



**ESPECTROMETRO AUTOMÁTICO PARA CORRELAÇÃO ANGULAR**

*R. N. SAXENA, NILTON T. S. MONTEIRO e A. BARRIO NUEVO JR.*

**PUBLICAÇÃO IEA N.º 359**  
Outubro — 1974

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

# **ESPECTRÔMETRO AUTOMÁTICO PARA CORRELAÇÃO ANGULAR $\gamma\text{-}\gamma$**

**R. N. Saxena, Nilton T. S. Monteiro e A. Bairrio Nuevo Jr**

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

**Publicação IEA Nº 359  
Outubro - 1974**

**Instituto de Energia Atômica**

**Conselho Superior**

Eng<sup>o</sup> Roberto N. Jafet - Presidente  
Prof.Dr.Emilio Mattar - Vice-Presidente  
Prof.Dr.José Augusto Martins  
Prof.Dr.Milton Campos  
Eng<sup>o</sup> Helcio Modesto da Costa

**Superintendente**

Rômulo Ribeiro Pieroni

# ESPECTRÔMETRO AUTOMÁTICO PARA CORRELAÇÃO ANGULAR $\gamma\gamma$

R. N. Saxena, Nilton T. S. Monteiro e A. Beirrio Nuevo Jr.

## RESUMO:

Faz-se uma descrição da elhada do espectrômetro  $\gamma\gamma$  para medidas de correlação angular direcional, incluindo uma mesa automática; e os detetores utilizados. Descreve-se, também, os sistemas eletrônicos usados nas medidas de correlação diferencial e integral. Na parte I há uma pequena introdução teórica, e descrição dos arranjos experimentais é feita na parte II. Na parte III são apresentadas medidas de correlações direcionais não perturbadas no  $^{60}\text{Ni}$  e no  $^{75}\text{As}$ . São também apresentadas medidas de meias vidas de níveis nucleares excitados do  $^{181}\text{Ta}$  e  $^{81}\text{Br}$ .

## I. PRINCÍPIOS GERAIS

### 1.1 - Introdução

Utiliza-se o espectrômetro para medidas da distribuição angular de radiação emitida por núcleos em estados excitados. A técnica utilizada (correlação angular direcional)<sup>1,2</sup> ocupa lugar de destaque não só na Física Nuclear Experimental como também na Física do Estado Sólido, devido a quantidade de informação que podem ser obtidas; o tipo de informação vai depender da radiação observada:  $\alpha, \beta, \gamma$  ou elétron; das propriedades medidas pela experiência e dos campos extra nucleares agindo sobre o núcleo. Para a determinação de spins dos níveis e das multipolaridades das transições torna-se importante a minimização das perturbações extra nucleares a valores negligenciáveis. Conhecendo-se os spins e as multipolaridades pode-se estudar as interações nucleares com os campos externos, isto é, a interação do campo magnético com o momento dipolar magnético e a interação do momento quadrupolar elétrico com o gradiente do campo elétrico. Finalmente conhecendo-se os momentos nucleares, os campos extra nucleares (hiperfines) podem ser determinados, e os diferentes mecanismos de interação causados pela estrutura Física Química da amostra podem ser estudados. Na determinação da paridade dos níveis é necessário saber-se a direção do vetor elétrico da radiação emitida, isto é, a polarização em adição à direção de emissão.

### 1.2 - Correlação Angular Perturbada e Não Perturbada

Um estudo da probabilidade de emissão de partículas, ou fôtons, por núcleos radioativos demonstra que esta depende do ângulo entre o spin nuclear e a direção de emissão. Em circunstâncias normais espera-se que o padrão seja isotrópico, devido a "randomização" dos spins. Para obter-se um padrão anisotrópico de radiação é necessária uma orientação dos spins, como por exemplo, colocar a amostra em baixa temperatura e medir-se a distribuição angular em relação a direção de um campo magnético, ou gradiente de campo elétrico, aplicado ao material. Uma outra maneira consiste em fixar-se a direção do primeiro  $\gamma$  de uma desintegração em cascata de dois raios  $\gamma$  e medir-se a distribuição angular do segundo  $\gamma$  em relação a direção do primeiro (fig. 1). A distribuição terá um padrão quase sempre anisotrópico porque, ao fixar-se a direção de  $\gamma_1$ , estaremos selecionando núcleos com spins orientados numa determinada direção, e não mais ao acaso.

A observação da direção das duas radiações (correlação angular direcional), permite a determinação dos spins e multipolaridades, e em adição, se observarmos também a polarização (linear ou circular) das radiações (correlação angular polarizada) podem ser determinadas as paridades.

O estado intermediário do núcleo deve permanecer alinhado até que a segunda radiação seja emitida, de modo que, se durante a vida média  $\tau$  do estado intermediário não houver mudanças das populações dos subníveis magnéticos a correlação é chamada "correlação angular não perturbada". Essas populações podem ser alteradas por campos magnéticos ou elétricos (internos de origem atômica, molecular ou cristalina ou então, aplicados externamente) atuando sobre os momentos nucleares. Nesse caso chamamos a correlação de "correlação angular perturbada".

### 1.3 - Função Correlação Angular

No caso mais simples, em que não há perturbação alguma (correlação direcional não perturbada), obtém-se para a distribuição angular a seguinte expressão (Fig. 1)

$$W(\theta) = \sum_{k(\text{par})} A_{kk} P_k(\cos \theta) \quad (1.1)$$

chamada função correlação angular direcional, onde,

$$K_{\text{max.}} \leq \min. (2I, 2L_1, 2L_2),$$

$P_k(\cos \theta)$  = polinômios de Legendre

Por sua vez os  $A_{kk}$  podem ser escritos

$$A_{kk} = A_k(\gamma_1) A_k(\gamma_2) \quad (1.2)$$

onde os

$$A_k(\gamma) = [F_k(LL'L) + 2\delta F_k(LL'L) + \delta^2 F_k(L'L'L)] \frac{1}{1 + \delta^2}$$

dependem dos spins dos níveis e das multipolaridades das radiações envolvidas.

Em geral apenas dois coeficientes são necessários para descrever a função correlação angular e, além disso, costuma-se normalizar em relação a  $A_{00}$ , isto é:

$$W(\theta) = 1 + A_{22} P_2(\cos \theta) + A_{44} P_4(\cos \theta) \quad (1.3)$$

Entretanto, se houver perturbação<sup>3,4</sup> durante a meia vida do estado intermediário, é necessário introduzir na expressão (1.1) um fator que inclua essa perturbação.

Além disso, dispondo de um circuito que nos indique o tempo  $\Delta t$  decorrido entre a primeira radiação ( $\gamma_1$ ) e a segunda ( $\gamma_2$ ) podemos medir a dependência temporal da correlação direcional. Nesse caso é necessário que o tempo de resolução  $\tau_R$  do sistema seja menor que a vida média  $\tau$  do estado intermediário. Acontecendo o contrário ( $\tau_R > \tau$ ) mede-se a correlação

direcional integral. O primeiro caso é chamado de correlação angular diferencial

Uma grandeza importante nas medidas de correlação é a anisotropia dada pela seguinte expressão

$$A = \frac{W(180^\circ) - W(90^\circ)}{W(90^\circ)}$$

que caracteriza o comportamento anisotrópico a  $180^\circ$  em relação a  $90^\circ$

## II ARRANJOS EXPERIMENTAIS

### II.1 Introdução

Fazendo uso da mesa automática (descrita em II.2) e de dois detetores (um fixo e outro móvel) escolhidos de acordo com os objetivos da experiência, pode-se combinar o sistema eletrônico em dois conjuntos, um integral e outro diferencial. Nas medidas integrais o detetor fixo é usualmente um Ge (Li) de alta resolução em energia, enquanto o móvel é um cristal de NaI(Tl) acoplado a uma válvula fotomultiplicadora descrita no item II.3.1. Em medidas diferenciais a resolução em tempo está comprometida com a vida média do nível excitado em investigação ( $\tau_R < \tau$ ), o que é satisfeito com cristais de NaI(Tl) ou com cintiladores plásticos (estes últimos possibilitam melhor resolução em tempo). Passaremos a descrever, em primeiro lugar, o espectrômetro

### II.2 - Espectrômetro de Correlação Angular

As coincidências que vamos medir são funções do ângulo entre os detetores, o qual é modificado dependendo do objetivo da experiência. Por motivos eletrônicos e mecânicos normalmente a experiência se torna muito trabalhosa já que precisamos fazer a mudança desses ângulos, contar em cada ângulo, anotar as contagens dos "scalers" e registrar o espectro obtido na correspondente memória do multicanal. Estas inconveniências são contornadas usando-se uma mesa automática, que faz tais operações programadas eletronicamente, tornando a experiência completamente automática, do ponto de vista de coleta de dados.

A mesa de correlação angular (fig 1) é controlada por um sistema lógico digital implementado com arranjos integrados, montados parte na própria mesa e parte na unidade de controle. A mesa é de forma circular (veja [1] na fig. 1), de aço, onde estão aparado: dois detetores. Um deles é fixo [2] e o outro se move determinando ângulos por meio de pequenas chaves de parada [3], localizadas em posições previamente determinadas, as quais acionam microchaves situadas no sistema [4], cujo movimento é conjunto ao do detetor. Neste sistema, além das microchaves citadas, existem outras que, dependendo da posição em que se encontre o conjunto, por meio de um código existente nas chaves de parada faz com que a informação colhida nos detetores seja encaminhada a uma das memórias em operação do multicanal. A contagem então é feita num tempo que foi escolhido e definido na unidade de controle [5]. Quando esse tempo se finda, a unidade de controle envia um sinal ao "scaler-gate" [6] que tem a função de comandar a parada dos outros "scalers", as quais armazenam as contagens dos dois detetores e de coincidências. Estas contagens são transmitidas a um teletipo, onde podem ser impressas e/ou lidas em forma de fita de papel perfurado.

\* Construída no Instituto de Física de UFRGS - Porto Alegre.

### II 3.1 Sistema Eletrônico para Correlação Integral

Este sistema eletrônico (fig. 2) possui dois canais para análise em energia. O sinal de saída linear dos dois detetores é pré-amplificado (ORTEC Modelo 113), para que possa ser formado e amplificado pelo "Selectable Shaping Amplifier" (ORTEC-Modelo 440). O pulso bipolar, após passar pelo "Analog Peak Stabilizer" (Camberra) usado somente para pulsos do NaI(Tl), vai para um "Timing Single Channel Analyzer" (ORTEC-Modelo 420), cuja função é selecionar a energia de interesse do espectro detetado no NaI(Tl). O pulso lógico do TSCA (com base de tempo no "crossover" do pulso bipolar), alimenta a "Fast Coincidence Unit" (ORTEC-Modelo 414A). O primeiro canal está acoplado a um detetor Ge(Li) fixo, enquanto que o segundo a um cristal de NaI(Tl) 3' x 3' móvel sobre a mesa automática.

Os dois sinais que produzirão o eventual registro no multicanal são retirados na unidade de coincidência e do amplificador do primeiro canal (espectro total, com atraso). O espectro total produzirá um registro no canal correspondente do multicanal se o "gate" for aberto pelo sinal da unidade de coincidência. Os registros das contagens simples de cada  $\gamma$  selecionado pelos analisadores monocanais, bem como das coincidências, são feitos por três "scalers".

Todas as contagens acima são feitas automaticamente pela mesa do espectrômetro, e o espectro registrado no multicanal representa as coincidências ( $W(\theta)$ ), em função do ângulo entre os detetores, ou seja, a distribuição angular da radiação emitida.

### II 3.2 Sistema Eletrônico para Correlação Angular Diferencial

No sistema eletrônico de correlação angular diferencial (fig. 3), cada um dos detetores tem duas saídas de sinal, uma delas é linear, saindo de um dínodo, a outra, chamada rápida, saindo diretamente do anodo. A saída linear é analisada em energia similarmente ao caso anterior, apenas com a diferença de que a unidade de coincidências não precisa ser rápida, usamos para isso o módulo "Linear Gate and Slow Coincidence" (ORTEC Modelo 409).

Por outro lado, os sinais saindo dos anodos das duas fotomultiplicadoras (através das quais é feita a análise em tempo) são amplificados sendo, depois disso, injetados em discriminadores diferenciais rápidos (EGG Model TD 101/N) para discriminação em energia. Como estamos interessados em saber a diferença em tempo desses dois pulsos, eles são analisados por meio de um Conversor de Tempo em Amplitude (TAC), que transforma as diferenças de tempo entre as emissões das duas transições da cascata em um novo pulso cuja amplitude é proporcional a esta diferença de tempo. Este pulso é analisado em um multicanal de 4096 canais o qual permite sua entrada se o "gate" comandado pela unidade de coincidências lentas for aberto. Note-se que...o circuito integral essa entrada era o espectro direto do Ge(Li), no presente caso, é o pulso proporcional a diferença de tempo entre os dois sinais vindos do TAC.

O sistema pode então ser usado para a medida de meias vidas de níveis nucleares bem como para o estudo de interações hiperfinas do nível intermediário durante sua meia vida.

## III. TESTES EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de ilustrar a técnica descrita foram feitas medidas de correlação angular não perturbada no  $^{60}\text{Ni}$  e no  $^{74}\text{As}$ , bem como foi determinada a meia vida,  $T_{1/2}$  de níveis

excitados de  $^{182}\text{Ta}$  e do  $^{182}\text{Br}$ . Os dois arranjos utilizados são acoplados a um analisador multicanal Nuclear Chicago com 4096 canais, o qual pode ser dividido em quatro submemórias, possibilitando medida em quatro ângulos diferentes. Nas medidas de correlação angular integral a coincidência rápida permite tempos de resolução entre 30 e 110 ns (com eficiência de 90%). Para o  $^{203}\text{Ni}$  e  $^{203}\text{As}$  utilizou-se resolução de 70 nseg.

### III.1 Correlação Angular Direcional não Perturbada

No primeiro exemplo ( $^{203}\text{Ni}$ ) temos um nuclídeo par-par, o que implica estado fundamental  $0^+$  simplificando o problema. A correlação angular da cascata  $4^-(E2)2^-(E2)0^+$  no  $^{203}\text{Ni}$  (fig. 4) foi medida varias vezes anteriormente e são portanto, bem conhecidos os coeficientes  $A_{kk}$ . Trata-se de transições puras E2 e o calculo teórico do  $A_{kk}$  e

$$A_{2,2} = 0,1020 \quad \text{e} \quad A_{4,4} = 0,009$$

A medida foi feita utilizando-se o decaimento  $^{60}\text{Co}$   $T_{1/2} = 5,26\text{a}$   $\beta$  para  $^{203}\text{Ni}$ , obtido pela irradiação de cobalto natural ( $\text{Co}_2\text{O}_3$ ) por neutrons no reator IEAR 1 de São Paulo. O óxido de cobalto foi dissolvido em  $\text{HNO}_3$  diluído, e uma solução diluída contendo  $10 \mu\text{Ci}$  foi usada para a medida. A cascata 1173-1332 keV do  $^{203}\text{Ni}$  (fig. 4) foi medida em sete ângulos diferentes ( $90^\circ$  a  $270^\circ$ ), com acumulação de aproximadamente 20 000 coincidências verdadeiras em cada ângulo. Após as correções de ângulo sólido<sup>5,6</sup> obtivemos os seguintes resultados experimentais:

$$A_{2,2} = 0,098 \pm 0,004 \quad \text{e} \quad A_{4,4} = 0,0142 \pm 0,005$$

A figura 4 mostra os resultados, onde a curva sólida e o "best square fit" dos pontos experimentais para a função  $W(\theta)$ .

Duas cascatas do  $^{203}\text{As}$  (fig. 5) tem sido também extensivamente medidas. Valores precisos dos coeficientes  $A_{kk}$  foram obtidos por Becker e Steffen<sup>7</sup> usando um espectrômetro  $\text{Ge(Li)} - \text{Ge(Li)}$ . A medida foi feita utilizando-se o decaimento  $^{75}\text{Se}$   $T_{1/2} = 120,4\text{d}$   $\beta$  para  $^{203}\text{As}$ , obtido pela irradiação de selenio metálico, por neutrons no reator IEAR 1 de São Paulo. Este po de selenio metálico, foi usado sem qualquer tratamento. As cascatas 135-264 keV e 121-279 keV do  $^{203}\text{As}$ , similarmente ao  $^{203}\text{Ni}$ , foram medidas em sete ângulos diferentes com uma acumulação de coincidências verdadeiras, em cada ângulo, em torno de  $10^5$  e  $2,5 \times 10^4$ , para os fotopicos de 135 keV e 121 keV, respectivamente. Os valores encontrados para os  $A_{kk}$ , assim como os de Becker e Steffen, encontram-se na tabela 1. A fig. 6 mostra as curvas ajustadas para o polinômio  $W(\theta)$ .

Tabela 1

cascata	$A_{2,2}$	$A_{4,4}$	
121 - 280 keV	$0,407 \pm 0,05$ $0,404 \pm 0,004$	$0,024 \pm 0,008$ $0,009 \pm 0,008$	presente trabalho ref. 7
136 - 264 keV	$0,023 \pm 0,006$ $0,030 \pm 0,003$	$0,009 \pm 0,007$ $0,004 \pm 0,006$	presente trabalho ref. 7

## 11.2 - Medidas de Meia Vida

Foi medida a meia vida do nível 482 keV do  $^{181}\text{Ta}$  através da sequência 133-482 keV (fig. 6) usando o sistema diferencial. A fonte radioativa de  $^{181}\text{Hf} \xrightarrow[\beta^-]{T_{1/2} = 42,5\text{d}} ^{181}\text{Ta}$  foi obtida pela irradiação de HfN em pó. Após a irradiação no reator IEAR-1 de São Paulo, a amostra foi dissolvida em HF, e uma fonte com cerca de 20  $\mu\text{Ci}$  foi utilizada para a medida. A medida foi feita usando fotomultiplicadora RCA 8575 e 8850. A fig. 6 mostra o resultado de medida onde o "prompt" foi obtido com uma fonte de  $^{22}\text{Na}$  nas energias de cascata 133-482 keV. O valor obtido foi de  $T_{1/2} = (10,8 \pm 0,3)\text{ns}$ , o que concorda bem com a ref. 8.

Com a finalidade de testar o limite de resolução do sistema, medimos uma meia vida na região do sub nanosegundo. A meia-vida do nível a 276 keV no  $^{81}\text{Br}$  foi medida através da sequência 290-276 keV (fig. 7) usando o sistema diferencial. A fonte radioativa de  $^{81}\text{Se} \xrightarrow[\beta^-]{T_{1/2} = 20\text{min}} ^{81}\text{Br}$  foi obtida por irradiação de selenio natural com neutrons. Foram usados como detetores, cristais plásticos dopados a 5% com Pb, e montados em fotomultiplicadoras rápidas RCA 8575 e 8850. A calibração em tempo do TAC foi feita introduzindo no canal de "stop" linhas com atrasos conhecidos. A fig. 7 mostra o resultado de medida onde o "prompt" foi obtido com uma fonte de  $^{22}\text{Na}$  nas energias de cascata 290-276 keV. O valor obtido de  $T_{1/2} = (235 \pm 15) \times 10^{-12}\text{seg.}$ , para o nível a 276 keV no  $^{81}\text{Br}$  aparece em ambos os lados da curva de coincidências porque não foi possível separar no cristal plástico as energias das duas transições conhecidas na medida.

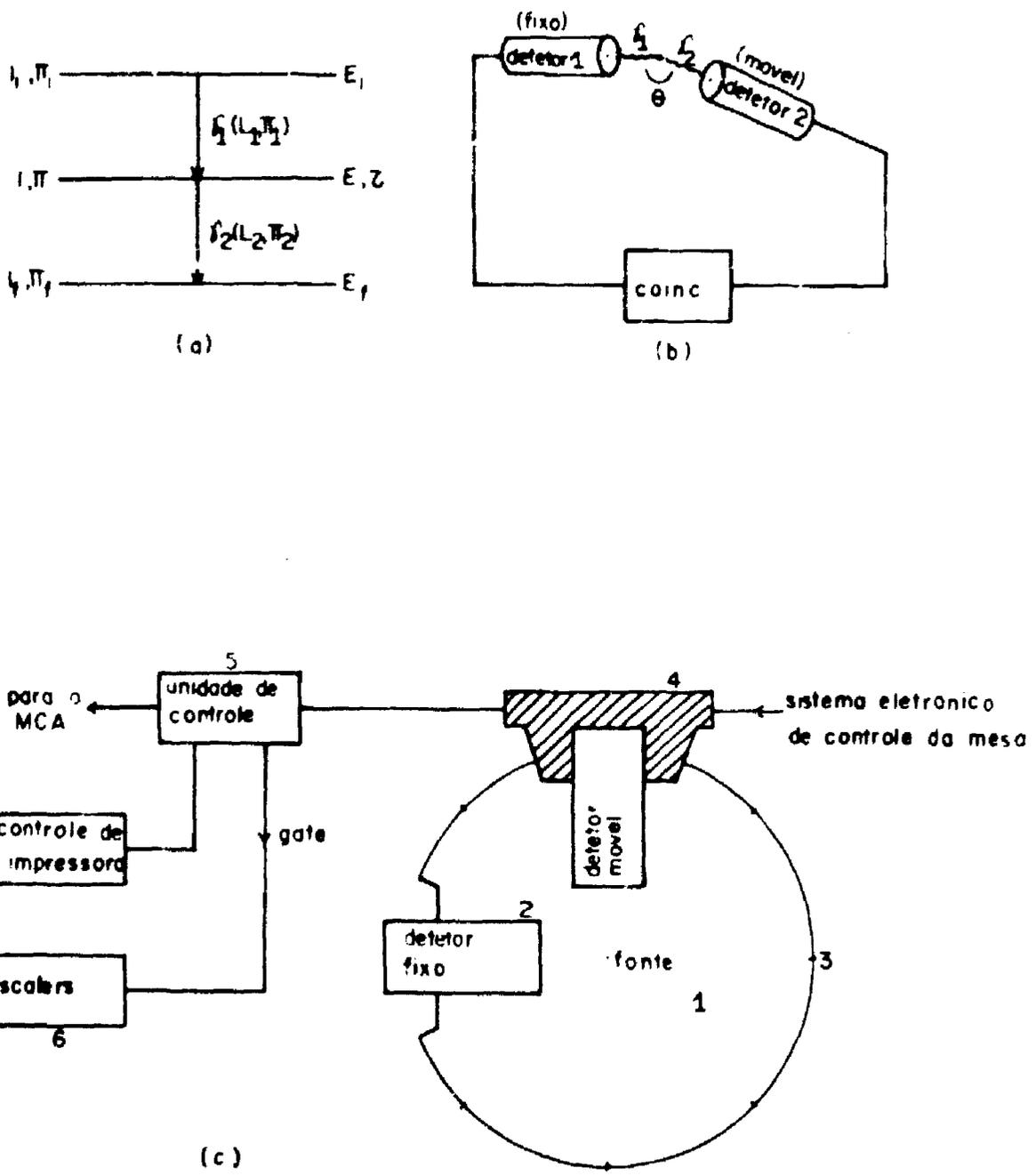


Fig. 1

- a) Esquema típico de níveis nucleares com os parâmetros mais importantes.
- b) Esquema simplificado para a medida de correlação angular.
- c) Esquema indicativo da mesa automática.

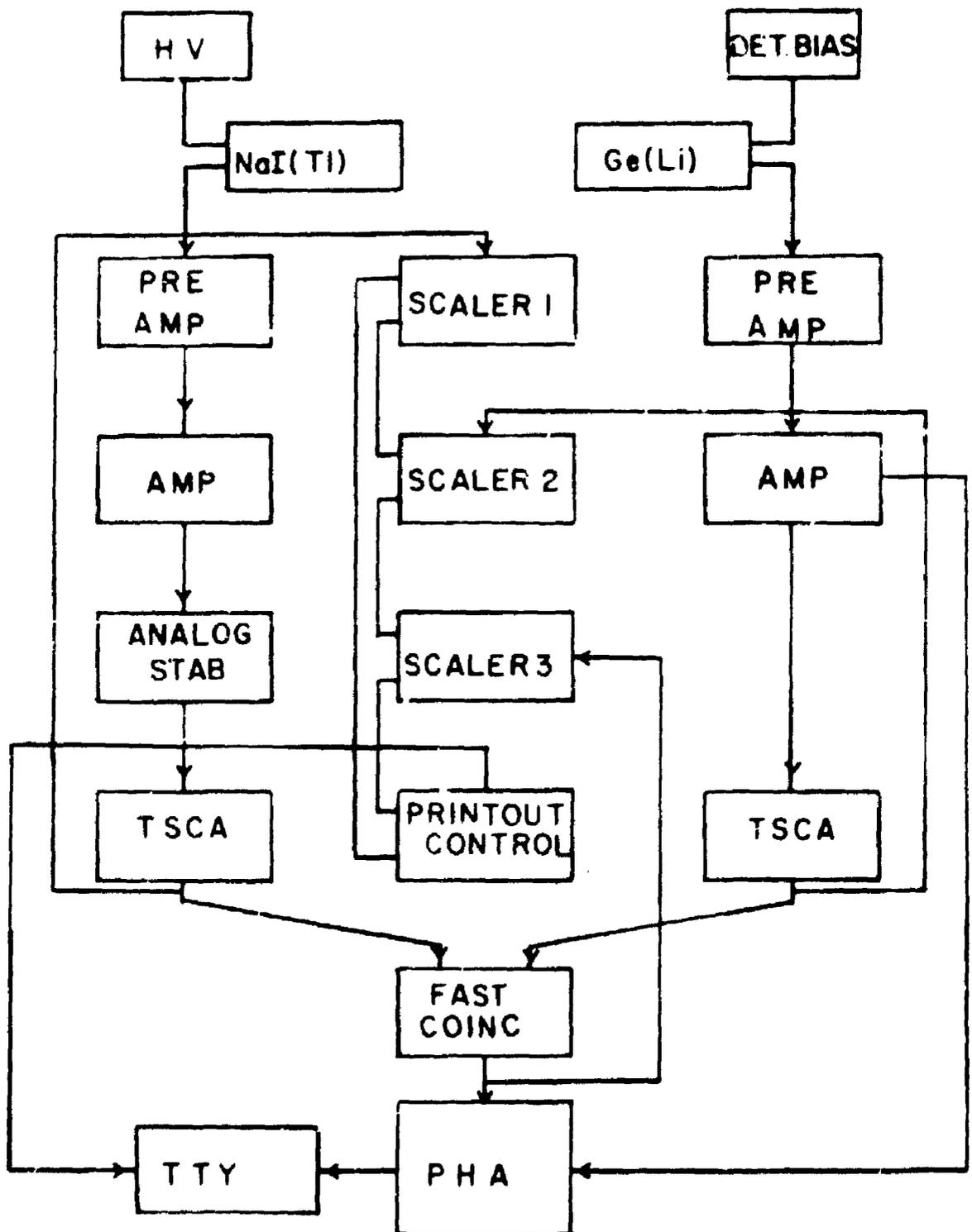


Fig. 2

Sistema eletrônico de correlação integral

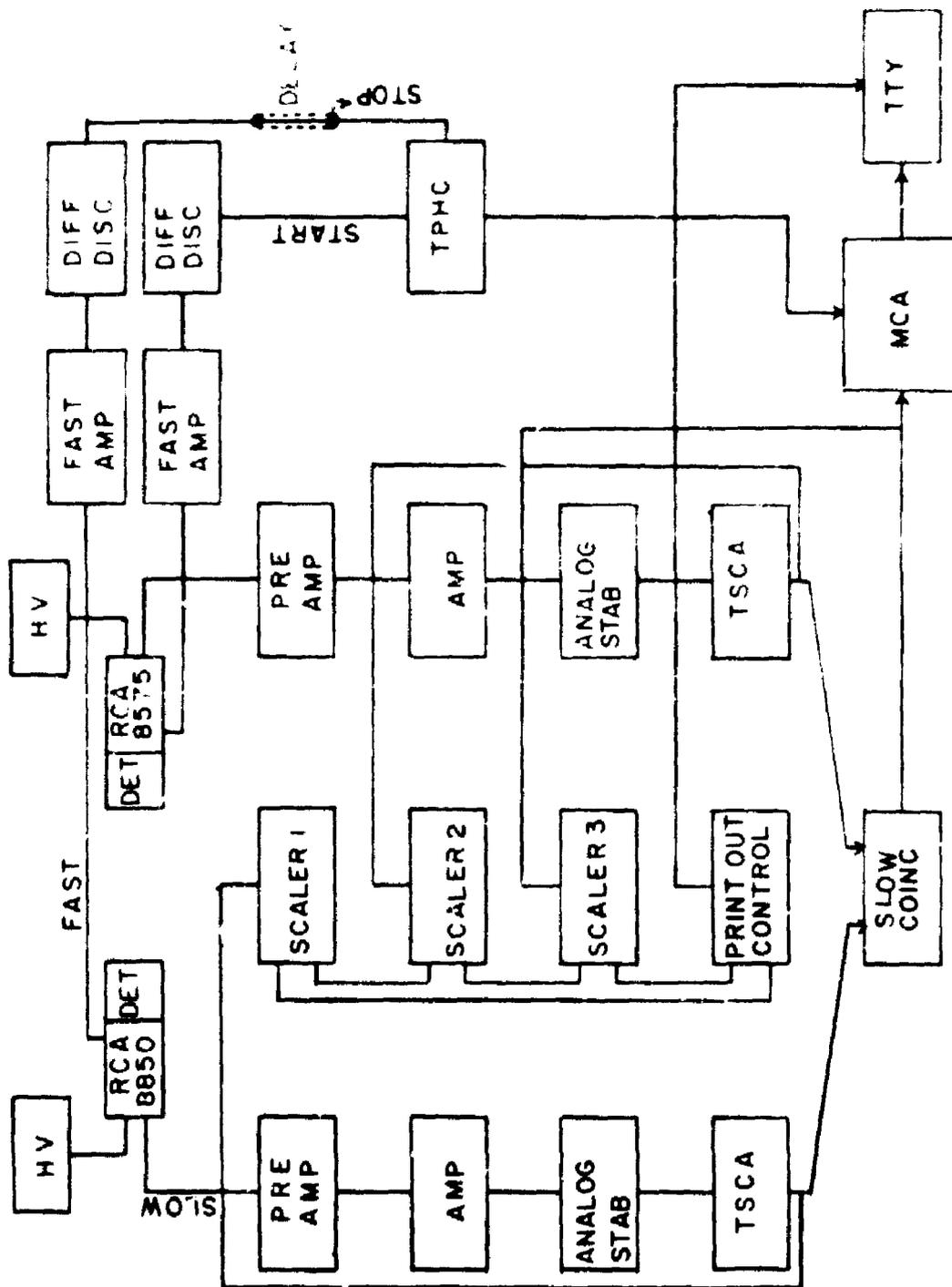


Fig. 3

Sistema eletrônico de correlação diferencial

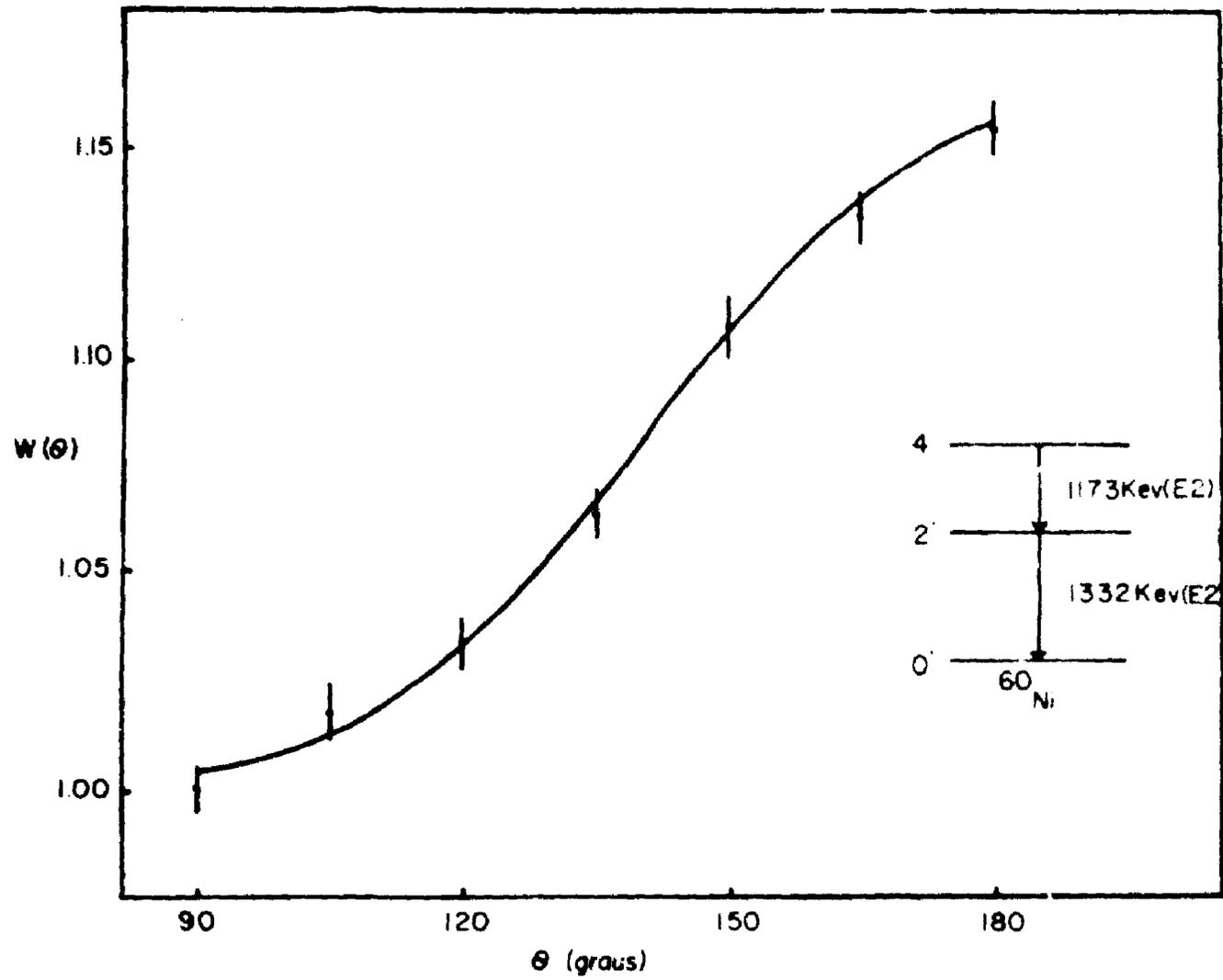


Fig. 4

Resultado da medida de  $W(\theta)$  para a cascata 1173-1332 keV no  $^{60}\text{Ni}$

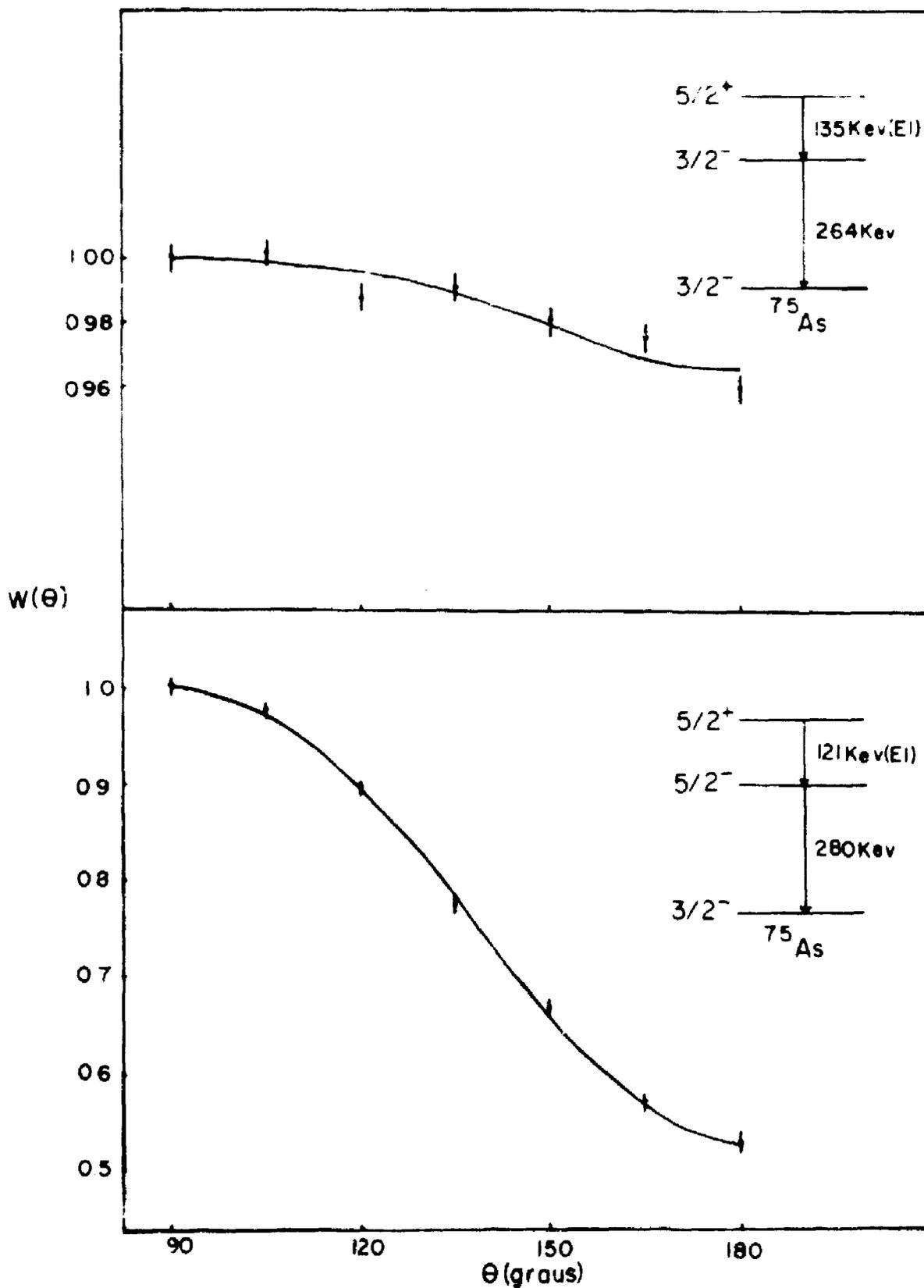


Fig. 5

- a) Resultado da medida de  $w(\theta)$  para a cascata 121-289 keV no  $^{75}\text{As}$ .  
 b) Resultado da medida de  $w(\theta)$  para a cascata 135-265 keV no  $^{75}\text{As}$ .

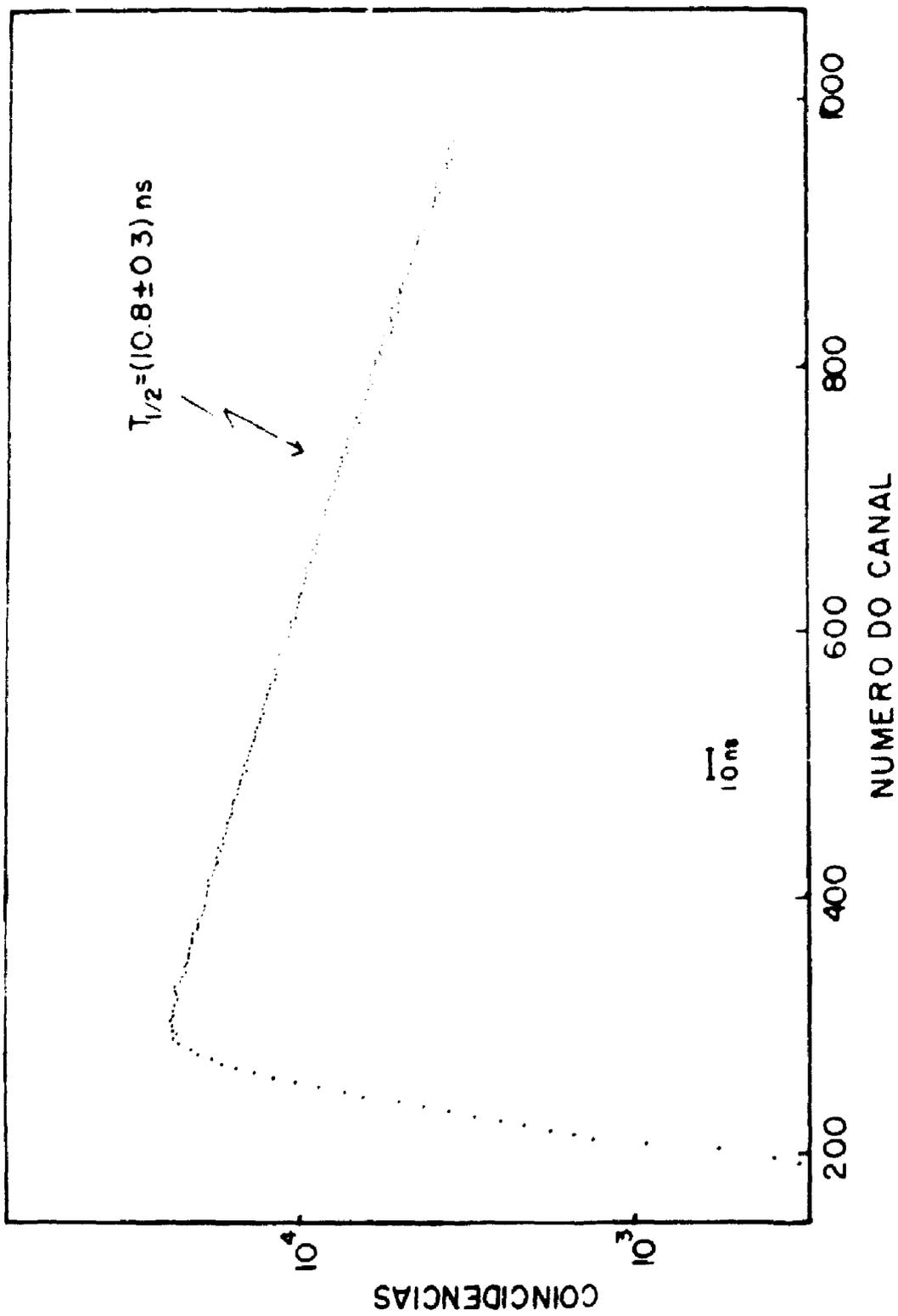


Fig. 6

$T_{1/2}$  do nível 482 keV no  $^{181}\text{Ta}$ .

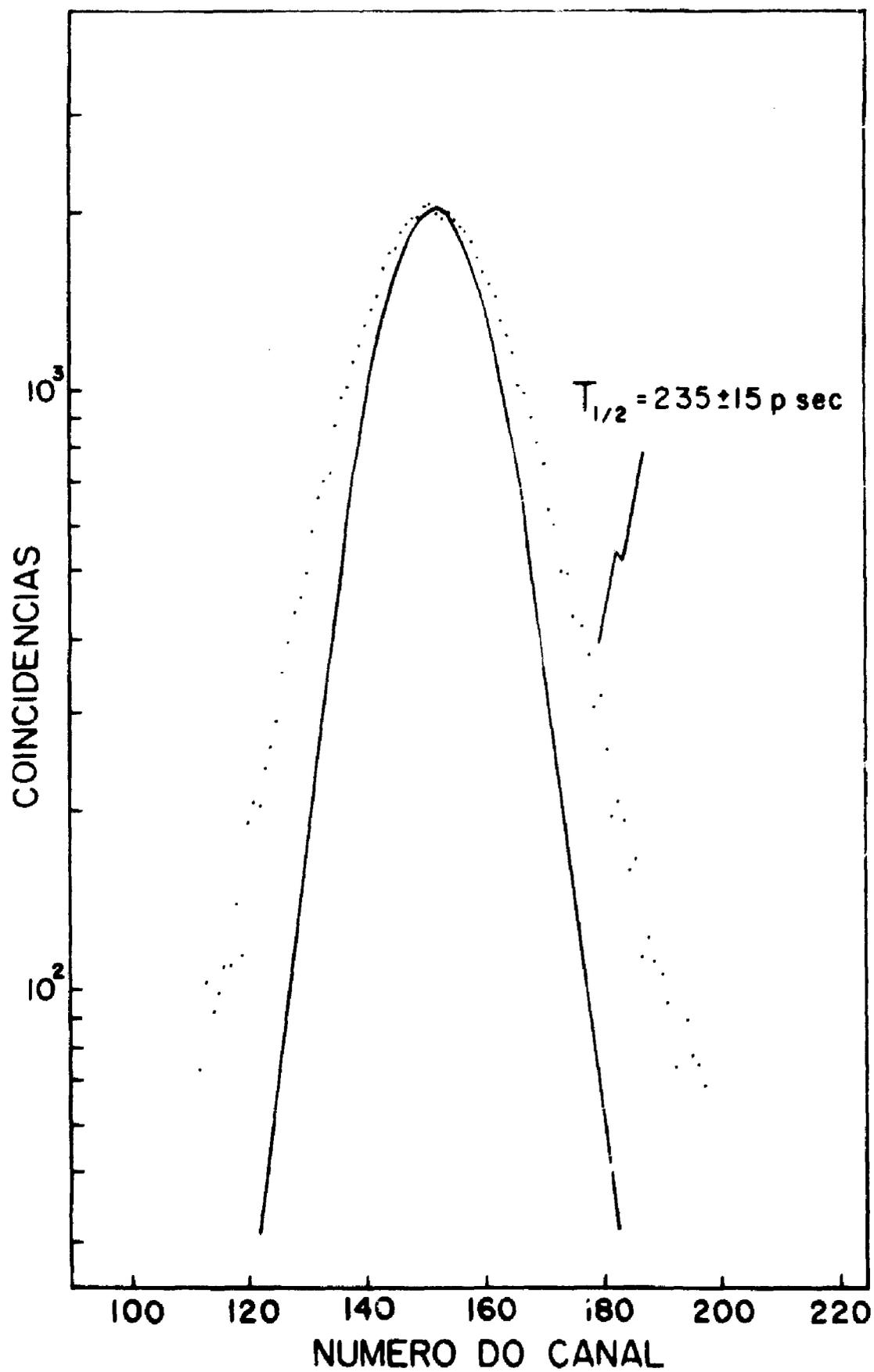


Fig. 7

 $T_{1/2}$  do nível 276 keV no  $^{81}\text{Br}$ .

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Eng<sup>o</sup> Jose Lorenzo Medero pela confecção e montagem da parte eletrônica da mesa de correlação angular e ao Prof. Fernando C. Zawislak pelas valiosas sugestões. Agradecemos também a bolsista Lucia Cabral Jahnel, pelo auxílio na construção dos gráficos e cálculos.

## ABSTRACT

An automated  $\gamma\gamma$  angular correlation spectrometer is described in detail. Electronic arrangements used in integral and differential measurements have also been described. In part I there is a short theoretical introduction, the experimental arrangement is described in part II. The results of the directional correlation measurement of  $\gamma$  cascades in  $^{60}\text{Ni}$  and  $^{75}\text{As}$  and of the lifetime measurement of excited states in  $^{181}\text{Ta}$  and  $^{213}\text{Bi}$  have been described in part III.

## RESUME:

Une description détaillée du spectromètre  $\gamma\gamma$  pour des mesures de corrélation angulaire directionnelle est faite, ainsi que celle des systèmes électroniques différentiel et intégral utilisés. Une description de la table automatique et des détecteurs utilisés est aussi présentée. Dans la première partie il y a une introduction théorique, dans la seconde il y a la description des arrangements expérimentaux, et finalement, dans la dernière partie, nous incluons les mesures de corrélation directionnelle non perturbées du  $^{60}\text{Ni}$  et du  $^{75}\text{As}$ . La mesure de la demi-vie de niveau excités du  $^{181}\text{Ta}$  et du  $^{213}\text{Bi}$  sont présentées dans cette partie.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ROSE, H. J. & BINK, D. M. Angular distribution of gamma rays in terms of phase-defined reduced matrix elements. *Rev. Mod. Phys.* **39**(2), 306-47, 1967.
2. FRAUENFELDER, H. & STEFFEN, R. M. Angular correlations. in SIEGBAHN, K. *Alpha-, beta- and gamma ray spectroscopy*. Amsterdam, North-Holland, 1965, v.2, cap 19A, p.997-1198.
3. ABRAGAM, A. & POUND, R. V. Influence of electric and magnetic fields on angular correlations. *Phys. Rev.* **92**(4) 943-62, 1953.
4. KARLSSON, E. et alii, eds. *Perturbed angular correlations*. Amsterdam, North-Holland, 1964.
5. CAMP, D. C. & VAN LEHN, A. L. Finite solid-angle corrections for Ge(Li) detectors. *Nucl. Instrum. Meth.* **76** 192-240, 1969.
6. YATES, M. J. L. *Finite Solid Angle Corrections Perturbed Angular Correlations*. Karlsson, E. Amsterdam, North-Holland, 1964. Appendix 4, p.453-466.
7. BECKER, A. J. & STEFFEN, R. M. M1-E2 mixing and conversion-electron particle parameters for the electromagnetic transitions in  $^{75}\text{As}$ . *Phys. Rev.*, **180**(4):1043-8, 1969.
8. LEDERER, C., HOLLANDER, J. M. and PERLMAN, I. *Table of Isotopes*. John Wiley & Sons, p.351.