

BR 770 120 3



**PROJETO, CONSTRUÇÃO E CARACTERÍSTICAS DE UM ESPECTRÔMETRO
DE CRISTAL DE 3 EIXOS PARA NÉUTRONS**

**R. Fulfaro, L. A. Vinhas, C. Fuhrmann, R. Liguori Neto
e C. B. R. Parente**

**PUBLICAÇÃO IEA 477
COURP-AFN 061**

MAIO/1977

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E CARACTERÍSTICAS DE UM ESPECTRÔMETRO
DE CRISTAL DE 3 EIXOS PARA NÉUTRONS**

**R. Fulfaro, L. A. Vinhas, C. Fuhrmann, R. Liguori Neto
e C. B. R. Parente**

**CENTRO DE OPERAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO REATOR DE PESQUISA IEAR-1
Área de Física Nuclear**

**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
SÃO PAULO - BRASIL**

APROVADO PARA PUBLICAÇÃO EM MARÇO/1977

CONSELHO DELIBERATIVO

Klaus Reinach -- Presidente
Roberto D'Utra Vaz -- Vice-Presidente
Helcio Modesto da Costa
Ivano Humbert Marchesi
Admar Cavellini
Regina Elisabete Azevedo Baretta
Flávio Gori

SUPERINTENDENTE

Rômulo Ribeiro Pieroni

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11.049 (Pinheiros)
Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira"
SÃO PAULO - BRASIL

NOTA: Este trabalho foi conferido pelo autor depois de composto e sua redação está conforme o original, sem qualquer correção ou mudança.

PROJETO, CONSTRUÇÃO E CARACTERÍSTICAS DE UM ESPECTRÔMETRO DE CRISTAL DE 3 EIXOS PARA NÊUTRONS*

R. Fulfaro, L. A. Vinhas, C. Fuhrmann, R. Liguori Neto
e C. B. R. Parente

RESUMO

Como parte do projeto sobre espalhamento inelástico de nêutrons do Instituto de Energia Atômica (IEA) de São Paulo, foi inteiramente projetado e construído no IEA um espectrômetro de 3 eixos para nêutrons. O princípio de operação do instrumento está baseado na extração de um feixe monoenergético de nêutrons, por meio de um cristal monocromador, a partir do espectro de nêutrons maxwelliano do reator IEA-R1. Este feixe incide em uma amostra cristalina e os nêutrons espalhados são analisados em ângulo e energia com o auxílio de um cristal analisador. Desta forma é possível a determinação das trocas de energia e quantidade de movimento entre os nêutrons e o sistema espalhador. O espectrômetro será empregado no estudo de dinâmica de redes cristalinas, onde são pesquisados os estados vibracionais dos átomos num reticulado cristalino e os campos de força que determinam tais vibrações. Neste trabalho estão descritos os pormenores do projeto e da construção do espectrômetro, bem como os princípios básicos sobre o espalhamento coerente inelástico de nêutrons, para determinar as relações de dispersão entre a frequência e o vetor de onda das vibrações cristalinas.

I – INTRODUÇÃO

Muitas propriedades de sólidos podem ser descritas em termos do comportamento de certas excitações básicas, tais como: fonons, excitons, magnons, etc. Para entender essas propriedades é interessante estudar as excitações básicas apropriadas, na forma mais pormenorizada possível, sobre um amplo intervalo de condições físicas, tais como temperatura, pressão, etc. A técnica mais poderosa para tais estudos envolve a observação do espalhamento de uma dada radiação por um sólido, quando esta passa através do sólido e interage de várias maneiras com as excitações básicas. Em geral mede-se as mudanças na energia e momento sofridas pela radiação⁽⁵⁾.

O presente trabalho descreve as principais características do Espectrômetro de Cristal de 3 Eixos do IEA, instrumento que foi especialmente construído para utilizar feixes de nêutrons térmicos como radiação de prova no estudo de fonons em um sólido, os quais são os quanta associados com as vibrações dos átomos em um reticulado cristalino.

As propriedades vibracionais dos sólidos cristalinos são muito bem descritas em termos de um espectro completo dos modos normais de vibração (fonons), onde cada modo é caracterizado por uma frequência ν e um vetor de onda \vec{q} . As frequências dos modos normais, ou frequência dos fonons, possuem valores de zero à 10^{14} Hz, e são tipicamente da ordem de 10^{12} Hz (ou 1 THz). O vetor de onda \vec{q} , cujo módulo é $2\pi/\lambda$, onde λ é o comprimento de onda do modo normal, possui valores que vão de zero até próximo do inverso dos valores das distâncias interplanares no cristal, ou seja, valores típicos da ordem de 10^8 cm⁻¹.

Em qualquer sólido cristalino existem, mais ou menos bem definidas, as "relações de dispersão",

* Trabalho apresentado no "V Congresso del Grupo Iberoamericano de Cristalografia" realizado em Madri, Espanha, de 10 a 17 de dezembro de 1976

$\nu = \nu(\vec{q})$ entre a frequência e o vetor de onda dos modos normais. Para um dado vetor de onda existem diversos modos diferentes, os quais são marcados usando um subscrito j .

A obtenção de uma relação de dispersão é importante, em primeiro lugar porque ela pode conduzir a um entendimento de muitas propriedades físicas dos sólidos, tais como propriedades térmicas, ópticas, dielétricas de isolantes e de transporte elétrico de condutores. Em segundo lugar, que é o aspecto mais interessante, a relação de dispersão fornece a informação experimental necessária para testar as várias teorias de dinâmica de redes^(1,2).

O grande interesse existente no campo da dinâmica de redes é principalmente por causa do desenvolvimento de métodos que permitem a determinação experimental da relação de dispersão. A técnica mais comum utiliza o espalhamento coerente inelástico de nêutrons térmicos por uma amostra monocristalina⁽²⁾.

Os nêutrons térmicos, tais como os produzidos por um reator nuclear, se prestam convenientemente ao estudo de sólidos porque o comprimento de onda de Broglie λ associado é da mesma ordem das distâncias interatômicas num sólido. Além disso as energias dos nêutrons térmicos, $E = \left(\frac{0.286}{\lambda}\right)^2$, são da mesma ordem das energias características dos sólidos, tais como as energias dos fonons num cristal.

Nessas condições, no caso de nêutrons térmicos colidirem com um sistema de átomos, existirá uma probabilidade razoável de carregar ou deixar quanta de qualquer energia característica do sistema, um a vez que o nêutron possui massa da ordem das massas atômicas. As mudanças em energia dos nêutrons espalhados são apreciáveis e facilmente mensuráveis.

Desta forma, podem ser escolhidas certas condições experimentais para que predominem processos nos quais o nêutron espalhado cria ou aniquila um único fonon. Nesse caso, um pico na contagem de nêutrons corresponderá a um fonon de vetor de onda \vec{q} e frequência $\nu(\vec{q})$. Tal pico será observado quando forem satisfeitas as equações de conservação de energia e vetor de onda:

$$E - E' = \pm h\nu \quad (1)$$

$$\vec{Q} = \vec{k} - \vec{k}' = \vec{G} \pm \vec{q} \quad (2)$$

onde:

$$E = \frac{h^2 k^2}{2m}, \text{ e}$$

\vec{Q} = vetor transferência de vetor de onda

\vec{k} = vetor de onda do nêutron incidente

\vec{k}' = vetor de onda do nêutron espalhado

$\vec{G} = 2\pi\gamma$ vetor da rede recíproca (já inclui o fator 2π)

E = energia do nêutron incidente

E' = energia do nêutron espalhado

Nas equações (1) e (2) o sinal positivo é usado para criação de fonon (perda de energia pelo nêutron) e o sinal negativo para aniquilação de fonon (ganho de energia). Para um feixe de nêutrons monoenergéticos, E e \vec{k} são conhecidos. Analisando os nêutrons espalhados em função da energia E' e do vetor de onda \vec{k}' , pode-se marcar a frequência ν e o vetor de onda \vec{q} dos fonons. As observações repetidas para várias transferências de vetor de onda \vec{Q} e energia ($E - E'$), permitem a obtenção da relação de dispersão para o fonon se propagando ao longo de direções selecionadas no cristal.

II – PRINCÍPIOS BÁSICOS SOBRE O MÉTODO EXPERIMENTAL

II.1 – Espalhamento de Nêutrons

Quando um feixe de nêutrons térmicos incide sobre um sistema de núcleos, diversos tipos de espalhamento podem ser distinguidos. Se todos os núcleos do sistema espalham da mesma maneira, resulta um espalhamento coerente. Mas se cada núcleo não é da mesma espécie, por existirem diferentes tipos de núcleos ou diferentes estados de spin entre o nêutron e um dado núcleo, isto resulta em um espalhamento incoerente. Para os núcleos mantidos fixos em suas posições, o espalhamento é totalmente elástico; mas se aos núcleos for permitido recuar o espalhamento pode ser inelástico. De uma maneira geral, podem ser apresentados quatro tipos de espalhamento: 1) coerente elástico; 2) incoerente elástico; 3) coerente inelástico e 4) incoerente inelástico. Embora o espalhamento incoerente seja muito importante no estudo dos sólidos, o espalhamento coerente é geralmente o de maior interesse.

O espalhamento coerente elástico (Bragg) de nêutrons por um sólido cristalino, é governado pelas equações:

$$\vec{Q} = \vec{k} - \vec{k}' = \vec{G} \quad (3)$$

$$E = E' \quad (4)$$

onde todos os termos já foram definidos anteriormente.

No caso geral do espalhamento coerente inelástico⁽⁶⁾, as equações que governam são:

$$\vec{Q} = \vec{k} - \vec{k}' = \vec{G} + \sum_{i=1}^N (\pm \vec{q}_i) \quad (5)$$

$$E - E' = h \sum_{i=1}^N [\pm \nu(\vec{q}_i)] \quad (6)$$

onde N especifica o número de fonons criados ou aniquilados no cristal pelo processo de espalhamento. Para $N = 1$, o espalhamento envolve um fonon; para $N = 2$, dois fonons, etc. Em particular, o caso de espalhamento coerente inelástico de um fonon por monocristais é comprovadamente o campo de trabalho mais produtivo para o espectrômetro de eixo triplo⁽¹¹⁾. Para esse caso especial as equações (5) e (6) recaem nas equações de conservação (1) e (2).

O processo de um fonon faz surgir estreitos grupos de nêutrons, quando se desenvolve um experimento de espalhamento inelástico de nêutrons. Entretanto, os processos de multifonons provocam

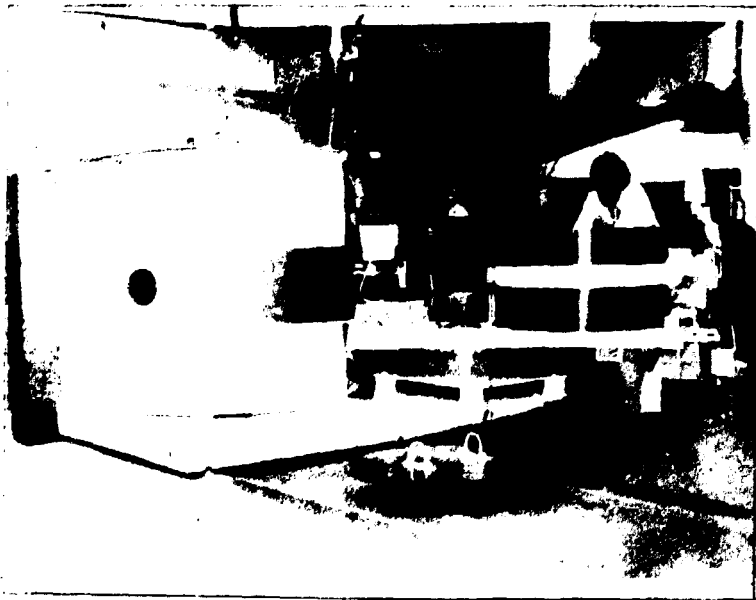
uma radiação de fundo (background), mais ou menos uniforme, a qual é essencialmente independente da orientação do cristal, ângulo de espalhamento e energia do nêutron. Este background pode ser minimizado mantendo a amostra em uma temperatura bem abaixo da temperatura de Debye⁽¹²⁾.

II 2 – Arranjo Experimental

O espectrômetro de 3 eixos do IEA, figura 1, é essencialmente do mesmo tipo daqueles usados em Los Alamos, Ispra e Trombay, isto é, com energia incidente E fixa^(8, 12).

Um diagrama esquemático do espectrômetro pode ser visto na figura 2. A fonte de nêutrons é o reator de pesquisa, tipo piscina, do Instituto de Energia Atômica que opera a 2 MW, com fluxo próximo de 10^{13} nêutrons térmicos/cm² . seg. na posição do caroço. Esses nêutrons, que possuem um espectro de energias aproximadamente Maxwelliano, emergem do reator por um canal de irradiação (bem-hole) com 6" de diâmetro. O canal possui 2,80 m de comprimento e nele está inserido um sistema de colimação composto de: a) um redutor de diâmetro do feixe com 4" de diâmetro; b) um colimador cônico de ferro; c) um colimador cilíndrico de chumbo, com 3" de diâmetro interno; d) um colimador C₁, do tipo "Soller" com placas paralelas de bronze fosforoso, o qual está envolto por uma blindagem de concreto; a divergência angular horizontal do colimador C₁ é de 30 min.; e) um colimador C'₁, para restringir a divergência angular vertical do feixe para 1,5 graus, sendo que este último colimador do sistema primário de colimação, está envolto por discos de chumbo e parafina com boro.

O feixe extraído entra na blindagem principal, onde está abrigado o cristal monocromador X₁ que é usado para selecionar nêutrons de um particular comprimento de onda λ_M e energia E, igual a $(0,286/\lambda_M)^2$ eV, por reflexão de Bragg através do ângulo $2\theta_M$. Esses nêutrons monoenergéticos, com número de onda $|\vec{k}| = 2\pi/\lambda_M$, passam em seguida através do colimador C₂ e incidem sobre a amostra cristalina na posição S. Um monitor de baixa sensibilidade, tipo câmara de fissão, mede o fluxo incidente na amostra e sua razão de contagem é normalmente usada para controlar o sinal para os tempos de contagem durante o experimento.



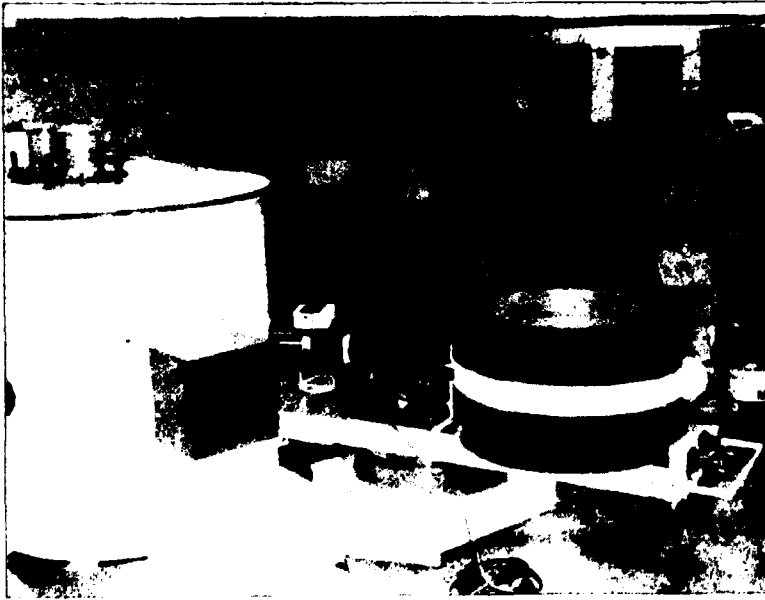


Figura 1 — Fotografias do espectrômetro de 3 eixos, mostrando a blindagem do sistema monocromador, o braço principal, a mesa da amostra e a blindagem do sistema analisador.

A amostra está colocada em uma mesa giratória, cuja orientação é indicada pelo ângulo ψ (ângulo entre \vec{k} e \vec{G}). Após o espalhamento inelástico dos nêutrons pela amostra, aqueles espalhados num ângulo ϕ passam através do colimador C_3 e são analisados em energia E' e vetor de onda k' por reflexão de Bragg pelo cristal analisador X_2 , variando o ângulo $2\theta_A$.

1) O primeiro eixo

O primeiro eixo do espectrômetro consiste no cristal monocromador X_1 e no mecanismo de ajuste desse cristal para extrair o feixe monocromático difratado, pelo canal 1 aberto na blindagem principal, num ângulo fixo $2\theta_M \cong 40^\circ$. O feixe emergente do reator contém aproximadamente 3×10^7 nêutrons térmicos/cm². seg. medidos na posição do cristal monocromador.

Para reduzir a dose de radiação gama e nêutrons rápidos à níveis permissíveis na área de trabalho junto ao espectrômetro, o monocromador está localizado em uma cavidade no centro do raio da blindagem principal, que consiste de um tanque contendo blocos de concreto, água e pedras menores. Na direção do feixe direto foi colocada parafina e boro, além de um cilindro de ferro maciço com 45 cm de comprimento. A blindagem mostrou-se eficaz — a níveis permitidos pela Proteção Radiológica — para o reator operando a 2 Mw. Nas figuras 1 e 2 pode ser vista uma saída 2, que no momento está obturada, mas será usada no futuro para acoplar um difratômetro de eixo duplo.

O feixe difratado pelo monocromador e extraído através do colimador C_2 , que é exatamente igual ao C_1 , isto é, de placas paralelas com 80 cm de comprimento e 7 canais com abertura de 1/4"; a área útil do feixe é um quadrado com 1 3/4" de lado.

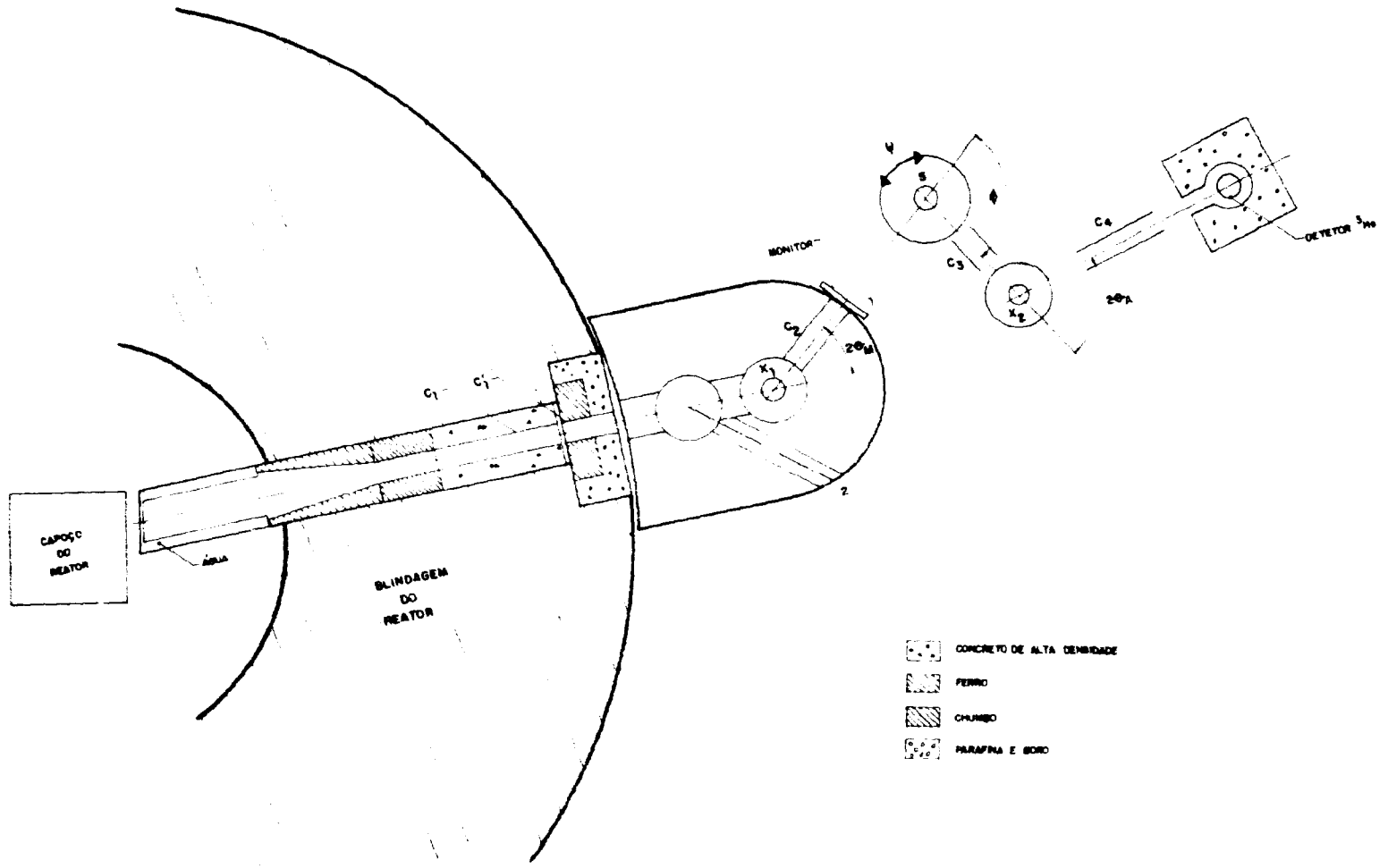


Figura 2 — Diagrama esquemático do espectrômetro de cristal de 3 eixos, para nêutrons, do IEA.



Figura 3 — Tambores para controle mecânico, à distância, do cristal monocromador. Estão instalados na parte superior da blindagem principal.

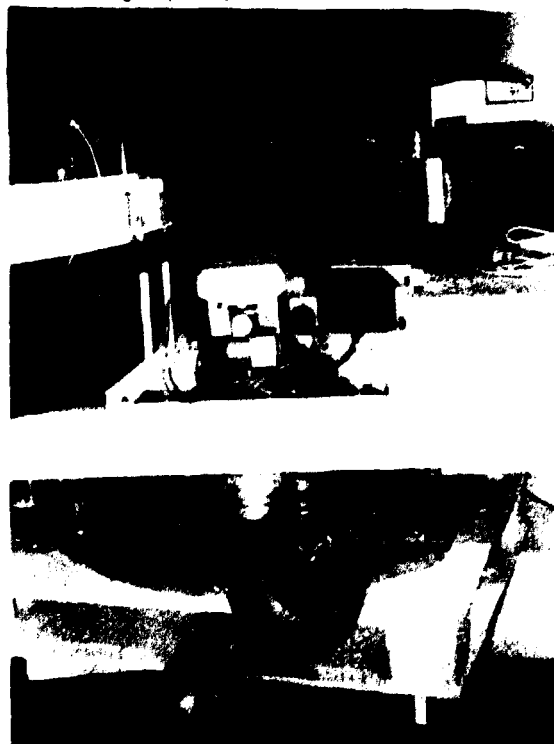


Figura 4 — Par de mesas de freza utilizadas para movimentar o eixo de sustentação da amostra e o braço principal.

O cristal monocromador X_1 está montado no 1º eixo, sob um goniômetro simples acoplado a um tambor, possuindo escala de ângulos circular externa que permite a leitura do ângulo θ_M . Na parte externa do tambor estão os controles do goniômetro que permitem orientar o cristal, por controle mecânico à distância, para colocá-lo na posição de máxima intensidade refletida (figura 3). A determinação precisa do ângulo $2\theta_M$ será feita pela medida do diagrama padrão de difração do Níquel, usando o espectrômetro como difratômetro. Pretendemos colocar, de início, um cristal monocromador de Cu nos planos (200), com distância interplanar igual a 1,807 Å; para o ângulo $2\theta_M \cong 40^\circ$ obteremos um λ_M próximo à 1,236 Å. A intensidade do feixe monoenergético será monitorada pela câmara de fissão de baixa eficiência.

2) O segundo eixo:

O segundo eixo compreende o eixo de rotação do braço principal (que suporta o conjunto analisador) e o sistema de sustentação da amostra. O sistema todo está montado sobre mesas de freza adaptadas o eixo de giro da amostra sobre uma mesa interior pequena (23 cm de diâmetro) e o braço sobre uma mesa superior grande (64 cm de diâmetro). Ambas as mesas são movimentadas manualmente, possuindo escalas graduadas numa extensão externa permitindo leitura de ângulos ϕ em posição visível (figura 4).

O braço principal, apoiado sobre a mesa maior, consiste de um par de trilhos de ferro com 1,90 cm de comprimento. Na extremidade do braço está colocado o sistema analisador e sua blindagem (de ordem de 300 kg); e na outra extremidade o contrapeso constituído por 60 tijolos de chumbo com 11 kg cada. O ângulo de variação da mesa superior corresponde ao ângulo ϕ dos nêutrons espelhados inelasticamente pela amostra.

O sistema de sustentação da amostra está apoiado sobre um eixo cravado no centro da mesa de freza pequena inferior. A amostra apoia-se sobre uma cabeça goniométrica (importada da Polônia) com 5 graus de liberdade, os quais são movimentados à distância por servomecanismo. O ângulo ψ no entorno do eixo para orientação da amostra, pode ser variado manualmente pela movimentação da mesa inferior ou por controle remoto como um dos graus de liberdade da cabeça goniométrica (figura 5).



Figura 5 – Cabeça goniométrica para orientação da amostra. Está apoiada no 2º eixo e possui 5 graus de liberdade comandados, à distância, por servomecanismo. Na figura pode ser visto o 3º colimador e o monitor, que é uma câmara de fissão.

3) O terceiro eixo :

O sistema analisador está montado no braço principal, com seu eixo X_2 colocado a 70 cm da posição da amostra. Todo sistema está envolvido por uma blindagem cilíndrica com 53 cm de altura, 68 cm de diâmetro interno e 16 cm de parede, feita de uma mistura de parafina mais boro. Esta blindagem, que foi construída para reduzir o número de nêutrons rápidos e térmicos espúrios que tentam atingir o detector, possui ainda um revestimento interno de folhas de 0,8 mm de Cádmiio. Nessa blindagem, entre a linha que une o 2º e o 3º eixos, está inserido o colimador C_3 , do tipo "Soller" com divergência angular de 48,5 min.

O sistema analisador, dentro da blindagem, figura 6, consiste de um difratômetro de alta precisão para raios X do tipo usado em técnica de pó, especialmente adaptado para receber em seu eixo a cabeça goniométrica de sustentação do cristal analisador e em seu braço apoiar o colimador C_4 e o detector de nêutrons. O feixe de nêutrons espalhados inelasticamente pela amostra no ângulo ϕ será analisado pelo cristal X_2 , pela lei de Bragg, variando o ângulo $2\theta_A$ do difratômetro adaptado.

Um cristal de grafite pirolítico de alta refletividade será usado como cristal analisador⁽¹⁰⁾. Possui a forma de uma placa com os planos (002) paralelos à superfície (distância interplanar $d = 3,36 \text{ \AA}$). Esse cristal será montado sobre uma cabeça goniométrica de sustentação, semelhante àquela da amostra, porém menor e com 4 graus de liberdade acionados por servomecanismo.

O braço do sistema analisador, que está acoplado na relação $\theta_A : 2\theta_A$ com o cristal analisador X_2 , suporta o colimador C_4 com divergência angular de 1,8 min. e o detector de ^3He com sua blindagem específica. O detector é um cilindro de 4" de altura por 2" de diâmetro, preenchido com gás ^3He na pressão de 4 atmosferas. Sua blindagem consiste de um envoltório de cádmio, recoberto por um cilindro de 22 cm de altura, 10 cm de diâmetro e 2 cm de parede feita de mistura de resina mais boro. Nessa blindagem está recortada uma abertura quadrada com 4,5 cm de lado, para permitir a entrada do feixe de nêutrons analisado.

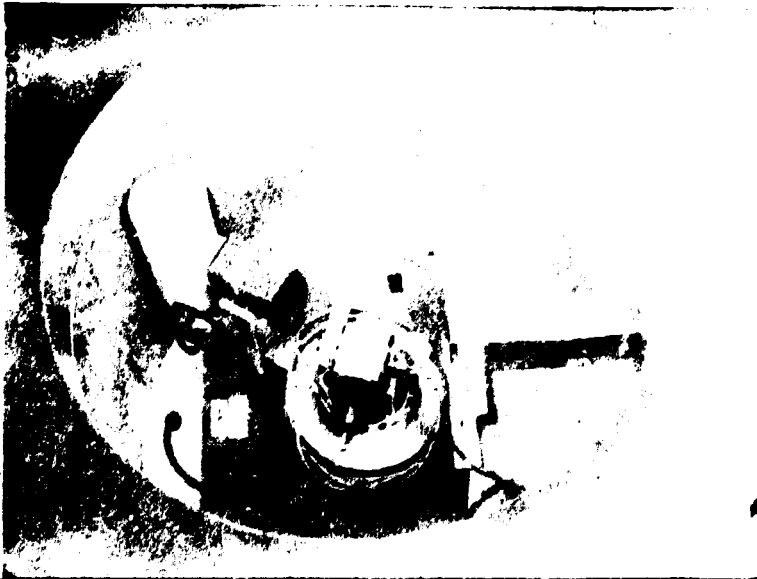


Figura 6 – Sistema analisador, podendo ser visto o 3º colimador, a cabeça goniométrica do cristal analisador apoiada sobre o difratômetro de raios X adaptado, o 4º colimador apoiado sobre o braço do difratômetro, e a blindagem do detector.

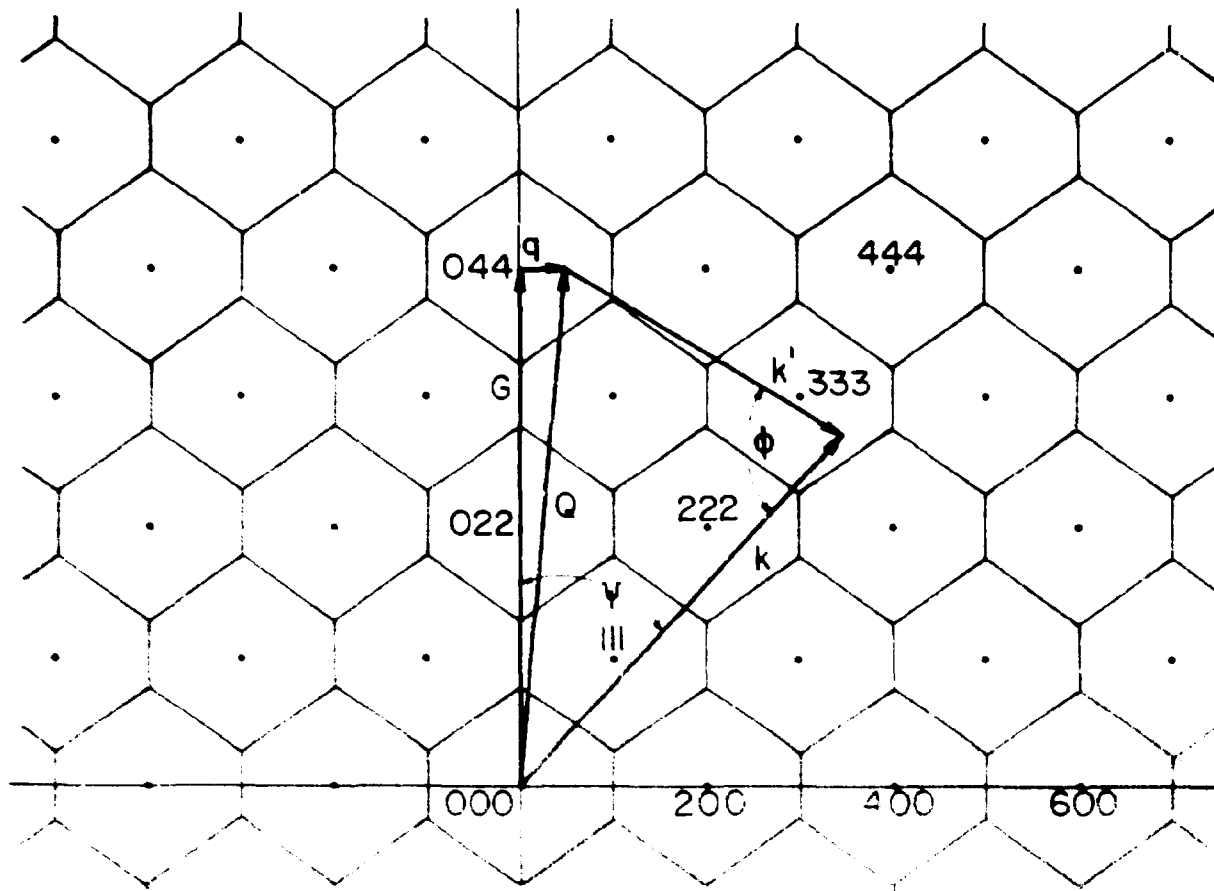


Figura 7 – Exemplo de um processo típico de espalhamento inelástico no plano $(01\bar{1})$ da rede recíproca

III – METÓDO EXPERIMENTAL

Pretende-se utilizar nos experimentos o chamado método do \vec{Q} constante^(2,3). Por este método o vetor \vec{Q} transferência de vetor de onda é pré-selecionado em módulo e direção para corresponder à uma posição particular na rede recíproca; e a frequência é variada sobre um intervalo, também, pré-selecionado. Um fonon de vetor de onda \vec{Q} será indicado pela detecção de um grupo de nêutrons centrado na frequência do fonon. Por causa da periodicidade da relação de dispersão, o vetor de onda do fonon pode ser sempre referido a 1ª zona de Brillouin, subtraindo do \vec{Q} o vetor apropriado da rede recíproca \vec{G} de modo a produzir o vetor de onda \vec{q} da 1ª zona. A figura 7 mostra o exemplo de um processo típico de espalhamento inelástico no plano (011) da rede recíproca. A construção vetorial satisfaz a condição de conservação de vetor de onda expressa pela equação (2). O vetor de onda \vec{q} do fonon foi referido à zona (044) e está se propagando na direção (100).

No método do \vec{Q} constante, quando se quer variar a frequência, é exigido que o ângulo de Bragg θ_A do analisador, o ângulo de espalhamento ϕ e o ângulo de orientação ψ da amostra cristalina, sejam todos variados. Isto é, mede-se um grupo de nêutrons para um dado valor \vec{Q} fixo, variando as frequências para esse grupo (variando ϕ , ψ e $2\theta_A$). O número de contagens versus frequência são colocados em gráfico para um dado grupo e a partir da figura determina-se o centróide do pico, que corresponderá à frequência média para um dado \vec{Q} (portanto \vec{q}). Para se obter as relações de dispersão seleciona-se novo \vec{q} (ou \vec{Q}) e mede-se outro grupo de nêutrons de modo a marcar outra frequência para o novo \vec{q} . Desta maneira obtém-se as relações de dispersão $\nu = \nu(\vec{q})$ ponto a ponto⁽⁴⁾.

Geralmente as relações de dispersão são medidas para fonons se propagando ao longo das três direções de alta simetria do cristal: (100), (011) e (111); chamadas Δ , Σ e Λ respectivamente. Restringindo as considerações da relação de dispersão à essas direções, os procedimentos experimentais e as interpretações teóricas podem ser muito simplificadas⁽¹²⁾.

A interpretação das curvas de dispersão determinadas experimentalmente são geralmente feitas com base na teoria geral de Born-von Karman para dinâmica de redes^(1,7,9). O procedimento mais freqüente envolve a construção de um modelo de força, que considera interações entre um número selecionado de átomos vizinhos. As constantes de forças interatômicas são usadas para descrever as interações e são deixadas como parâmetros ajustáveis de modo a haver concordância entre o modelo e os dados experimentais. Os parâmetros obtidos dessa forma fornecem informações sobre o valor das forças interatômicas.

Um modelo que possa reproduzir as curvas de dispersão experimentais pode ser útil, também, para a determinação da função distribuição $g(\nu)$. A função $g(\nu)$ fornece a densidade de estados vibracionais permitidos do cristal, ou ainda, a quantidade $g(\nu) \Delta\nu$ representa o número de modos normais permitidos que ocorrem entre ν e $\nu + \Delta\nu$. A partir da função distribuição é possível determinar a maioria das propriedades térmicas importantes dos sólidos, inclusive a dependência do calor específico com a temperatura.

ABSTRACT

Integrating the neutron inelastic scattering plan in IEA, of São Paulo, Brazil, it was completely designed and constructed there, a triple axis neutron spectrometer.

The spectrometer operation is based on the neutron monoenergetic beam extraction from the IEA-R1 reactor thermal maxwellian spectrum, using a crystal monochromator. The extracted beam incides in a crystalline sample, and the scattered neutrons are analyzed in angle and energy using a crystal for this purpose. Through this way it was possible to determine energy and momentum changes between scattering system and neutrons.

The spectrometer will be used in lattice dynamic studies, where atomic vibrational states of a crystal lattice and the field of forces determining these vibrations are been searched.

The present paper describes the details about construction and design of the spectrometer. There are also

described basic principles about the experimental method which utilize neutron coherent inelastic scattering in order to determine the relation dispersion between frequency and wave vector of the crystalline vibrations

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BORN, M. & HUANG, K. *Dynamical theory of crystal lattices*. Oxford, Clarendon Press, 1968.
2. BROCKHOUSE, B. N. *Methods for neutron spectrometry*. Chalk River, Ont., Atomic Energy of Canada, Jan. 1961. (AECL-1183).
3. CAGLIOTTI, G. The triple axis spectrometer. In: ADVANCED course on neutron crystal spectrometry, org. by the Netherlands-Norwegian Reactor School, at Institutt for Atomenergi Kjeller, Norway, 18th June – 27th June 1962. Kjeller, Institutt for Atomenergie, s.d Section VII
4. COWLEY, R. A. *Determination of phonon spectra*. Chalk River, Ont., Atomic Energy of Canada [Aug. 1968]. (AECL-3336).
5. DOLLING, G. Neutron spectroscopy and lattice dynamics. In: MARADUDIN, A. E & HORTON, E. K., eds. *Dynamical of properties of solids*. Amsterdam, North-Holland, 1974. (AECL-4647) p.541-629.
6. _____. The theory and practice of neutron inelastic scattering. In: CALIFANO, S., ed. *Lattice dynamics and intermolecular forces: course L.V, International School of Physics "Enrico Fermi"*. New York, Academic Press, 1975. p.175-238.
7. _____ & WOODS, A. D. B. Thermal vibration of crystal lattices. In: EGELSTAFF, P. A., ed. *Thermal neutron scattering*. New York, Academic Press, 1965. p.193-244
8. IYENGAR, P. K. Crystal diffraction techniques. In: EGELSTAFF, P. F., ed. *Thermal neutron scattering*. New York, Academic Press, 1965. p.113-8.
9. MARADUDIN, A. A.; MONTROLL, E. W. & WEISS, G. H. Theory of lattice dynamics in the harmonic approximation. *Solid St. Phys.*, New York, (Suppl. 3):1-319, 1963.
10. RISTE, T. Oriented graphite as a neutron monochromator. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. *Instrumentation for neutron inelastic scattering research: proceedings of a panel held in Vienna, 1-5 December 1969*. Vienna, 1970. p.91-104.
11. SAUNDERSON, D. H.; DUFFILL, C. & SHARP, R. I. *The dido triple axis crystal spectrometer*. Harwell, Berks., Atomic Energy Research Establishment, Aug. 1965. (AERE-E 4895).
12. VERBLE, L. J. *Lattice dynamics of lithium hydride*. Los Alamos, N. Mex., Los Alamos Scientific Lab., July 1967. (LA-3750).

