

Neutrões e matéria condensada

Aspectos experimentais

Fontes intensas de neutrões

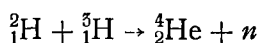
por FREDERICO GAMA CARVALHO

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

A aplicação ao estudo dos agregados materiais, sólidos e líquidos, do método experimental poderosíssimo que é a dispersão de neutrões, está dependente da existência de fontes intensas dessas partículas, de características adequadas à experimentação. As fontes mais intensas de neutrões de que se dispõe actualmente podem classificar-se em dois grandes grupos: aceleradores de partículas e reactores nucleares. Pertencem ao primeiro grupo os aceleradores de baixa energia ($< 1 \text{ MeV}$) do tipo Cockcroft-Walton e os aceleradores lineares de electrões. Em todos eles os neutrões resultam de reacções nucleares provocadas pelo bombardeamento, com partículas carregadas, dum alvo convenientemente escolhido.

1. Aceleradores do tipo Cockcroft-Walton

Uma das reacções mais frequentemente utilizadas nos aceleradores de baixa energia é a reacção $T(d, n)^4\text{He}$



provocada pelo bombardeamento dum alvo de trítio (que é um gás e por isso se encontra adsorvido num suporte apropriado, p. ex. titânio) por um feixe de deuterões acelerados por um potencial

electrostático de 100 kV a 300 kV. O rendimento da reacção permite atingir facilmente intensidades da ordem de 10^{11} s^{-1} (neutrões por segundo) para uma intensidade da corrente de iões da ordem de 1 mA.

Nestas condições, a emissão neutrónica é aproximadamente isotropa e a energia dos neutrões emitidos é vizinha de 14 MeV, com um espectro de energias limitado a uma estreita faixa em torno desse valor: $(14 \pm 1) \text{ MeV}$.

Fazendo incidir no alvo de trítio uma corrente de intensidade constante, obtém-se uma fonte de neutrões *estacionária*, isto é, de intensidade independente do tempo (pelo menos enquanto o alvo usado não se deteriorar). Para certas experiências, todavia, é indispensável dispor de fontes intermitentes ou *pulsadas* de neutrões, em particular quando se utiliza o «método de tempo de voo», no qual a energia dos neutrões é determinada através da medida do tempo gasto em percorrer uma distância conhecida. Este objectivo pode atingir-se, sem grande dificuldade, pulsando ou modulando a intensidade da corrente de iões do acelerador. No caso da pulsação (feixe intermitente) a duração dos impulsos poderá ser da ordem de $10 \mu\text{s}$.

O alvo de trítio adsorvido põe alguns problemas: deve ser convenientemente arrefecido e não poderá, em regra, dissipar mais do que cerca de 100 W cm^{-2} .

O princípio e os aspectos construtivos gerais dos aceleradores Cockcroft-Walton foram estabelecidos há já algumas dezenas de anos (o aparelho original data de 1932); todavia, a sua utilização como fonte pulsada intensa de neutrões estimulou a construção de variantes consideravelmente aperfeiçoadas. No duoplasmatrão, por exemplo, apresentado em Genebra, em 1964, por ocasião da 3.^a Conferência das Nações Unidas sobre Aplicações Pacíficas da Energia Atómica, encontram-se resolvidos, num dispositivo compacto, de volume inferior a 1 m^3 , os difíceis problemas tecnológicos ligados à produção de correntes elevadas na fonte de iões, e ao arrefecimento adequado do alvo de trítio. Neste aparelho, a tensão de aceleração é de 120 kV, elevando-se a 500 mA a intensidade instantânea da corrente de deuterões no alvo. A duração dos impulsos pode variar entre 5 e $50\ \mu\text{s}$, a uma frequência de repetição até $400\ \text{s}^{-1}$.

2. Aceleradores lineares de electrões

Um outro tipo de acelerador de partículas — o acelerador linear de electrões — tem hoje considerável interesse como fonte pulsada de neutrões. Nestas máquinas, designadas em inglês, abreviadamente, por «(electron) LINAC», os electrões são acelerados no interior de um longo tubo rectilíneo guia-de-onda, no qual é gerada e se propaga uma onda electromagnética. Os electrões são produzidos por um dispositivo semelhante ao tubo de raios catódicos e injectados numa extremidade do tubo acelerador; sob a acção do campo electromagnético existente no interior do tubo, as partículas são forçadas a agrupar-se, sendo simultaneamente arrastadas, a velocidade crescente, ao longo daquele. Durante quase todo o trajecto, a velocidade dos electrões é vizinha da velocidade da luz e, por isso, experimenta uma variação relativa de

valor que é pequena. O comprimento do tubo acelerador pode ser de algumas dezenas de metros.

Na extremidade oposta ao injector de electrões, é colocado o alvo, que vai receber a corrente intermitente de partículas de alta energia (50 a 100 MeV). Escolhe-se um elemento de número atómico elevado para que a interacção dos electrões com o alvo dê origem a emissão intensa e fortemente direccionada (para a frente) de radiação de travagem («bremsstrahlung»). Esta radiação, por sua vez, arranca neutrões aos núcleos-alvo por efeito fotonuclear (reação (γ, n)).

Como alvo, usa-se, correntemente, o urânio. A quantidade de calor que aí se liberta é considerável e pode atingir o equivalente a uma potência de algumas dezenas de kW. Para maior facilidade de extracção do calor, pode substituir-se o alvo sólido por uma corrente de metal líquido, p. ex. mercúrio. Quando se usa o urânio, juntam-se aos neutrões produzidos por efeito fotonuclear os que aparecem em consequência de fenómenos de fotocisão; deste modo o rendimento da fonte melhora. Pode aumentar-se ainda o número de neutrões produzidos envolvendo o alvo num material cindível pelos neutrões gerados naquele, p. ex. ^{235}U . Obter-se-á assim uma multiplicação do número original de neutrões desde que, como acontece com o urânio, em cada cisão se liberte, em média, mais do que um neutrão. Em duas instalações deste tipo funcionando, uma no centro nuclear britânico de Harwell, outra em Dubna, na União Soviética, obtiveram-se factores de multiplicação, respectivamente, de 10 e 100 (Fig. 1)⁽¹⁾.

Os neutrões produzidos num LINAC,

(1) Estes dispositivos designam-se em inglês por «accelerator-booster»; trata-se dum reactor sub-crítico associado a uma fonte modulada (injecção de neutrões provenientes do alvo do acelerador).

com ou sem multiplicação adicional, têm um espectro de energias semelhante aos dos neutrões de cisão por neutrões térmicos do ^{235}U . É um espectro contínuo que se estende até cerca de 10 MeV, com um máximo a 1 MeV e valor médio 2 MeV. A intensidade média típica duma fonte

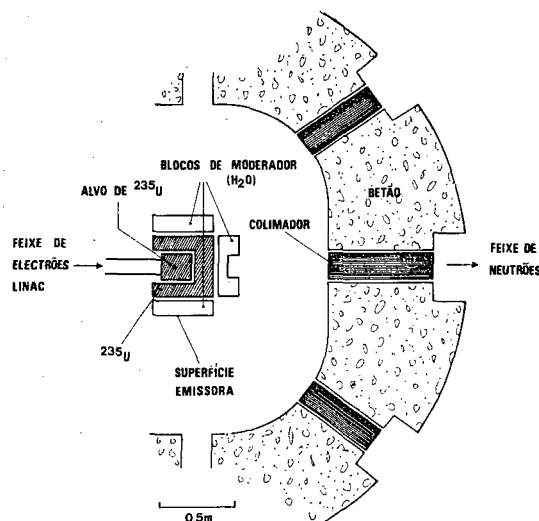


Fig. 1 — Esquema dum terminal de LINAC, fonte de neutrões, com multiplicação («accelerator booster»). A parede de betão destina-se a proteger da radiação os experimentadores e a aparelhagem experimental.

LINAC atinge 10^{14} s^{-1} , para uma corrente de electrões de 1 mA. A duração do impulso de electrões no alvo é ajustável, podendo ir de $0,01 \mu\text{s}$ a $5 \mu\text{s}$, enquanto a frequência de repetição dos impulsos pode atingir algumas centenas por segundo. A intensidade instantânea da fonte atinge valores, muito elevados, da ordem de 10^{17} s^{-1} .

3. Energia dos neutrões

O espectro de energias dos neutrões provenientes das fontes a que fizemos referência situa-se na região dos MeV (*neutrões rápidos*). Para o estudo da estrutura de sólidos ou de líquidos é, porém, necessário dispor de neutrões de energia

muito mais baixa. Em regra, a energia deverá ser inferior a 1 eV, valor que tomaremos para definir o limite superior da gama dos chamados *neutrões lentos*. Efectivamente, para estes estudos, convem que a energia dos neutrões seja, *grosso modo*, da ordem de grandeza da separação entre níveis discretos de energia característicos dos movimentos atómicos nos agregados materiais. Ao mesmo tempo, tratando-se de neutrões, o comprimento de onda das partículas será da ordem de grandeza do valor médio do afastamento entre átomos vizinhos, nesses agregados materiais.

Na prática, a condição anterior é quase sempre satisfeita quando a energia dos neutrões for da ordem de grandeza do valor médio da energia de agitação térmica, por átomo do agregado material, à temperatura ambiente. Exige-se, ainda, que o dispositivo experimental a usar permita determinar, com suficiente rigor, a energia dos neutrões incidentes na amostra em estudo e, também, a sua direcção de incidência. A imprecisão com que uma e outra serão conhecidas exprime-se numericamente pelos valores da *resolução em energia* e da *colimação do feixe incidente*, no dispositivo. Ambas são, em regra, desvios padrão de distribuições normais ou grandezas de significado físico análogo.

Em geral, trabalha-se com um feixe bem definido, alimentado por uma *superfície emissora* de neutrões cujas energias, compreendidas entre 5 meV e 100 meV, aproximadamente, pertencem ao intervalo de valores a que corresponde uma probabilidade apreciável na distribuição de Maxwell para a temperatura ambiente (valor mais provável: $E = (1/2) k T = 12,6 \text{ meV}$ ⁽¹⁾). Estes neutrões recebem a designação de *térmicos*.

(1) k , é a constante de Boltzmann, e T , a temperatura absoluta.

Para criar uma tal superfície emissora é necessário recorrer a um processo susceptível de reduzir suficientemente a energia dos neutrões rápidos da fonte. Esta é envolvida num material pouco absorvente, contendo núcleos leves (*material moderador*), aos quais os neutrões comunicam, em sucessivos choques, quase toda a energia cinética que possuem inicialmente. Se o volume de material moderador for suficientemente grande, acaba por atingir-se a *termalização* dos neutrões, isto é, o estabelecimento, no seio do moderador, de uma população (um «gás») de neutrões em equilíbrio térmico com o meio. Esse gás é alimentado pela fonte (de neutrões rápidos), por um lado, consumindo-se, por outro, gradualmente, por absorção no meio moderador e por emissão para o exterior através das superfícies limitrofes. Para uma boa termalização, exige-se uma quantidade mínima de moderador, que depende, naturalmente, das características do material escolhido. Se o volume de moderador é pequeno, os neutrões acabam por perder-se, pelas razões apontadas, sem que tenha sido atingida a situação de equilíbrio que corresponde à termalização. Quando se usam fontes pulsadas, o impulso original de neutrões rápidos dá origem a um impulso muito mais longo de neutrões, mais ou menos bem termalizados, consoante as dimensões do moderador. Em regra, exige-se que a largura do impulso de neutrões lentos não seja superior a algumas dezenas de microsegundos, o que leva a reduzir as dimensões do moderador a valores da ordem do decímetro (ver fig. 1). Nestas condições, a intensidade neutrónica utilizável na região térmica é apreciavelmente reduzida, pois grande número de neutrões deixa o moderador sem ter sofrido o número de colisões necessário para diminuir suficientemente a sua energia inicial.

4. Reactores nucleares

Nos reactores nucleares os neutrões aparecem em resultado da cisão de núcleos pesados (^{235}U ou ^{239}Pu), provocada pela captura de um neutrão nesses núcleos. Os neutrões de cisão têm um espectro contínuo de energias com as características atrás apontadas (energia mais provável: 1 MeV; energia média: 2 MeV). Como a energia total libertada numa cisão nuclear vale cerca de 200 MeV (ou $30 \mu\text{J}/10^6$ cisões) e o número médio de neutrões produzidos por cisão é, aproximadamente, 2,5, um reactor de 1 MW de potência produz cerca de 10^{17} neutrões por segundo ou, em termos de massa, cerca de 0,6 mg/h. Nos reactores em que as cisões são provocadas, predominantemente, pela captura de neutrões térmicos (*reactores térmicos*), o material cindível, ou combustível nuclear, encontra-se sempre distribuído no seio de um material moderador (p. ex. H_2O , D_2O , grafite) que se destina a conseguir a termalização dos neutrões de cisão. No reactor térmico, portanto, a existência duma população de neutrões termalizados aparece como exigência do próprio funcionamento do sistema, o que não acontecia nas outras fontes.

O *núcleo do reactor* — zona central onde se encontra o combustível nuclear e o moderador — é envolvido, normalmente, por uma massa adicional considerável do mesmo ou de outro material moderador (o *reflector*), destinada a dificultar a fuga de neutrões para o exterior. A região do espaço ocupada pelo reflector constitui uma espécie de reservatório onde se acumulam os neutrões utilizáveis na experimentação, obtendo-se aí densidades (neutrões por cm^3) muito superiores às que se teria no vazio a igual distância da fonte. Normalmente, abre-se no reflector uma cavidade alongada para ir recolher o desejado fluxo de neutrões a um lugar onde seja desprezável a perturbação devida às

superfícies confinantes. Procura-se sempre trabalhar com uma superfície emissora tão grande quanto possível e define-se a direcção de emergência dos neutrões a aproveitar, instalando na cavidade, ou canal de extracção, um colimador conveniente. Este pode ser constituído por lâminas paralelas ou por um feixe de tubos de pequeno diâmetro, de um material absorvente de neutrões (Fig. 2). A superfície emissora é alimentada pela população de neutrões existente numa região circunvizinha do reflector, cujo volume, que designaremos por *voluma emissor*, não excederá, na prática 10^{-2} m^3 .

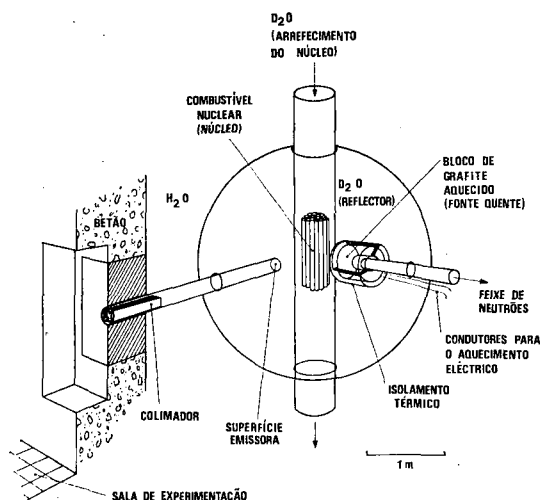


Fig. 2 — Esquema dum reactor com dois tubos de feixe radiais, um deles equipado com uma fonte quente. A água pesada serve de moderador e reflector de neutrões, e de fluido de arrefecimento.

5. Fontes quentes e fontes frias

Se a temperatura do reflector ou de uma região deste, for diferente da ambiente, a termalização dos neutrões nessa região conduzirá, através do acoplamento energético entre o gás de neutrões e os átomos do meio, a um equilíbrio térmico, em que a distribuição de probabilidades dos valores da energia dos neutrões é a

distribuição de Maxwell correspondente à temperatura imposta⁽¹⁾.

Convém notar que a grandeza que directamente interessa, quando se pretende estimar a intensidade do feixe de neutrões proveniente duma certa superfície emissora, é o fluxo, $\phi(E) = vn(E)$, na superfície, em que v é a velocidade, E , a energia cinética dos neutrões, e $n(E)$ o número de neutrões por unidade de volume num intervalo de energias unidade. Se a termalização no meio for perfeita, $\phi(E)$ é máximo para $E = kT$. A posição deste máximo deslocar-se-á, conforme a temperatura escolhida, para valores da energia superiores ou inferiores ao correspondente à temperatura ambiente ($E = 25,3 \text{ meV}$); assim, a 1000°C o máximo encontra-se em 112 meV , e a $-263,2^\circ\text{C}$ (10°K), em $0,85 \text{ meV}$ (aprox. 10 \AA). Diz-se que se dispõe de uma «fonte fria» quando a temperatura do volume emissor com que se trabalha for inferior à ambiente, ou de uma «fonte quente», no caso contrário. Na prática, num caso como no outro, procede-se à inserção na massa considerável de moderador normalmente associada à fonte de neutrões, de um volume relativamente reduzido de um material moderador conveniente, termicamente isolado do que o envolve, cuja temperatura se regula (ver fig. 2). Os moderadores mais usados são, nas fontes frias, hidrogénio ou deutério liquefeitos; nas fontes quentes, grafite, berílio ou óxido de berílio. As temperaturas atingem, no primeiro caso, 10 a 100°K ; no segundo, 1000 a 2500°C . O ganho no fluxo de neutrões referido ao valor correspondente à mesma energia, à temperatura ambiente, pode

(1) Esta afirmação não é inteiramente correcta porque a absorção de neutrões no meio e as fugas para o exterior perturbam o estabelecimento do equilíbrio térmico nas condições referidas; a perturbação é tanto maior quanto menor for o volume da região aquecida, ou arrefecida, e quanto maior for a absorção no meio.

atingir 20 a 30 numa fonte fria, na região dos 10 Å, e 5 a 10 numa fonte quente, na região dos 200 meV.

Podem obter-se deste modo feixes de neutrões de intensidade apreciavelmente superior às que é possível atingir partindo duma fonte em equilíbrio térmico com o moderador à temperatura ambiente, quer na região das baixas energias ($E < 5$ meV, *neutrões frios*), quer na das centenas de meV. Os neutrões de muito baixa energia têm especial interesse para as experiências de óptica neutrónica (refracção, reflexão total) e no estudo de defeitos de materiais (determinação de dimensões de vazios e de tamanhos de grãos); por seu turno, os neutrões na região dos 100 a 300 meV têm interesse particular no estudo de vibrações moleculares, por excitação.

6. Reactores de alto fluxo e reactores pulsados

Do ponto de vista do experimentador interessado na utilização de feixes de neutrões lentos, o mérito das diferentes fontes de neutrões deverá avaliar-se pela comparação das características do fluxo que se obtém na superfície emissora onde termina o canal de extracção. Nos reactores nucleares o fluxo, por MW libertado, que se estabelece no seio do moderador, depende muito da natureza dos materiais utilizados e da sua disposição relativa. Nos últimos anos, o interesse em dispor de fontes cada vez mais poderosas levou a conceber e a projectar reactores de alto fluxo de características especialmente apropriadas à experimentação com feixes de neutrões. Tais reactores, nos quais o fluxo atinge o valor de $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, são todavia ainda pouco numerosos⁽¹⁾. A título de comparação indica-se o valor máximo do fluxo de neutrões térmicos no reactor de investigação da Junta de Energia

Nuclear, em Sacavém, que é aproximadamente $10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Um outro tipo de reactor com interesse para a experimentação com feixes de neutrões é o reactor pulsado. Trata-se duma

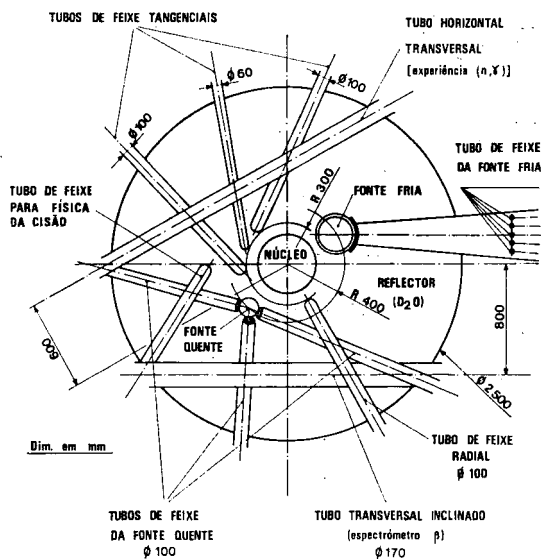


Fig. 3—Esquema da disposição dos tubos de feixe num reactor de alto fluxo (projecto do Reactor Franco-Alemão de Alto Fluxo, em Grenoble).

(De «Proceed. Seminar on Intense Neutron Sources», Santa Fé, New Mexico (1966) CONF—660925).

fonte intermitente de neutrões (como o LINAC) em que a reacção de cisão em cadeia é provocada bruscamente por uma

(1) São os seguintes os reactores de alto fluxo de que temos conhecimento: o «High Flux Breeder Reactor» do Laboratório Nacional de Brookhaven (EUA), em funcionamento desde Outubro de 1965; o «High Flux Isotope Reactor», do Laboratório Nacional de Oak Ridge (EUA), em funcionamento desde Agosto de 1965; o «Argonne Advanced Research Reactor», do Laboratório Nacional de Argonne (EUA) e o Reactor Franco-Alemão de Alto Fluxo (ver fig. 3), em Grenoble, que se espera entrem em funcionamento em 1971. Todos estes reactores oferecem fluxos térmicos máximos nas superfícies emissoras dos dispositivos experimentais, entre 5×10^{14} e $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

variação rápida da quantidade de combustível nuclear reunida no reactor, ou pela extracção, igualmente brusca, duma certa quantidade de material absorvente, ou ainda pela introdução dum volume apropriado de moderador. Os reactores pulsados que despertam mais interesse são aqueles em que o espectro de energias

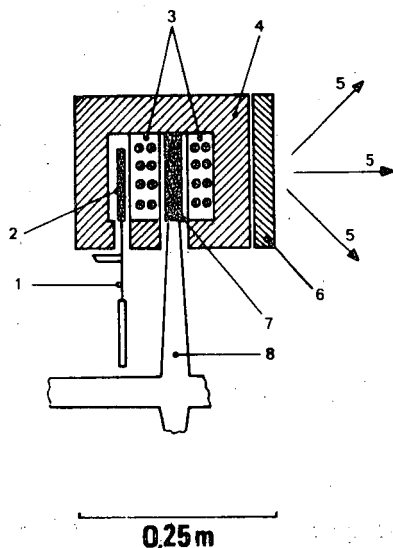


Fig. 4 — Esquema do reactor rápido pulsado IBR. 1 — rotor auxiliar; 2 — combustível nuclear móvel auxiliar (^{235}U); 3 — combustível nuclear fixo (^{239}Pu); 4 — reflector; 5 — neutrões; 6 — bloco moderador; 7 — combustível nuclear móvel (^{235}U); 8 — rotor principal.

(De GUREVICH, I. I. e TARASOV, L. V., «Low-Energy Neutron Physics», North-Holland Publ. Co. Amsterdam, 1968).

dos neutrões que provocam a cisão ocupa a região das centenas de keV. Nestes reactores, que se designam por *rápidos*, não se procura moderar e termalizar os neutrões de cisão, o que permite reduzir a duração dos impulsos gerados. Utiliza-se todavia um material leve e pouco absorvente (o *reflector*) para limitar a fuga de neutrões para o exterior. O combustível é o urânio fortemente enriquecido no

isótopo ^{235}U , ou o ^{239}Pu . Junto a uma das faces do reactor colocar-se-á um certo volume de material moderador destinado a termalizar o impulso original. A superfície emissora encontra-se por vezes no fundo duma cavidade, de forma conveniente, aberta no moderador. O protótipo deste tipo de fontes pulsadas é o reactor IBR instalado em Dubna (URSS) onde funciona desde 1960 (Fig. 4). A potência média deste reactor é apenas de 6 kW mas atinge durante os impulsos cerca de 2MW; a duração dos impulsos produzidos é de cerca de $50\ \mu\text{s}$ e a frequência de repetição, variável entre 8 e $80\ \text{s}^{-1}$. A intensidade da fonte durante o impulso de neutrões é da ordem de $10^{16}\ \text{s}^{-1}$.

A um reactor rápido pulsado pode associar-se um LINAC. A injeção no núcleo do reactor do impulso de neutrões gerado no alvo do acelerador é sincronizada com a pulsação própria do reactor, obtendo-se uma enorme multiplicação do número de partículas. Os dispositivos deste tipo designam-se, em inglês, por «accelerator-booster pulsed reactors».

BIBLIOGRAFIA

1. Proceed. Seminar on Intense Neutron Sources, Santa Fé, New Mexico (1966) CONF-660925.
2. Proceed. 4th IAEA Symposium on Neutron Inelastic Scattering Vol. II, IAEA, Vienna (1968).
3. Proceed. IAEA Panel on Instrumentation for Neutron Inelastic Scattering Research, IAEA, Vienna (1970).
4. BECKURTS, K. H. e WIRTZ, K., *Neutron Physics*, Springer Verlag (1964).
5. BACON, G. E., *Neutron Physics*, The Wykeham Science Series for Schools and Universities, Wykeham Public. Ltd., London (1969).