEAR induzida por nêutrons e raios γ

Vários destes problemas podem ser investigados em aceleradores nucleares, mas o seu estudo com reatores tem características únicas:

- a. a captura de nêutrons térmicos excita os núcleos a energias de aproximadamente 8 MeV. Como estes nêutrons têm energia bem definida, apenas um ou uns poucos níveis nucleares são excitados no núcleo final. O espaçamento médio entre os níveis nucleares num elemento como o Urânio neste intervalo de energia é dado na fig. 1. O decaimento deste nível pode ser estudado medindo a radiação γ ou a cascata de raios γ emitidos; técnicas de correlação angular e correlação angular perturbada podem ser usadas para estudar estes estados altamente excitados. Quando elétrons de conversão interna são abundantes no decaimento, estes podem ser investigados com um espectrômetro beta.

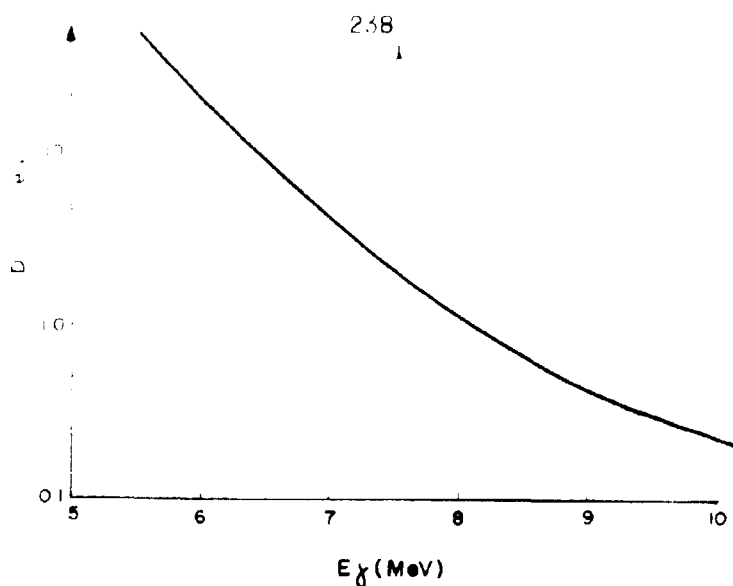


Fig. 1

- b. isótopos radioativos ricos em nêutrons podem ser produzidos com intensidades elevadas e o estudo dos seus esquemas de desintegração pode ser confortavelmente feito em Instituições que possuem reatores.
- c. a captura de nêutrons lentos resulta em alguns casos na emissão de raios γ de alta energia, altamente monocromáticos. Esta é uma fonte única de radiação γ com estas propriedades e que permite medidas dos efeitos desta radiação com resolução superior à disponível com outros aceleradores.

Todos estes tipos de trabalho se encontram em andamento no Instituto de Energia Atômica de São Paulo. Descreveremos aqui sumariamente as técnicas usadas e as razões para a realização destes trabalhos.

1. ESPECTROSCOPIA

Três tipos de experiências estão sendo desenvolvidos: espectroscopia convencional com isótopos radioativos de vida longa (algumas horas), medidas de conversão interna de elétrons e ressonância fluorescente de radiação gama.

1a. Espectroscopia convencional

Para a espectroscopia convencional* dispõe o IEA de uma mesa de correlação angular não automatizada com detetores de grande volume de Ge-Li e NaI; este é um grupo incipiente e que investiga no presente propriedades de um dos isótopos do Germânio (^{77}Ge).

Estuda-se atualmente a viabilidade de fazer espectroscopia "on line" colocando uma amostra num feixe de nêutrons e medindo a radiação emitida ou correlações angulares de radiações; desta forma isótopos de vida extremamente curta poderiam ser investigados, estendendo assim as potencialidades dos estudos de espectroscopia com o reator de São Paulo.

Um programa de cooperação com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul será estabelecido num futuro próximo para nos beneficiarmos da experiência deste grupo.

1b. Espectrômetro de conversão interna

Este grupo** dispõe de um espectrômetro beta que analisa elétrons de conversão interna formados num alvo interno situado próximo ao caroço do reator.

Um diagrama do arranjo experimental é o da figura 2.

* Experiências realizadas por Manoel A. Abreu e J. M. Gualda.

** Achilles A. Suarez, Brigitte R. S. Pecequillo e Francisco A. B. Coutinho (com bolsa no Exterior)

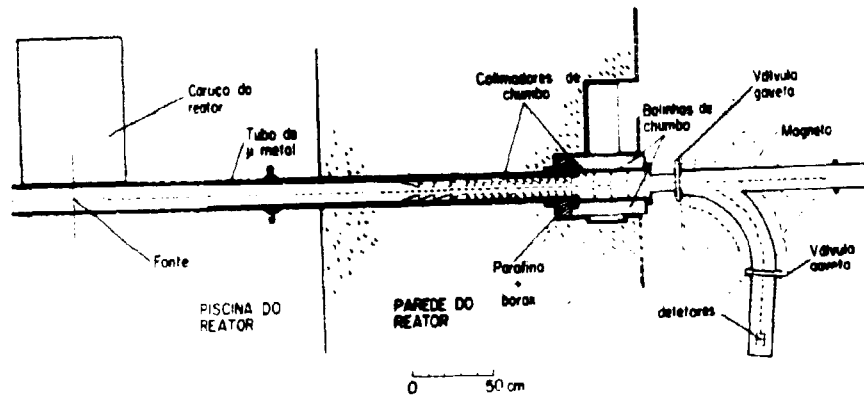


Fig. 2

Os elétrons viajam 380 cm no vácuo até atingirem o espectrômetro no qual são defletados de 95° até atingirem um detetor de estado sólido.

O espectrômetro propriamente dito possui um setor de 35° no qual o campo é radialmente inhomogêneo ($B = \frac{k}{r}$) seguido de um setor de saída de 60° no qual o campo é homogêneo.

As características do instrumento estão relacionadas na Tabela I.

TABELA I

CARACTERÍSTICAS DO ESPECTRÔMETRO BETA DO IEA

- tipo - setor magnético
- geometria - alvo interno
- raio da órbita central: 50 cm
- área da fonte: $1 \times 8 \text{ cm}^2$
- distância fonte-espectrômetro: 380 cm
- distância detetor-espectrômetro: 40 cm
- ângulo de desvio no campo inhomogêneo ($1/r$) = 35°
- ângulo de desvio no campo homogêneo = 60°
- aumento radial: - 0,162
- aumento axial: - 0,261
- dispersão: $101,1 = (\Delta p/p_0)/\Delta x$
- transmissão: $7,2 \times 10^{-6}$
- resolução a meia altura para fontes de 0,4 cm de largura = 0,075%
- resolução normal: 0,2%
- fluxo de nêutrons no alvo $\approx 2,8 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$

6

A largura intrínseca dos níveis nucleares ligados é da ordem de uma fração de elétron-volt de modo que uma coincidência de linhas é de fato altamente improvável.

O efeito Doppler na fonte e no alvo, no entanto, alargam consideravelmente estas linhas; a largura Doppler é dada por

$$\Delta = \frac{E_\gamma}{c} \sqrt{\frac{2kT}{M}}$$

Valores típicos desta largura são da ordem de 10 eV.

A Figura 4 mostra a largura Δ em função da energia de excitação para uma experiência típica.

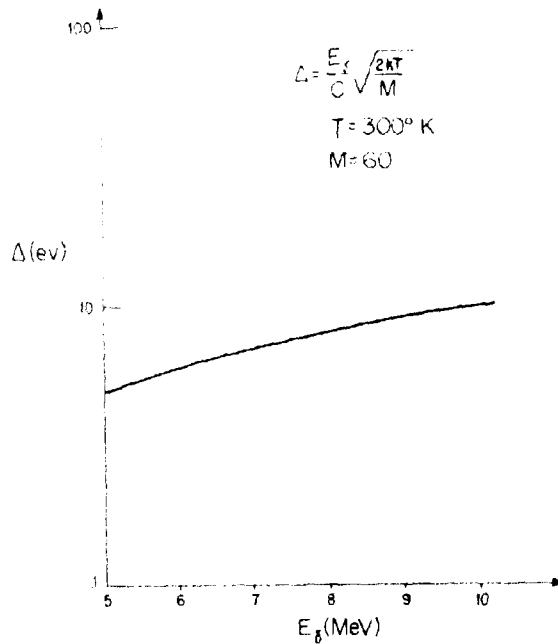


Fig. 4

Ocorre então que frequentemente há uma sobreposição parcial entre as duas linhas que pode ser aumentada variando a temperatura da fonte ou da emissão γ (Fig. 5)

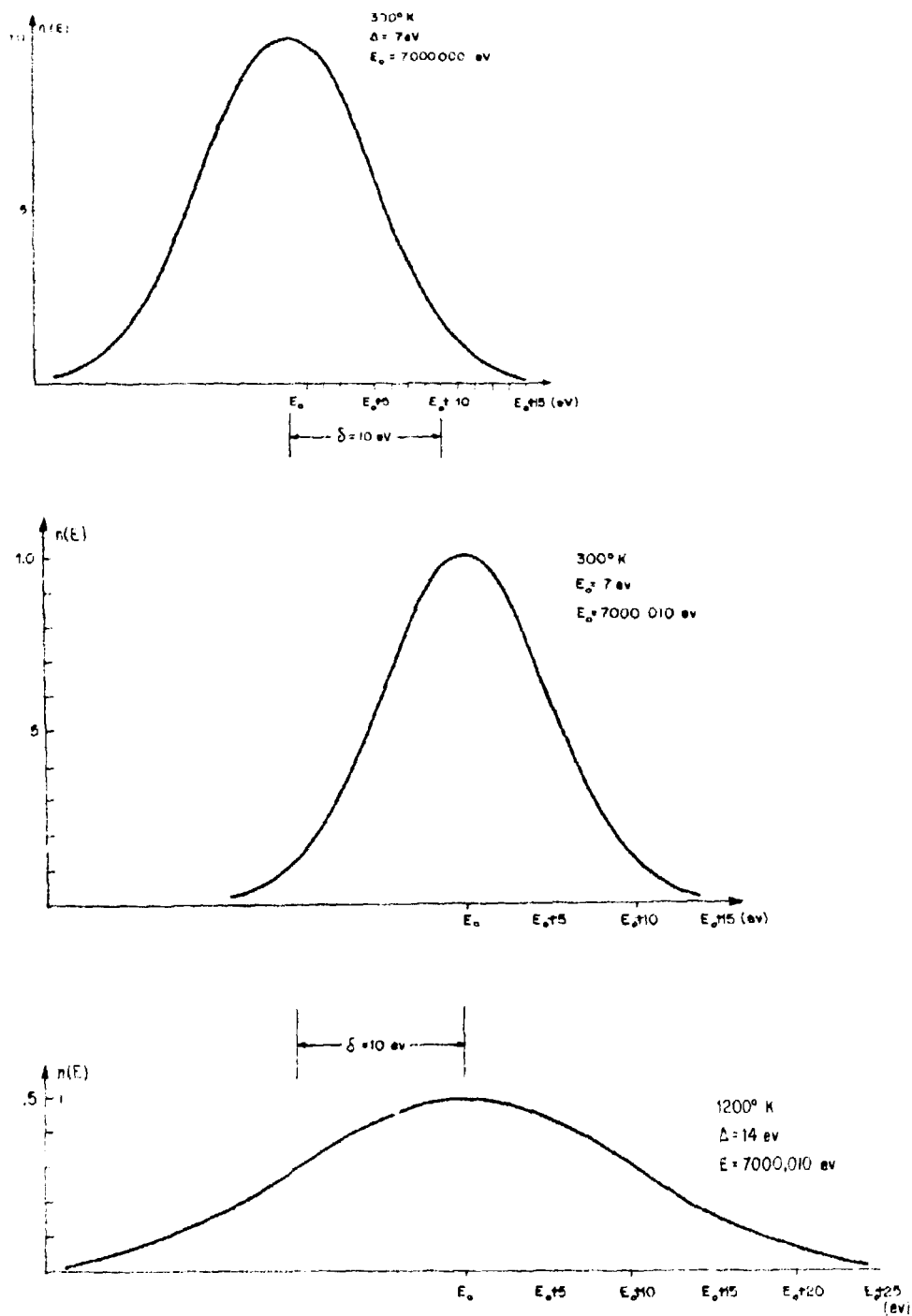


Fig. 5

Além disso, devido à sobreposição parcial a energia da radiação γ e do nível de absorção, é possível fazer absorção seletiva da radiação incidente com uma pequena espessura do material que é utilizado como espalhador (Fig. 6).

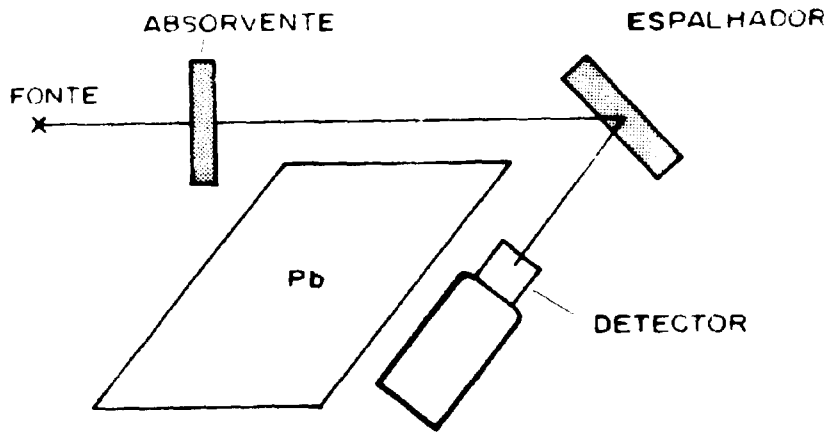


Fig. 6

Com as seguintes três medidas: distribuição angular da radiação espalhada, dependência da secção de choque de espalhamento com a temperatura e variação da secção de choque de espalhamento quando se usa um absorvedor, é possível determinar os 3 parâmetros J , δ e Γ_0 . J é o momento angular do nível, δ a distância (em eV) entre a linha incidente e o nível nuclear excitado e Γ_0 a largura do nível. Para elementos médios e energias não muito elevadas é possível estudar assim níveis individuais.

A medida da secção de choque absoluta não é necessária mas pode ser usada como teste de consistência.

Inúmeras experiências deste tipo têm sido feitas nos últimos anos em diversos laboratórios do exterior e recentemente começamos a colher informações deste tipo no IEA.

A figura 7 mostra o arranjo experimental usado e a figura 8, resultados típicos obtidos pelo espalhamento ressonante da linha de 7.279 KeV emitida pela captura de nêutrons no ferro pelo nível de mesma energia do chumbo.

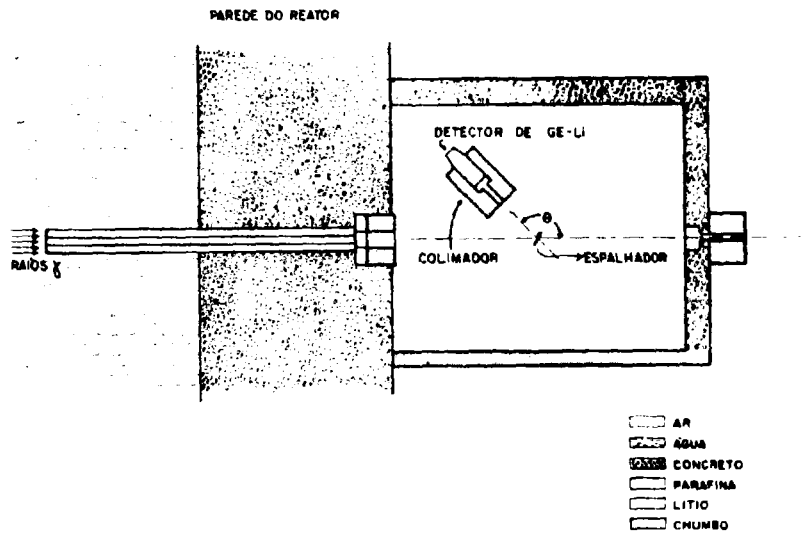


Fig. 7

Além de informações espectroscópicas sobre níveis individuais medidas deste tipo, sobretudo quando feitas para muitos elementos, fornecem informações sobre o espaçamento e distribuição estatística dos níveis nucleares altamente excitados na região de 8 MeV.

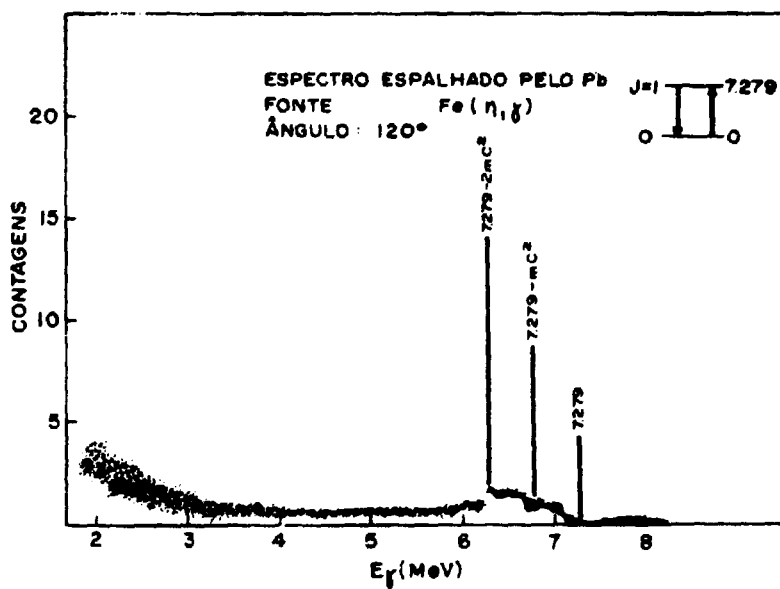


Fig. 8

2. FISSÃO

Os trabalhos de fissão realizados no IEA se referem todos à fotofissão, nas quais a Dra. Olga Mafra e seu grupo* trabalham há vários anos.

Como vimos acima as linhas γ de captura são de alguns eV de largura devido ao efeito Doppler; a sua largura é portanto comparável à densidade de níveis nos elementos médios; nos elementos mais pesados a largura das linhas γ é tal que vários níveis são excitados. A figura 9 mostra o número de níveis excitados no caso do Níquel para fontes γ de várias energias, alargadas pelo efeito Doppler no alvo e na fonte produtora de raios γ . O resultado é pois uma média sobre estes níveis mas ainda assim as experiências podem ser consideradas de alta resolução, não superada por nenhuma outra fonte de radiação γ .

O inconveniente destas fontes é que sua energia é fixa não podendo ser variada** ; apesar disto usando diversos elementos para captura de nêutrons é possível obter linhas que cobrem relativamente bem o intervalo de 3,5 a 11 MeV; em alguns casos as linhas não são puras o que constitui um inconveniente; usualmente mede-se a fissão provocada por diversas das fontes (tabela II) o que permite armar um sistema de equações lineares relacionando secções de choque com intensidades de linhas que é depois resolvido para as secções de choque nas diversas energias.

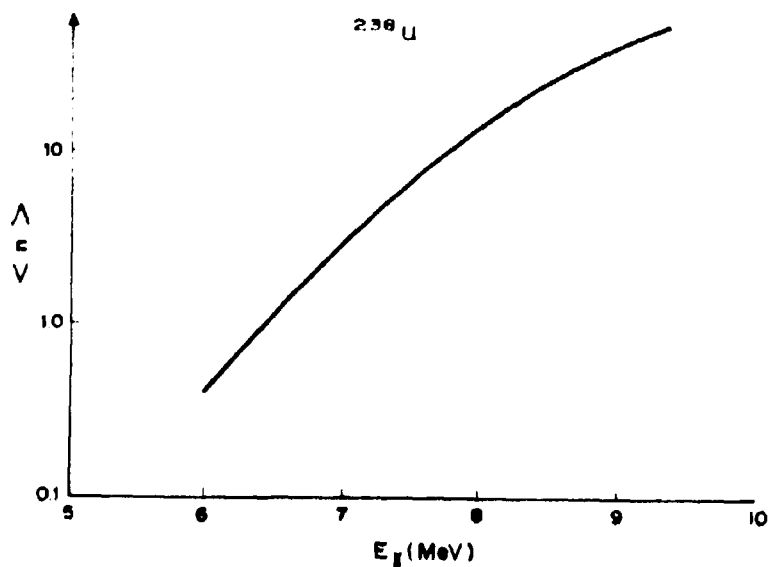


Fig. 9

* Olga Mafra, S. Kuniyoshi, Marília T. F. Cesar e Cláudia Renner.

** É possível usar o efeito Compton para variar a energia destas linhas com considerável perda de intensidade e resolução

TABELA II

ALVOS	ENERGIA (MeV)
^{28}Si	3,54
	4,93
^{24}Mg	3,92
^{12}C	4,95
^{32}S	5,43
^{89}Y	6,07
^{40}Ca	6,42
^{48}Ti	6,73
^9Be	6,83
^{55}Mn	7,23
^{207}Pb	7,38
^{56}Fe	7,64
^{27}Al	7,72
^{64}Zn	7,88
^{63}Cu	7,91
^{58}Ni	9,00
^{54}Cr	9,72
^{14}N	10,83

O resultado mais interessante destas medidas é o seguinte: numa experiência foi medida a secção de choque σ_f para fotofissão do ^{238}U e ^{232}Th em diversas energias. Em outra experiência foi medida a secção de choque total para emissão de nêutrons emitidos por estes elementos. Estas secções de choque podem ser relacionadas pela expressão

$$\sigma_N(E) = \sigma_n(E) + \nu(E) \sigma_f(E)$$

onde $\nu(E)$ é o número de nêutrons emitido por fissão na energia de excitação e σ_n é a secção de choque para emissão de nêutrons.

Usualmente se assume que $\nu(E)$ seja dado pela expressão

$$\nu(E) = 1,3 + 0,160E \quad (E \text{ em MeV})$$

o que parece representar bem os dados experimentais (Fig. 10).

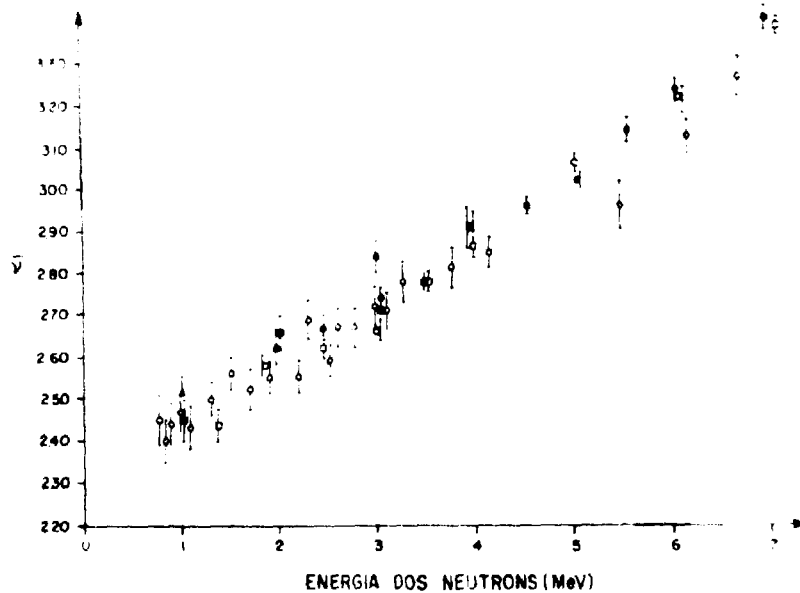


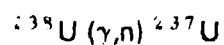
Fig. 10

De modo geral, porém, estes dados foram obtidos com baixa ou média resolução; não se deve excluir a possibilidade que a dependência de $\bar{\nu}$ com a energia tenha uma estrutura fina, ou mesmo que varie de ressonância para ressonância.

O resultado **surpreendente** é que σ_n e σ_f apresentam a mesma estrutura fina (Fig. 11).

O significado deste resultado é de tal importância que diversas experiências estão em progresso para verificá-lo independentemente:

1. está sendo medida a secção de choque σ_n diretamente pela separação radioquímica do ^{237}U produzido na reação



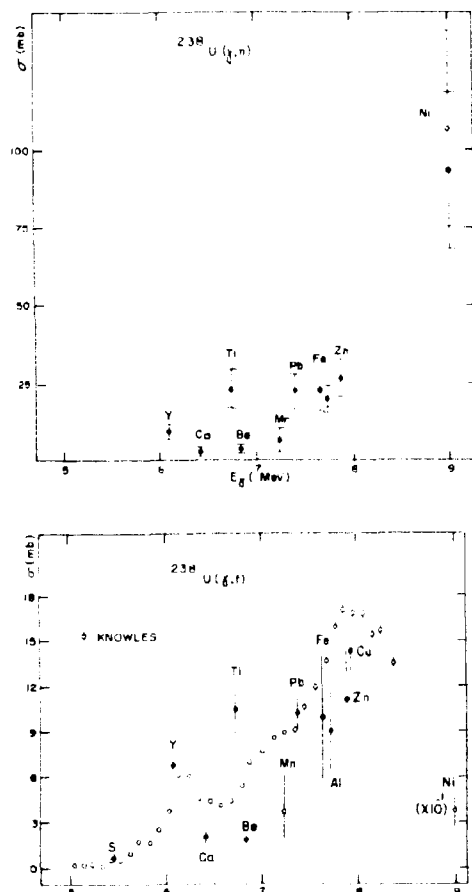


Fig. 11

- pretende-se medir as coincidências entre um evento de fissão e os nêutrons produzidos na fissão. Isto será feito colocando uma câmara de fissão no centro de uma grande caixa de parafina ("long counter") na qual estão imersos contadores de BF_3 ; a distribuição no tempo destes nêutrons é relacionada com o número de nêutrons emitido por fissão. Pretende-se usar esta característica para obter $\nu(E)$ na fotofissão.

Finalmente, como um subproduto das experiências envolvendo separação radioquímica, pretende-se medir a secção de choque para fotofissão simétrica e assimétrica em lugar da fissão total como é feito quando se usa um contador para fissão

A fissão simétrica é medida pela presença de ^{117}Cd e a assimétrica pela de ^{139}Ba ; como estas medidas são feitas em baixas energias de excitação (~ 6 MeV) espera-se obter informações sobre a natureza do ponto de sela para fissão simétrica e assimétrica. Se, como se acredita atualmente o tipo de fissão (simétrico ou assimétrico) já é definido no ponto de sela pela forma do núcleo excitado a forma das duas secções de choque poderão ser diferentes, o que não será o caso se a fissão simétrica e assimétrica resultarem apenas de fatores estatísticos em ação no ponto de cisão.

- FIG. 1 - Espaçamento médio dos níveis do ^{238}U na região de 5 a 10 MeV.
- FIG. 2 - Arranjo experimental do espectrômetro beta para estudos de elétrons de conversão interna.
- FIG. 3 - Espectros típicos dos elétrons de conversão interna produzidos na captura de nêutrons pelo ^{113}Cd .
- FIG. 4 - A largura Doppler Δ para um elemento como o Níquel na região de 5 a 10 MeV.
- FIG. 5 - Forma de uma linha monocromática de 7.000.000 eV do Níquel alargada pelo efeito Doppler a 300°C e a 1.200°C .
Nesta figura é indicada também uma linha incidente de 7.000.000 eV também alargada pelo efeito Doppler. A distância entre a linha incidente e o nível nuclear é de 10 eV.
- FIG. 6 - Arranjo experimental esquemático para uma experiência de absorção seletiva.
- FIG. 7 - Arranjo experimental usado nas experiências de ressonância fluorescente.
- FIG. 8 - Resultados típicos obtidos numa experiência de ressonância fluorescente.
- FIG. 9 - O número médio de níveis no ^{238}U excitado por radiação γ monocromática emitida pelo Níquel alargado pelo efeito Doppler, na região entre 5 e 10 MeV.
- FIG. 10 - Dados experimentais do número de nêutrons ν emitidos por fissão em função da energia dos nêutrons incidentes.
- FIG. 11 - Comparação entre as secções de choque das reações (γ,n) e (γ,f) no ^{238}U evidenciando ambas a mesma estrutura.

Abstract

A survey is presented of the nuclear physics experiments in progress at the Atomic Energy Institute in São Paulo, with emphasis in the work on nuclear resonant scattering, electron internal conversion and photofission.

Résumé

On décrit des expériences de physique nucléaire en cours à l'Institut d'Énergie Atomique de S. Paulo, en insistant sur l'effet de diffusion nucléaire résonante, la conversion interne des électrons et la photofission.