

Plano de pesquisa FAPESP Julho de 2014

Testes de modelos teóricos através de medidas precisas de momento de dipolo magnético nuclear

J.R.B. Oliveira (responsável), N.H. Medina
Instituto de Física da USP – DFN

Resumo

Objetiva-se reequipar o sistema de medida de momentos de dipolo magnéticos (fatores giromagnéticos) de estados nucleares para viabilizar a realização de experimentos de precisão. Estes experimentos permitirão testar modelos teóricos que visam a descrição detalhada da estrutura nuclear, entre os quais o modelo de camadas de larga escala (LSSM), e o modelo de camadas sem caroço *ab initio* (NCSM), em nível mais fundamental. Especificamente, pretende-se medir o fator g de estados excitados dos núcleos de ^{48}Ca , ^{32}S , para testes das previsões das propriedades de estruturas coletivas no modelo de LSSM, e estados de paridade negativa $I^\pi = \frac{5}{2}^-$ do ^{19}F e do ^{19}Ne , ambos com três partículas de valência acopladas a um caroço de ^{16}O , para testes, entre outros, dos efeitos previstos da força de 3 corpos no NCSM. Nestes experimentos, pretende-se utilizar duas técnicas de medidas (a técnica de TMF – campo magnético transiente, e a de RIV – recuo em vácuo, ambas adequadas para estados de vida média da ordem de ps). A utilização de duas técnicas distintas permite a verificação da consistência entre os resultados e controle de erros sistemáticos. Para isto, solicitam-se dois detectores de raios gama de alta resolução (de germânio hiperpuro, GeHP) com 60 % de eficiência relativa, para complementar o sistema do espectrômetro atual, e vários detectores de partículas carregadas (cintiladores plásticos tipo *phoswich*, ΔE -E, com fotomultiplicadoras de Silício de 4×4 pixels) para compor um novo sistema de alta granularidade e cobertura angular, resistente a danos de radiação e capaz de suportar altas taxas de contagens. O sistema poderá ser utilizado em associação com o solenóide supercondutor RIBRAS para produção de feixes radioativos. Os equipamentos serão utilizados também em outros experimentos no LAFN, a médio e longo prazo, para, entre outros, estudos de mecanismos de reação nuclear com núcleos fracamente ligados estáveis e radioativos.

FAPESP research plan – July 2014:

Tests of theoretical models through precise nuclear magnetic dipole measurements

J.R.B. Oliveira (responsible), N.H. Medina
Instituto de Física da USP – DFN

Abstract

The objective of this plan is to re-equip the existing gamma spectrometer system for the measurement of nuclear magnetic dipole moments (or g -factors) with high precision. The proposed experiments should allow for the tests of theoretical models which describe the nuclear structure in detail, such as the Large Scale Shell Model (LSSM) and the *ab initio* No Core Shell Model (NCSM), in a fundamental level. Specifically, the planned measurements are: g -factors of the excited states of ^{48}Ca and ^{32}S for the tests of the LSSM predictions about the properties of collective structures, and of the negative parity states with $I^\pi = \frac{5}{2}^-$ of ^{19}F and ^{19}Ne , both with 3 particles coupled to a ^{16}O core, for the tests of the NCSM predictions, including possible effects of the 3-body forces. In the experiments, two techniques will be applied: the Transient Magnetic Field, TMF, and the Recoil In Vacuum, RIV techniques, both adequate for states with lifetimes of the order of ps. The employment of two different techniques allows for consistency checks and control of systematic errors. For this work, two high resolution gamma-ray detectors with 60% relative efficiency are requested, complementing the present spectrometer system, and several charged particle detectors: plastic *phoswich* scintillators (ΔE -E) with silicon photo-multipliers (SiPM with 4×4 pixels) to form a high granularity and angular coverage radiation resistant system able to withstand very high count-rates. The system could also be used with the superconducting solenoid system RIBRAS for the production of radioactive beams. The equipment could be used in other experiments at the LAFN laboratory at mid and long term for, among others, studies of nuclear reaction mechanisms with weakly bound stable and radioactive nuclei.

Introdução

A evolução da capacidade de computação tem possibilitado aos físicos teóricos a realização de cálculos envolvendo muitos corpos cada vez mais complexos e mais precisos. Em vista disso, a comparação das previsões teóricas com os dados experimentais permite o teste da validade dos modelos utilizados em nível mais fundamental. Em contrapartida, é evidente que para isso os dados experimentais também devem ter precisão e acurácia suficientemente boas.

A comunidade internacional tem reconhecido a existência da “fronteira da precisão”, onde poderão ser obtidas importantes informações fundamentais, complementares às da “fronteira da energia” dos grandes aceleradores. Pequenos desvios de propriedades de sistemas físicos (sólidos, moleculares, atômicos, nucleares, etc.) com relação às previsões precisas do Modelo Padrão podem ser indicações indiretas de nova física. Em alguns casos pode haver sensibilidade à massa de alguma partícula hipotética superior à que seria alcançável diretamente nos maiores aceleradores que podem ser construídos. Outra fronteira atualmente reconhecida é a da “baixa energia”. Nesta fronteira, que de certa forma também é uma fronteira de precisão, são estudadas reações nucleares a energias muito inferiores à da barreira coulombiana. Em muitos casos, núcleos radioativos ou fracamente ligados estão envolvidos. Estas reações tem importância fundamental para a compreensão de processos astrofísicos e da própria cosmologia.

No âmbito da estrutura nuclear (e reações) a evolução da computação e das técnicas de cálculo tem permitido, por exemplo, a rápida evolução dos cálculos do modelo de camadas sem caroço (No Core Shell Model, NCSM) *ab initio*. Nestes cálculos procura-se obter as propriedades nucleares a partir das interações fundamentais entre núcleons. Estas interações são obtidas a partir de teorias de troca de mésons ou da QCD (cromodinâmica quântica), com parâmetros de acoplamento determinados a partir de sistemas de poucos corpos [Ba13]. Existem diversas abordagens de cálculo diferentes, envolvendo por exemplo teorias de campo efetivo (EFT). Os cálculos incorporam forças de dois (NN) ou três (NNN) corpos (que estão vinculadas a correções relativísticas [Ca98]), ou até mais. Neste contexto o poder preditivo das teorias é preservado possibilitando o teste de simetrias fundamentais. Por enquanto, os cálculos de NCSM estão limitados a núcleos relativamente leves (até massa $A \sim 20$, digamos). Para núcleos mais pesados é necessário o ajuste de um maior número de parâmetros empíricos, otimizados para cada região de massa, dentro do modelo de camadas de larga escala (LSSM), entre outros (vide o Apêndice 1). Apesar de ter menor poder preditivo, estes cálculos são capazes de obter descrições detalhadas de muitas propriedades nucleares, até mesmo de estados coletivos.

O presente projeto tem como objetivo a complementação do espectrômetro gama do LAFN de forma a possibilitar a realização de medidas de alta precisão de momentos dipolares magnéticos de estados nucleares excitados. Estas medidas são importantes para o teste de modelos teóricos como o LSSM entre outros. A primeira medida a ser realizada seria dos estados da banda rotacional do núcleo de ^{48}Cr pela técnica do campo magnético transiente (TMF). Situado no centro da região quadrangular da tabela de núclídeos delimitada pelos números mágicos 8 e 20, de prótons e de nêutrons, este núcleo é o que apresenta a maior deformação quadrupolar entre os núcleos da camada *sd*. Um dos maiores sucessos do LSSM consiste na adequada descrição do comportamento coletivo rotacional deste núcleo. Mais detalhes sobre esta medida encontram-se no Apêndice 1, referente a projeto de pesquisa complementar enviado recentemente ao CNPq (ainda em análise). Devido a particularidades deste tipo de medidas, é importante que sejam utilizados 4 detectores de GeHP, simetricamente posicionados, preferencialmente com características semelhantes (particularmente eficiência e dimensões geométricas), de forma a

compensar o efeito de erros sistemáticos (isto é conseguido por meio de razões de áreas entre os picos gama dos espectros dos diferentes detectores). Por esta razão estão sendo solicitados, no pedido presente, dois novos detectores de GeHP com características semelhantes a outros dois já existentes.

Além da utilização da técnica de TMF, o presente projeto objetiva implantar uma técnica correlata denominada técnica do recuo em vácuo (RIV) no LAFN. Para isto será importante a aquisição de novos detectores de partículas carregadas. Ambas as técnicas (TMF e RIV) utilizam-se de campos magnéticos atômicos hiperfinos extremamente intensos que provocam a precessão de Larmor do momento angular do estado nuclear. No entanto as calibrações destes campos são diferentes, e não são perfeitamente bem conhecidas, o que torna interessante a comparação de medidas realizadas pelas duas técnicas. Ambas são adequadas para estados de meia-vida curta (da ordem de ps) mas a técnica de RIV pode obter maior sensibilidade para meias vidas mais longas com momentos de dipolo magnéticos menores, uma vez que o tempo de ação do campo magnético não está limitado ao tempo de percurso através da camada de material ferromagnético da técnica de TMF. A técnica de RIV possibilita a utilização de um maior número de detectores de partículas, o que normalmente aumenta a precisão estatística das medidas.

A técnica de TMF

Esta técnica está descrita em uma seção específica do Apêndice 1, e por esta razão não será detalhada aqui. Entretanto cabe complementar a informação daquela seção explicitando-se a razão ρ de áreas dos picos entre os diversos detectores gama simetricamente colocados, da qual é inferido o ângulo $\Delta\theta$ de precessão da distribuição angular, diretamente ligado (Apêndice 1) ao fator giromagnético g :

$$\rho = \sqrt{\frac{N(+\theta) \uparrow N(-\theta) \downarrow}{N(+\theta) \downarrow N(-\theta) \uparrow}} = \frac{W(\theta - \Delta\theta)}{W(\theta + \Delta\theta)}$$

$$W(\theta \pm \Delta\theta) = W(\theta) \pm \frac{dW}{d\theta} \Delta\theta$$

$$\rho = \frac{W(\theta) - \frac{dW}{d\theta} \Delta\theta}{W(\theta) + \frac{dW}{d\theta} \Delta\theta}$$

$$S = \frac{1}{W} \frac{dW}{d\theta} \Big|_{\theta} \quad \varepsilon = \frac{1 - \rho}{1 + \rho}$$

$$\Delta\theta = \varepsilon/S$$

Nestas equações N representa o número de contagens detectadas no pico gama de interesse, θ é o ângulo polar de detecção com relação à direção do feixe, onde ocorre a máxima inclinação (logarítmica) S da distribuição angular $W(\theta)$ gama (normalmente simétrica para $\pm\theta$). A máxima inclinação proporciona a maior sensibilidade à rotação. As setas indicam a orientação do campo magnético externo (para cima $\uparrow$ ou para baixo $\downarrow$) presente durante a medida do respectivo N . Os detectores gama (vide Apêndice 1, figura 3) são dispostos simetricamente nos ângulos θ e $-\theta$

(dianteiros) e $\pi-\theta$, $-\pi+\theta$ (traseiros). Desta forma é possível verificar a consistência entre os resultados por comparação entre os resultados de detectores dianteiros e traseiros. É feita então uma média das duas razões ρ e ρ' , esta última relativa aos detectores traseiros [Ri93], aumentando-se a significância estatística do resultado. Com este procedimento é possível obter o cancelamento parcial de diversos erros sistemáticos, como por exemplo diferentes cargas integradas com campo para cima ou para baixo, o possível desvio angular da direção do feixe com relação à escala angular dos detectores, o desvio da orientação do campo magnético com relação ao plano de detecção etc.

A configuração ideal para este tipo de medidas, portanto, é a utilização de um sistema o mais simétrico possível, preferivelmente com 4 detectores, no mínimo. Como a sensibilidade do efeito está ligada à inclinação da distribuição angular, e normalmente há um reduzido número de posições angulares em que esta inclinação é máxima, basta um número comparável a este de detectores para se obter a maior parte do ganho em sensibilidade. Além disto não é necessária a medida em coincidência temporal entre raios gama. Assim sendo, a partir daí, em um sistema para medidas de fator g , o ganho em sensibilidade com acréscimo de detectores gama é muito reduzido, e um sistema de poucos detectores pode ser competitivo, mesmo em comparação com os grandes espectrômetros que existem no mundo.

A técnica de RIV

Nesta técnica o campo magnético que age sobre o estado nuclear de interesse é o campo hiperfino em vácuo gerado por elétrons atômicos de camadas s desemparelhados. As vacâncias são geradas por colisões atômicas do íon com o material do alvo. Neste caso não é utilizado um campo polarizador externo como na técnica de TMF, e ao invés de sofrer uma rotação coerente, a anisotropia da distribuição angular gama é simplesmente atenuada. Há variações desta técnica como, por exemplo, a utilização de um *plunger* para permitir a observação de modulações da distribuição angular em função do tempo de recuo entre o alvo e um anteparo, cuja distância regula o tempo de atuação do campo [Bi84]. Não é o que está sendo proposto neste projeto. Nesta proposta não será utilizado um anteparo, e o grau de atenuação total da distribuição angular, devido a rotações de orientação aleatória sofridas durante o tempo de vida do estado, é que será observado, e a partir disto, inferido módulo do fator g . Por esta técnica não é possível determinar o sinal deste fator. Isto em muitos casos não é necessário, pois é possível, com base em argumentos teóricos firmes, estabelecer ao menos o sinal do fator giromagnético. Quando há dúvidas é necessário fazer medidas complementares (por TMF, por exemplo) ainda que de menor precisão, para determinar o sinal.

A figura 1 ilustra como é feita uma medida com a técnica de RIV. No caso, trata-se da primeira medida realizada de momento de dipolo magnético de um núcleo radioativo [St05] por esta técnica, com o sistema CLARION+HYBALL no laboratório *Holifield Radioactive Ion Beam Facility* (HRIBF - Oak-Ridge, EUA). O sistema de detectores de partículas e o espectrômetro gama estão ilustrados nas figuras 2 e 3.

No presente projeto, pretende-se construir um sistema de detecção de partículas de alta granularidade, fazendo uso de cintiladores plásticos e fotomultiplicadoras (de 4×4 pixels) de Silício (SiPM – vide Apêndice 2). A vantagem do uso de cintiladores plásticos reside, além de seu baixo custo, na sua alta resistência a danos de radiação e às altas taxas de contagens suportadas. Estas características permitem sua utilização vantajosa com feixes estáveis, para os quais é possível alcançar altas taxas de contagens. Por outro lado, o sistema poderá ser usado também em ambientes com alto campo magnético, como é o

caso de sua utilização junto aos solenóides supercondutores do sistema RIBRAS (do LAFN) para produção de feixes radioativos.

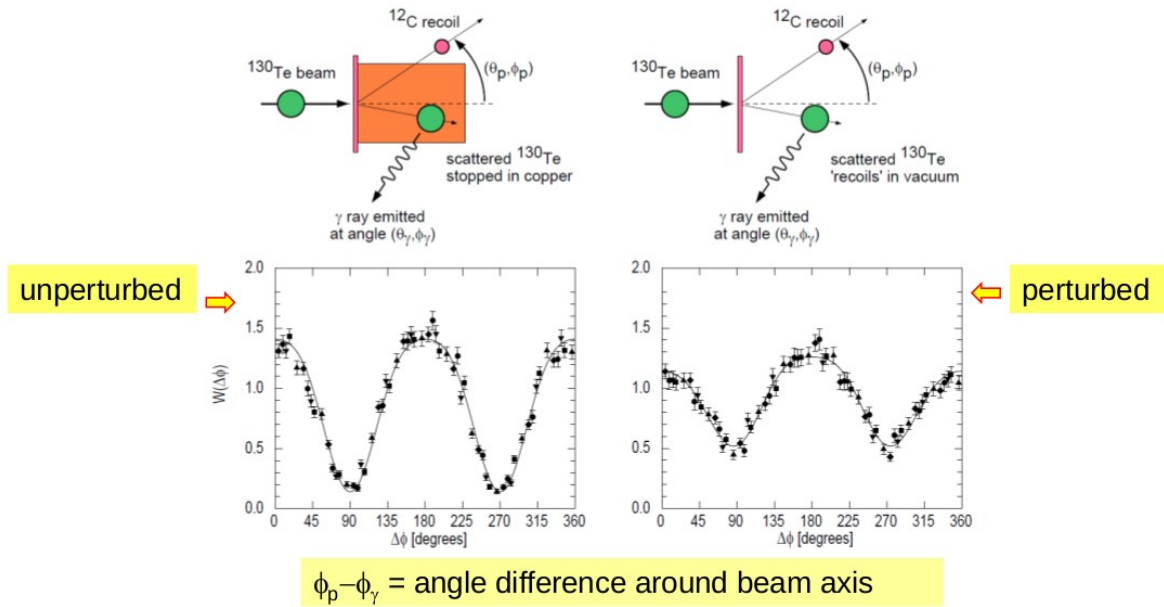


Figura 1: Exemplo de medida de fator-g por RIV. À esquerda, o feixe de ^{130}Te (estável, para calibração) incide em uma folha de ^{12}C e é implantado em um material magneticamente neutro (Cu), produzindo a correlação angular (gama- ^{12}C) não perturbada (abaixo). À direita, o mesmo processo sem o substrato de Cu, com a correlação sofrendo atenuação em vácuo. As correlações estão em função da diferença do ângulo azimutal entre o detector de partículas (do sistema HYBALL-Fig. 2) e o detector de gamas (do sistema CLARION- Fig. 3).

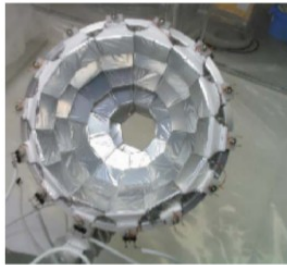


Figura 2: Sistema de detectores de partículas carregadas HYBALL (HRIBF)

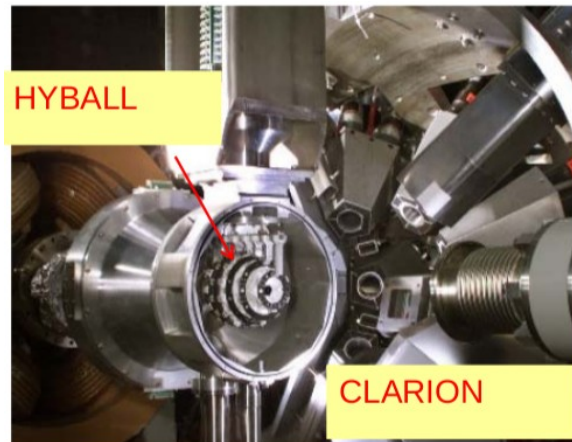


Figura 3 - Sistema HYBALL e espectrômetro CLARION (HRIBF)

Uma das dificuldades da técnica de RIV está associada à calibração do campo magnético hiperfino médio, e dos fatores correspondentes de atenuação total, em função de $g\tau$ (o produto do fator g pela vida média do estado) e do número atômico do íon envolvido. Uma das soluções adotadas consiste na

verificação das previsões teóricas para diversos isótopos do mesmo elemento que se pretende medir, e para os quais o fator g já é conhecido [St05]. Apesar destas dificuldades, a comparação (razão) entre valores de diferentes estados ou de estados semelhantes em isótopos vizinhos pode ser sensível a aspectos importantes da física dos modelos envolvidos, e costumam estar pouco sensíveis às de incertezas oriundas de calibrações.

Perspectivas de medidas de fator g no LAFN

- Testes do modelo de LSSM [Ca99,De04,Be07].
Conforme já mencionado, a primeira medida a ser realizada seria a do núcleo de ^{48}Ca pela técnica de TF, detalhada no Apêndice 1, e no Anexo 1 daquele apêndice, o qual apresenta a proposta aprovada pelo comitê de avaliação de projetos do LAFN. Em seguida pretende-se medir o núcleo de ^{32}S (também citado no Apêndice 1). Além destas medidas, pela técnica de TF, seria interessante repeti-las com a outra técnica, de RIV. A repetição de medidas por técnicas diferentes é importante para a confiabilidade dos resultados, que podem ser afetados de erros sistemáticos insuspeitos inerentes a cada técnica.
- Calibrações. Uma das fases inerentes a estas medidas é a de calibrações, que procuram estabelecer com a maior confiabilidade possível as parametrizações envolvidas nos modelos para o cálculo do campo hiperfino atômico e seu efeito sobre a distribuição angular de raios gama. Os testes que serão realizados contribuirão de forma indireta, não somente para as medidas realizadas no LAFN, mas para medidas de fator g pelas mesmas técnicas que são realizadas em diversos laboratórios em todo o mundo.
- Teste do modelo de NCSM – Diversas oportunidades de medida serão abertas para regiões de massa mais baixa que estarão ao alcance do NCSM *ab initio*, particularmente com a evolução do alcance deste modelo para o interior da camada sd que podemos antecipar para os próximos anos. A primeira que propomos seria a medida do momento de dipolo magnético do estado excitado de paridade negativa $I^\pi = \frac{5^-}{2}$ do ^{19}F . Devido à importância desta medida, serão dadas informações mais detalhadas a seu respeito na seção seguinte.

Medida do momento de dipolo magnético do estado de paridade negativa $I^\pi = \frac{5^-}{2}$ do ^{19}F

Os parâmetros da força de 3 corpos podem ser investigados experimentalmente a partir do ^3He e do ^3H . O núcleo de ^{19}F é o primeiro núcleo estável da camada sd . Sua estrutura consiste basicamente do acoplamento de 1 próton e dois nêutrons (portanto três núcleons) a um caroço de ^{16}O . Esta condição pode ser importante para a verificação do cálculo das componentes de 3 corpos (NNN) da força nuclear. Sabe-se que o cálculo da estrutura deste núcleo já está presentemente ao alcance do NCSM *ab initio*. O momento de dipolo magnético do estado fundamental ($1/2^+$), e o do estado isomérico ($5/2^+$), com meia vida de 89 ns à energia de excitação de 197 keV, já foram medidos com excelente precisão (este último por duas técnicas, uma delas RIV). Estes estados tem paridade positiva. O estado

$I^\pi = \frac{5^-}{2}$ a 1346 keV de energia de excitação, com de $t_{1/2} = 2,9$ ps, é o primeiro estado excitado de paridade negativa. A estrutura dos estados de paridade negativa no ^{19}F pode ser interpretada através do acoplamento de um buraco de prótons (da subcamada $p_{1/2}$) aos estados do ^{20}Ne (portanto, com excitação

do caroço de ^{16}O). Assim sendo, as medidas experimentais das propriedades do estado $I^\pi = \frac{5}{2}^-$ constituirão um poderoso teste dos cálculos teóricos, pois deverão apresentar sensibilidade a aspectos muito diversos daqueles dos estados de paridade positiva. O momento de dipolo magnético deste estado também já foi medido (por RIV [Bi84], com detectores de gama de NaI(Tl) - cintiladores), mas com uma incerteza de cerca de 16%: $|\mu| = 0.67(11) \mu_N$. As correções devidas a correntes mesônicas no meio nuclear, nessa região de massa, são de cerca de 10 a 20% [Ko77], com relação aos valores de Schmidt (considerando fatores giromagnéticos de núcleons livres), portanto a incerteza da medida é comparável à própria magnitude da possível correção. Torna-se evidente, portanto, a necessidade de medidas mais precisas para que seja possível investigar adequadamente os detalhes do cálculo teórico. Além disto esta é a única medida disponível na literatura, e convém realizar uma confirmação experimental independente.

Para realizar esta medida propomos excitar o estado de paridade negativa através da colisão do feixe de ^{19}F , fornecido com energias de cerca de 25 MeV pelo Acelerador Pelletron do LAFN, com alvo fino de ^{12}C . Poderão ser feitos dois experimentos, um por TMF e outro por RIV. O recuo do íon de ^{12}C espalhado seria detectado em anéis dianteiros de cintiladores plásticos com SiPM, em geometria semelhante à do HYBALL (Fig. 2), em coincidência com 4 detectores de GeHP (de 60% de eficiência relativa). Para a medida por RIV, o alvo de ^{12}C seria auto-suportável, e seriam detectados também íons de ^{19}F espalhados, enquanto que na de TMF o alvo utilizado teria ainda mais duas camadas, uma de Fe e outra de Cu. Neste caso os íons de ^{19}F seriam implantados nesta última camada magneticamente neutra, e somente os íons de ^{12}C seriam detectados. A camada ferromagnética seria, é claro, polarizada por um campo externo como nas demais medidas de TMF.

A alta granularidade do anel de detectores de partículas, associada ao posicionamento dos detectores de raios gama nos pontos de máxima inclinação da correlação angular, permitirão boa sensibilidade da medida. Além disso a boa cobertura angular dos detectores de partícula permitirá a aquisição de dados com alta significância estatística. Desta maneira espera-se melhorar a precisão da medida por cerca de uma ordem de magnitude.

Outro núcleo de interesse neste contexto seria o ^{19}Ne , também com 3 partículas além de camada fechada (desta vez dois prótons e um nêutron). Este núcleo apresenta também um estado de paridade negativa de $I^\pi = \frac{5}{2}^-$, mas seu momento de dipolo magnético nunca foi medido. Uma vez que este estado (com energia de excitação de 1508 keV) apresenta uma meia vida de 0,97 ps, seriam aplicáveis as técnicas de RIV e TMF. Este estado poderia ser populado em uma reação de fusão evaporação, por exemplo $^{12}\text{C}(^{10}\text{B}, p2n)$.

Outras possibilidades de utilização do equipamento solicitado

Os detectores de raios gama e de partículas carregadas, para cuja aquisição está sendo proposto este plano, serão utilizados também em outros experimentos, e serão incorporados a médio e longo prazo em outros projetos a serem desenvolvidos no LAFN.

O Apêndice 2 apresenta outro projeto recentemente submetido ao CNPq (Universal 2014). Naquele projeto são solicitados detectores de partículas para implementação da fase 1 (de testes) de um projeto maior denominado Nossa Caixa. Os detectores de gama e de partícula presentemente solicitados serão

incorporados a este projeto, cujo tema principal é a medida de mecanismos de reação com núcleos fracamente ligados. Além deste, outros temas poderão ser investigados como medidas complementares com relação ao espalhamento tipo arco-íris nuclear [O113], como a medida de $^{10}\text{B}+^{27}\text{Al}$ recentemente realizada do LAFN. O sistema substituirá o atual espectrômetro Saci-Perere em medidas de espectroscopia tradicional. O sistema Nossa Caixa, quando finalizado, continuará permitindo (com vantagens) a realização de medidas de fator g por RIV, em sua configuração normal, e, com adaptação de uma fonte de campo magnético externo, de medidas por TMF.

Os equipamentos, com pequenas adaptações, serão utilizados também em medidas com feixes radioativos (como na proposta de experimento apresentada no Apêndice 3). Para isto será necessário construir uma blindagem contra nêutrons (uma parede com galões de água borada), de forma a proteger os detectores de GeHP de possíveis danos de radiação devidos à alta taxa de nêutrons rápidos produzidos no alvo primário do sistema RIBRAS.

A longo prazo planeja-se a construção de um alvo ativo semelhante ao sistema Maya (GANIL, França). Os detectores de partículas carregadas (cintiladores plásticos com SiPM) serão utilizados então para formar a parede traseira do detector sistema, destinada a detectar as partículas espalhadas cujo alcance seja superior à extensão longitudinal do volume gasoso do alvo-detector.

Com a mudança da estação do espectrômetro da sala experimental do acelerador Pelletron para a do pós-acelerador LINAC será possível utilizar também o sistema para medidas de decaimento radioativo (decaimento beta) de alta precisão, que requerem longos períodos de tomada de dados.

Orçamento

Material permanente:

- Detectores de GeHP de 60% de eficiência ORTEC e 2,0 keV de resolução a 1.3 MeV - (2 unidades a US\$ 58.260,00 cada): US\$ 116.520,00.

Material de consumo:

- Fotomultiplicadoras de Silício Sensl SiPM, 4×4 pixels (21 unidades): US\$ 8.658,00
- Cintilador plástico de filme fino Eljen Technology ($25 \mu\text{m} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$): US\$ 403,00
- Componentes eletrônicos em geral (células solares, amplificadores operacionais, resistores, capacitores etc.): R\$ 5.000,00
- Material para usinagem de peças (tarugos de Inox, perfis de Alumínio, placas, tubos, parafusos etc.): R\$ 7.000,00
- Tubos com isolamento a vácuo para sistema de alimentação de nitrogênio líquido: R\$2.000,00
- Válvulas solenóide para controle de sistema de alimentação de nitrogênio líquido: R\$1.000,00

Serviços de terceiros

- Projetos de eletrônica (pré amplificadores para as SiPM, sistema de multiplexação de pulsos etc.) R\$ 8.000,00.
- Reparação do botijão de nitrogênio líquido (200 l) para alimentação dos detectores de GeHP: R\$ 1.000,00.

Total geral (incluindo material importado com câmbio de R\$2,23/US\$): **R\$ 304.046,00.**

Justificativa

Como discutido nas seções anteriores, para medidas de fator g (principalmente por TMF) é importante a utilização de uma configuração com 4 detectores semelhantes. O atual espectrômetro (Saci-Perere [Al03]) conta com 2 detectores de GeHP de 60% e dois de 20% de eficiência (relativa a um NaI(Tl) de $3' \times 3'$), todos com supressores Compton. Um destes detectores (de 20%) encontra-se com problemas técnicos. Neste projeto, objetivamos a incorporação de mais dois detectores de 60% de eficiência com o objetivo de formar um sistema simétrico de 4 detectores de 60%. Por enquanto, não estão sendo solicitados supressores Compton para estes detectores (cujo preço é comparável ao dos próprios detectores), uma vez que estes são importantes somente para medidas de coincidência entre dois raios gama, ou de multiplicidade mais alta, onde o fundo Compton cresce em proporção geométrica. As medidas de fator g envolvem coincidência de somente um raio gama com (uma ou mais) partículas carregadas. Os supressores Compton, no entanto, melhorariam a qualidade dos dados, deste e de outros tipos de experimento, e serão solicitados em outros projetos posteriormente.

As fotomultiplicadoras de Silício, SiPM, são dispositivos eletrônicos de relativamente baixo custo, que comporão os detectores de partículas carregadas nos sistemas que serão desenvolvidos. Foram incluídas como material de consumo no Orçamento. Os cintiladores plásticos serão utilizados na fabricação dos detectores, complementando a quantidade já disponível no Laboratório. As células solares também constituem bons detectores de íons pesados e serão utilizadas em situações complementares quando for adequada sua utilização (*e. g.* sob taxas de contagens menos elevadas).

Para manter os detectores de GeHP abastecidos com nitrogênio líquido será necessário aperfeiçoar e ampliar o sistema atualmente existente. Para isto são solicitados tubos de transferência (isolados a vácuo), e válvulas. Será necessária manutenção no botijão de nitrogênio líquido de 200 l que apresenta perda de isolamento térmico na flange superior.

Para construção da câmara de espalhamento, suportes dos detectores etc. está sendo solicitada uma quantidade razoável de recursos de material de consumo. Será feita a transferência do espectrômetro, de sua estação atual, para a sala experimental do acelerador LINAC (por enquanto sem re-aceleração do feixe) onde poderá ser mantido independentemente de ocorrência de outros experimentos no acelerador Pelletron, além de possibilitar a utilização de feixe pulsado nos experimentos. Alguma verba está sendo solicitada para contratação de serviços de projetos mecânicos e de eletrônica que serão necessários. Outras necessidades do projeto poderão ser supridas pela reserva técnica.

Outros apoios

Foram feitos outros dois pedidos (de projeto Universal CNPq 2014) que estão ligados ao presente projeto, e estão apresentados nos Apêndices 1 e 2. O projeto do Apêndice 1 é diretamente ligado à medida de fator- g pela técnica de TMF para investigação de previsões do modelo de LSSM, e é complementar ao presente projeto. O projeto do Apêndice 2, embora não esteja ligado a medidas de fator- g , visa a aquisição de detectores de partículas do mesmo tipo dos que estão sendo presentemente solicitados. Os detectores dos dois projetos, se aprovados, poderão ser utilizados conjuntamente, permitindo maior cobertura angular e portanto maior significância estatística das medidas.

No projeto do Apêndice 1 estão sendo solicitados equipamentos referentes ao sistema de vácuo e peças

de reposição do acelerador, além de R\$15.000,00 em material de consumo, sendo, no total, solicitados R\$ 114.150,00 (incluindo despesas acessórias de importação) .

No projeto do Apêndice 2 estão sendo solicitadas 21 unidades de SiPM, acessórios, fontes de tensão e material de consumo e serviços no valor total de aproximadamente R\$ 60.000,00 (incluindo despesas acessórias de importação).

Além destes projetos, está sendo elaborado um projeto de criação de um INCT de Física Nuclear, liderado pelo P.R.S. Gomes (UFF). No orçamento deste projeto estão sendo incluídos itens de infraestrutura do LAFN, e para alguns equipamentos periféricos. Caso aprovado, portanto, ocorrerão diversas melhorias que contribuirão para o bom andamento do presente projeto.

Importância para o LAFN

Atualmente no LAFN tem sido realizadas medidas em quatro principais áreas de investigação (correspondentes a canalizações da sala experimental do Acelerador Pelletron - vide, por exemplo <http://portal.if.usp.br/fnc/node/388>):

- Pesquisa com feixes radioativos (RIBRAS) - canalização 45B
- Espectroscopia gama (Saci-Perere) - canalização 30A
- Espectrógrafo Magnético Enge (*Split-pole*) - canalização 15A
- Estudo de danos de radiação em dispositivos eletrônicos – canalização 30 B e mais recentemente, canalização 0 graus.

O equipamento solicitado neste projeto terá direta repercussão fundamental nas duas primeiras áreas, em curto e médio prazo, e possivelmente na terceira a longo prazo. A repercussão sobre a área de Espectroscopia gama é evidente, pois ampliará muito as possibilidades de experimentos e a qualidade e precisão dos resultados que serão obtidos. Os detectores de partícula (cintiladores plásticos com SiPM) serão utilizados, a curto prazo, em experimentos com feixes radioativos, constituindo sistemas de alta cobertura angular e granularidade. Com a construção de uma blindagem adequada (contra nêutrons), será possível realizar experimentos de espectroscopia gama com feixes radioativos, em associação com os detectores de partículas, unificando as duas áreas. A mais longo prazo, estão sendo cogitadas medidas de raios gama em coincidência com partículas analisadas no espectrógrafo. Para isto será necessário construir um sistema de detectores para o plano focal do espectrógrafo.

Em conclusão, os equipamentos solicitados não serão úteis somente para o projeto de medidas de fator g explicitamente propostas, mas constituirão parte importante dos recursos experimentais do Laboratório a curto, médio, e longo prazo.

Cronograma

1. (1º ao 2º mês) Detalhamento do projeto de construção da câmara de espalhamento e do sistema de detectores de partículas carregadas e suportes dos detectores de raios gama.
2. (2º ao 4º mês) Compra e usinagem do material para construção do sistema.
3. (4º ao 5º mês) Montagem do sistema.
4. (5º ao 6º mês) Testes de funcionamento do sistema
5. (7º ao 8º mês) Testes de calibração do campo transiente e do campo hiperfino em vácuo.
6. (8º ao 9º mês) Medida do fator g do núcleo de ^{48}Cr .

7. (9º ao 12º mês) Análise de dados e publicação dos resultados.
8. (11º ao 12º mês) Medida do fator g do núcleo de ^{32}S .
9. (12º ao 15º mês) Análise de dados e publicação dos resultados.
10. (12º ao 15º mês) Incorporação de maior número de detectores cintiladores ao sistema.
11. (15º ao 16º mês) Medida do fator g do núcleo de ^{19}F .
12. (16º ao 19º mês) Análise de dados e publicação dos resultados.
13. (19º ao 20º mês) Medida do fator g do núcleo de ^{19}Ne .
14. (20º ao 24º mês) Análise de dados e publicação dos resultados.

Considerações finais

Medidas de fator g já foram realizadas no Laboratório (vide Apêndice 1), pela técnica de TMF. No entanto a presente proposta apresenta novos desafios, como a utilização de um sistema de múltiplos detectores de partículas carregadas e do uso da técnica de RIV, objetivando alcançar os melhores níveis de precisão possíveis. O desenvolvimento dos próprios detectores, da eletrônica associada e das técnicas de análise não é uma operação trivial e exigirá elevado empenho dos participantes da equipe. A calibração dos campos hiperfinos também não é uma tarefa trivial. No entanto tem, também nesse aspecto, havido grandes progressos com a utilização de cálculos de *ab initio* de física atômica, que tornaram-se possíveis com a capacidade de computação atual [St05]. A fabricação dos alvos, de camadas duplas ou triplas, também é um desafio tecnológico em muitos casos. Felizmente contamos com um bom laboratório de alvos no LAFN. O aprendizado adquirido pode ser aplicado em experimentos em outros laboratórios através de colaborações internacionais, como, p. ex. com o Prof. Andrew Stuchbery da Australian National University, que possui um sistema de medidas semelhante, e esteve em visita ao Brasil em 2013.

As medidas de momentos dipolares magnéticos de estados nucleares são complementares às medidas tradicionais de espectroscopia, mas podem ter repercussão importante nas formulações dos modelos teóricos por sondarem aspectos distintos. Há portanto perspectivas de descobertas importantes para a evolução dos modelos teóricos.

Atualmente temos na equipe dois professores diretamente ligados ao projeto, um pós-doutor, um aluno de doutorado, um de mestrado e cinco alunos de iniciação científica. Outros grupos participam da colaboração, com mais alunos de pós-graduação. Para levar a efeito o projeto serão necessários mais alunos de pós-graduação diretamente ligados ao projeto, caso aprovado. Antecipa-se a realização de até 4 teses de doutorado diretamente ligadas ao projeto, e número semelhante de mestrados dependendo do número de alunos que for possível incorporar. Um número comparável de trabalhos científicos deverá ser publicado. Esta é uma perspectiva ambiciosa mas, pelo seu dimensionamento, é viável, tendo em vista as condições tradicionais vigentes na Universidade.

Referências

- [Al03] J.A. Alcántara-Núñez, J.R.B. Oliveira *et al.*, Nucl. Inst. Meth. A 497, (2003) 429.
- [Ba13] B. R. Barrett, P. Navrátil, J. P. Vary, Progress in Particle and Nuclear Physics 69 (2013) 131.
- [Be07] Bentley, M. A., Lenzi, S. M., Progress in Particle and Nuclear Physics 59 (2007) 497.
- [Bi84] J.P. Billowes *et al.* J.Phys. G 9 (1984) 293.
- [Ca99] E. Caurier *et al.*, Phys. Rev. C 59, 2033 (1999).
- [Ca98] J. Carlson and R. Schiavilla, Rev. Mod. Phys. 70 (1998) 743.
- [De04] D.J. Dean *et al.*, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 53 (2004) 419.
- [De07] C.E. Demonchy *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 583, 341 (2007).
- [Ko77] G. Konopka, M. Gari, J.G. Zabolitzky, Nuclear Physics A290 (1977) 360 .
- [Ol13] J.R.B. Oliveira *et al.*, J. Phys. G 40, 105101 (2013).
- [Ri93] R.V. Ribas Nucl. Inst. Meth. A328 (1993) 553.
- [St05] N.J. Stone *et al.*, Phys. Rev. Lett. 94, 192501 (2005).

Apêndice 1:

Plano de pesquisa CNPq (Edital Universal 2014)

“Investigação da estrutura nuclear através de medidas de fatores giromagnéticos nucleares pela técnica do campo magnético transiente”

N.H. Medina, J.R.B. Oliveira
IFUSP-DFN

Investigação da estrutura nuclear através de medidas de fatores giromagnéticos nucleares pela técnica do campo magnético transiente

N.H. Medina, J.R.B. Oliveira
IFUSP-DFN

Introdução

O fator giromagnético (ou simplesmente fator-g) é a constante adimensional que relaciona o momento de dipolo magnético $\vec{\mu}$ de um sistema com seu momento angular $\vec{J}$. No caso nuclear:

$$\vec{\mu} = g \frac{\mu_N}{\hbar} \vec{J}$$

onde a constante $\mu_N = \frac{e \hbar}{2 m_p} = 5.05078324(13) \times 10^{-27}$ J/T é o magneton nuclear (sendo e a carga e m_p a massa do próton).

A importância do fator-g para a investigação da estrutura nuclear reside no fato de que seu valor depende fortemente da configuração do estado nuclear, sendo a grandeza observável mais sensível à função de onda do estado.

Os modelos teóricos que existem atualmente tem sido, com a evolução da capacidade tecnológica computacional, capazes de produzir descrições muito detalhadas e precisas das propriedades nucleares. Entre estes modelos podemos citar os modelos de camadas tipo *Ab-initio* [1] (em geral para núcleos leves), o modelo de camadas de larga escala LSSM [2-4] (tipicamente para núcleos de massa intermediária), e o modelo de camadas de Monte-Carlo MCSM [5] (desde núcleos leves até pesados). Estes modelos são capazes de descrever com precisão, em muitos casos, propriedades eletromagnéticas nucleares como energias e vidas médias das transições gama, momentos de quadrupolo elétrico e fatores giromagnéticos intrínsecos dos estados. As medidas experimentais destas quantidades são fundamentais para a verificação dos modelos, e para ajustes de parâmetros referentes, por exemplo, às interações efetivas entre núcleons no meio nuclear. Entre estas medidas, as medidas de fator-g estão entre as mais difíceis de serem realizadas, particularmente as dos estados de meia-vida curta (ps ou menos) de núcleos fora da linha de estabilidade. Por esta razão, estas medidas ainda são escassas na literatura. O presente projeto visa contribuir para a realização deste tipo de medidas fazendo uso da técnica do campo magnético transiente (CMT, ou TMF, em inglês). Medidas de núcleos estáveis através desta técnica já foram realizadas no nosso laboratório no passado [6,7]. O presente projeto objetiva recuperar e aperfeiçoar o sistema existente de forma a adequá-lo a medidas de interesse atual do ponto de vista da investigação da estrutura nuclear.

Um dos principais núcleos de interesse a ser investigado será o ^{48}Cr . Este núcleo, situado no centro da região delimitada pelos números mágicos 20 e 28 (de prótons e nêutrons), é considerado o melhor exemplo de um núcleo com comportamento rotacional adequadamente descrito pelo modelo de camadas LSSM [8-10], particularmente quanto às probabilidades de transição gama reduzidas da banda rotacional. No entanto, os momentos dipolares magnéticos intrínsecos dos estados excitados deste núcleo nunca foram medidos. Em colaboração com pesquisadores da UNAL (Colômbia), foi realizada uma proposta de experimento (Anexo 1) ao Comitê de Avaliação de Projetos (CAP) do LAFN. Esta

proposta foi aprovada na reunião de 18 de outubro de 2013, tendo sido alocados 6 dias de uso do Acelerador de Partículas Pelletron do IFUSP para realização do experimento (vide <http://portal.if.usp.br/fnc/node/388>).

O método de medidas proposto está baseado na utilização da técnica do CMT [6,7], na qual o núcleo de interesse recua em alta velocidade no interior de um material ferromagnético polarizado. Durante o tempo de recuo, as colisões atômicas com os núcleos do material ferromagnético geram vacâncias em camadas eletrônicas internas do íon a ser investigado. Os elétrons de orbitais de $l=0$ (elétron s) geram fortíssimos campos magnéticos (da ordem de 10^3 Tesla) sobre o núcleo atômico. A interação destes campos com o momento de dipolo magnético do estado nuclear provoca a precessão de Larmor (Fig. 1) do momento angular, e portanto, da distribuição angular do decaimento gama originado deste estado. Detectores gama de alta resolução dispostos em direções criteriosamente selecionadas são utilizados para inferir a magnitude da precessão ocorrida e, através disso, o fator- g .

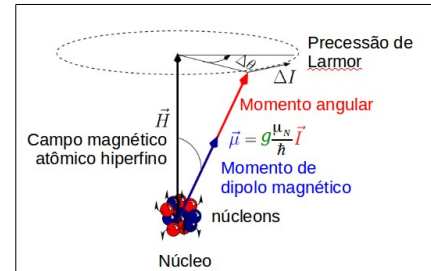


Figura 1: Precessão de Larmor do momento de dipolo magnético de um estado nuclear

Entre os objetivos da presente proposta estão portanto:

- A recuperação e aperfeiçoamento do sistema de medidas de fatores giromagnéticos nucleares do LAFN, e sua adequação para medidas em linha de núcleos radioativos.
- Desenvolvimento da técnica de medidas com utilização do campo magnético transiente (CMT) e reações de fusão-evaporação e de transferência de partículas alfa.
- Investigação detalhada da estrutura dos estados do núcleo de ^{48}Cr e teste da descrição deste núcleo pelo modelo LSSM.
- Investigação de outros núcleos de interesse, como o ^{32}S , através de reações de transferência de partículas alfa e CMT.

A técnica de medidas de fator g pelo CMT

A figura 2 ilustra os princípios da medida pela técnica do CMT para o caso do ^{48}Cr . A reação do feixe de ^{24}Mg a 70 MeV (produzido no Acelerador Pelletron do IFUSP) em alvo de ^{27}Al produz o núcleo composto ^{51}Mn altamente excitado, com momento angular total J orientado perpendicularmente à direção do feixe ($m_J \sim 0$). Após a evaporação praticamente instantânea (em intervalo de tempo $t < 10^{-16}$ s) de 1 próton e 2 nêutrons, é produzido o núcleo residual de ^{48}Cr em estados excitados de alto momento angular. O núcleo residual, em alta velocidade de translação, atravessa uma camada de material ferromagnético (Fe) polarizado vindo a ser implantado em um material de campo magnético residual desprezível (camada de Cu). Durante a travessia do material ferromagnético, em tempos da ordem de 1 ps, o núcleo de ^{48}Cr precessa sob efeito do intenso

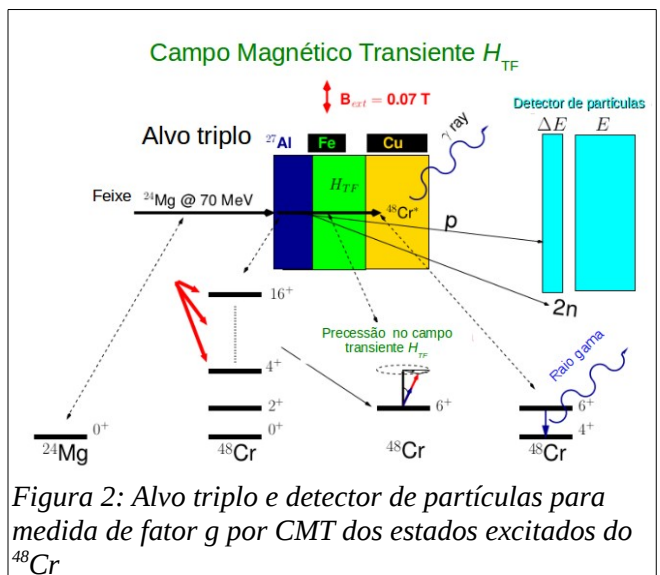


Figura 2: Alvo triplo e detector de partículas para medida de fator g por CMT dos estados excitados do ^{48}Cr

campo magnético transiente (H_{TF}), modificando a orientação do momento angular inicial. A rotação de precessão do momento angular nuclear é inferida pela rotação da distribuição angular dos raios gama emitidos quando da des-excitação dos estados nucleares, em coincidência com a detecção de um próton no detector de partículas carregadas. A figura 3 ilustra estes conceitos. Apesar do tempo de trânsito através da camada ferromagnética ser muito curto, o campo magnético transiente é um dos mais intensos campos magnéticos conhecidos, sendo da ordem de 1000 Tesla, resultando em ângulos de precessão $\Delta\theta$ mensuráveis. Este campo transiente é originado pelos elétrons desemparelhados das camadas atômicas mais internas. As vacâncias eletrônicas são geradas dinamicamente por colisões atômicas durante o tempo de recuo do núcleo residual em seu processo de freamento no material ferromagnético. O campo magnético externo favorece a polarização dos spins dos elétrons na direção do campo e em sentido oposto, fazendo com que a precessão de Larmor ocorra preferencialmente nesta mesma direção. O sentido da rotação é determinado pelo sinal do fator g , enquanto a magnitude deste é diretamente proporcional ao ângulo de rotação $\Delta\theta$. Como os ângulos de rotação médios são muito pequenos, podendo ser da ordem de alguns mili-radianos, é necessário fazer medidas muito precisas e acuradas. Para isto os detectores gama são dispostos em posições próximas aos pontos de máximo da derivada angular da distribuição. Além disso, para minimizar erros sistemáticos, são feitas razões especiais entre as taxas de detecção dos raios gama dos detectores em posições simétricas e com diferentes sentidos do campo magnético externo. Para inverter o sentido do campo magnético é utilizada uma fonte inversora de corrente eletronicamente controlada, que se comunica com o sistema de aquisição de dados.

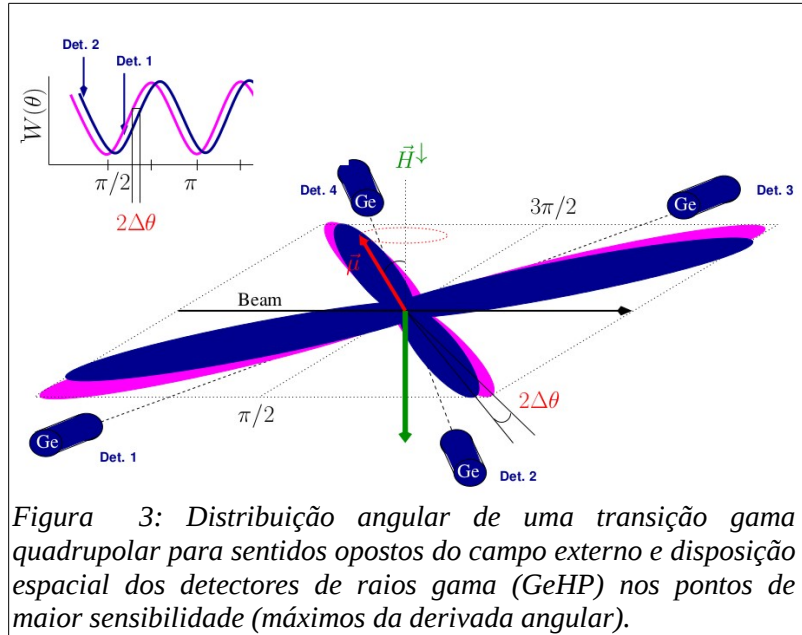


Figura 3: Distribuição angular de uma transição gama quadrupolar para sentidos opostos do campo externo e disposição espacial dos detectores de raios gama (GeHP) nos pontos de maior sensibilidade (máximos da derivada angular).

O fator g dos estados excitados do ^{48}Cr

A descrição da estrutura do núcleo deformado ^{48}Cr constitui um dos maiores sucessos do modelo de camadas de larga escala (LSSM). Tanto as energias dos estados como as probabilidades de emissão gama reduzidas experimentais são reproduzidas com excelente precisão pelos cálculos teóricos que incluem todos os orbitais das camadas $f_{7/2} p_{1/2}$ sobre um caroço inerte de ^{40}Ca . Os fatores g dos estados, no entanto, nunca foram medidos. Os resultados das medidas permitirão testar o caráter de bom rotor (o limite rotacional é $g \approx \frac{Z}{A} = 0,5$) manifesta nos estados do ^{48}Cr até $I^\pi = 10^+$, verificar a mudança de configuração do cruzamento de bandas que ocorre acima deste valor de momento angular, e explorar a natureza dos estados da banda de paridade não natural para a qual ainda não existem previsões teóricas de fator g . Mais detalhes sobre o interesse e preparação do experimento, bem como referências estão disponíveis na proposta aprovada pelo CAP do LAFN (Anexo 1).

Reações de transferência de partícula α

Um outro mecanismo de reação de produção de núcleos radioativos que tem sido utilizado recentemente em medidas de fator g é o de transferências de partículas alfa [11,12]. Com o desenvolvimento do nosso sistema de medidas, podemos aplicar este procedimento para medir estados do núcleo de ^{32}S (reação inversa, com feixe de ^{28}Si em alvo de ^{12}C) e aprimorar essa técnica para possibilitar a medida de núcleos radioativos como o ^{62}Zn e de regiões de massas mais altas em outros laboratórios, bem como no IFUSP quando da disponibilização do pós-acelerador supercondutor LINAC.

Considerações finais

O desenvolvimento do sistema de medidas de fator g, conforme proposto, permitirá reativar as medidas com utilização da técnica de CMT no Laboratório, ampliando significativamente as possibilidades de investigação da estrutura nuclear no IFUSP. Com este equipamento será possível testar sistematicamente e contribuir para o aperfeiçoamento de modelos teóricos como o LSSM entre outros, e com isso compreender o mecanismo de formação de estados nucleares coletivos a partir das contribuições das diversas configurações microscópicas dos estados, entre outros aspectos. O aperfeiçoamento da técnica poderá permitir o desenvolvimento de novas possibilidades de medidas que podem ser feitas tanto no LAFN como em outros laboratórios em todo o mundo, inclusive com a utilização de feixes radioativos como os que serão produzidos por exemplo no FAIR (*Facility for Antiproton and Ion Research*) no GSI, Alemanha. O desenvolvimento do projeto envolverá estudantes de graduação e pós-graduação, contribuindo de forma substancial para sua formação com alto nível de excelência.

Referências:

- [1] Bruce R. Barrett, Petr Navrátil , James P. Vary , *Progress in Particle and Nuclear Physics* 69 (2013) 131 .
- [2] E. Caurier, G. Martínez-Pinedo, F. Nowacki, A. Poves, J. Retamosa, and A. P. Zuker, *Phys. Rev. C* 59, 2033 (1999).
- [3] D.J. Deana, T. Engelandb, M. Hjorth-Jensenb, M.P. Kartamyshev, E. Osnesb, *Progress in Particle and Nuclear Physics* 53 (2004) 419 .
- [4] Bentley, M. A., Lenzi, S. M., *Progress in Particle and Nuclear Physics* 59 (2007) 497.
- [5] S.E. Koonin, D.J. Dean and K. Langanke , <http://arXiv.org/abs/nucl-th/9602006v1>
- [6] N.H. Medina, “Razão giromagnética de estados excitados de $^{107,108}\text{Ag}$ ”, Dissertação de Mestrado, IFUSP (1988).
- [7] N.H. Medina, “Momentos magnéticos de estados nucleares do ^{159}Tb ”, Tese de Doutorado, IFUSP (1992).
- [8] A. Poves, *Nuclear Physics A*, 731, 339 (2004).
- [9] F. Brandolini *et al.*, *Nuclear Physics A*, 642, 387 (1998).
- [10] C.A. Ur, *European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei*, 20, 113 (2003).
- [11] D. A. Torres *et al.*, *Phys. Rev. C* 84, 044327 (2011).
- [12] G. J. Kumbartzki *et al.*, *Phys. Rev. C* 89, 064305 (2014)

Anexo 1 do Apêndice 1

Proposta aprovada pelo CAP de utilização do Acelerador Pelletron do LAFN

“Exploring the $f_{7/2}p_{1/2}$ shell Using the Magnetic Moments of the Radioactive ^{48}Cr Nucleus”

D. A. Torres, F. Cristancho, S. Veloza, F. Moreno, W. Rodriguez, and E. Fajardo
Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

J.R.B. Oliveira and N.H. Medina, R.V. Ribas, V. Zaggatto
Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Exploring the $f_{7/2}p_{1/2}$ shell Using the Magnetic Moments of the Radioactive $^{48}_{24}\text{Cr}$ Nucleus

D. A. Torres,^{*} F. Cristancho, S. Veloza, F. Moreno, W. Rodriguez, and E. Fajardo[†]

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

J.R.B. Oliveira[‡] and N.H. Medina, R.V. Ribas, V. Zaggatto

Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Abstract

In this proposal the study of the magnetic moments of the excited states of the radioactive $^{48}_{24}\text{Cr}$ nucleus ($Z = N$), $T_{1/2} = 21.56$ h, using the Transient Field technique and the fusion-evaporation reaction $^{24}\text{Mg} + ^{27}\text{Al}$ at a beam energy of 70 MeV, with the Pelletron accelerator at São Paulo University is presented. The results could confirm the nucleus ^{48}Cr as one of the best examples of a perfect quantum rotor.

^{*}Spokesperson; Electronic address: datorresg@unal.edu.co

[†]Also at: Centro Internacional de Física, Bogotá, Colombia.

[‡]Contact person at USP

Introduction and Justification

The systematic experimental and theoretical study of the $f_{7/2}p_{1/2}$ shell has given us a deep understanding of the evolution of the microscopic behavior of nuclei from collective to single particle. By $f_{7/2}$ -shell one denotes those nuclei with proton numbers between the magic numbers 20 and 28; the extremes of the shell is characterized by single-particle effects, but moving to the middle of the region large collective effects are dominant. The study of $N = Z$ nuclei allows the calibration of nuclear models to include effects such as proton-neutron pairing, and to predict the behavior of heavier $N = Z$ nuclei [8].

The ^{48}Cr isotope, with its position right at the middle of the $f_{7/2}$ shell, and its four valence protons and four valence neutrons, is considered one of the best examples of a good rotor [6]. Low spin states have been theoretically investigated using several approaches such as large scale shell model calculations [7] with realistic interactions, as for example the GXPF1 [9], molecular models using the $^{40}\text{Ca} + \alpha + \alpha$ configuration [4], the interacting boson model with isospin (IBM-3) [1], and the Cranked Nilsson-Strutinsky model [5].

Model-independent magnetic moment measurements provide one of the most outstanding tools to discriminate between nuclear models. For the case of the $N = Z$ ^{48}Cr nucleus, while an extensive experimental work has been performed to obtain $B(E2)$'s, there is a lack of experimental information on g factors. In the single- j shell model a value of $g = \frac{g_{j\pi} + g_{j\nu}}{2} = 0.55$ in the $f_{7/2}$ -shell is expected [10]. Large-Scale Shell-Model calculations, using the GXPF1 and the FPD6 interactions, have been performed putting special attention to predict $B(E2)$'s and g factors, these results are summarized in Fig. 1. The predicted g factors are all consistent with the collective $g = Z/A = 0.5$ for ^{48}Cr , i.e., an average value of $\langle g \rangle \sim 0.5$ over the states of the yrast band can be expected, thus, producing a complete confirmation of the collective behavior of the nucleus.

Experimental details

The so-called Transient Field (TF) technique, for the measuring of nuclear Magnetic Moments, will be utilized in conjunction with a fusion-evaporation reaction to populate the yrast states of ^{48}Cr . The TF technique allows to measure magnetic moments of states with lifetimes of the order of picoseconds or less, making use of the spin-orbit interaction

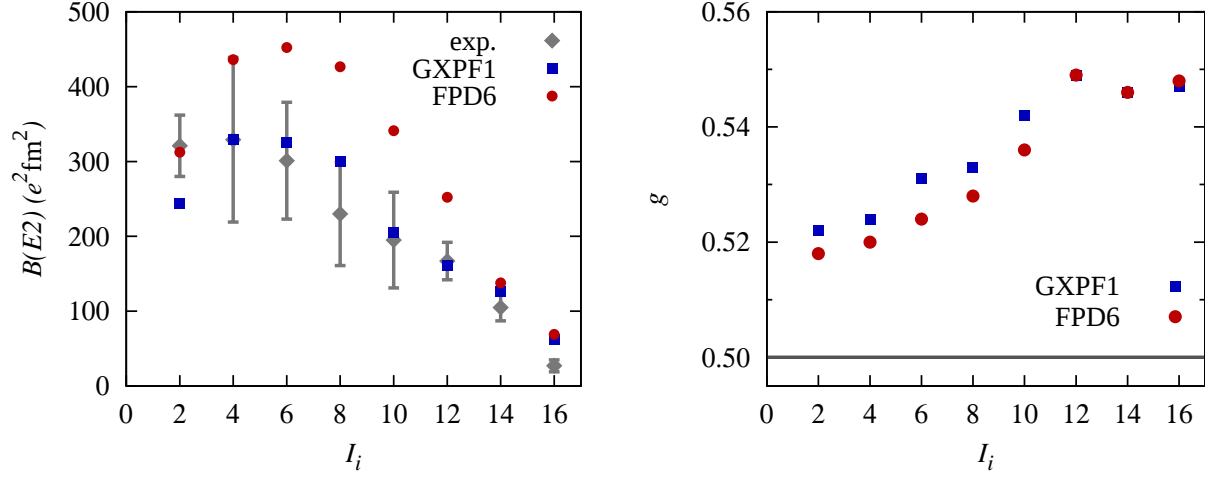


Figure 1: Left: $B(E2; \downarrow)$ for the yrast states of ^{48}Cr , the experimental values were taken from Ref. [3]. Right: predicted g factors for the yrast states of ^{48}Cr using Large-Scale Shell-Model calculations for two realistic interactions, the GXPF1 and the FDP6 from Ref. [11]. No experimental g -factor values has been measured to date.

produced by fast moving ions in ferromagnetic environments [2]. The fusion-evaporation reaction $^{24}\text{Mg} + ^{27}\text{Al}$ will be utilized at a beam energy of 70 MeV, the use of a symmetric system ensure a large recoil velocity for the ions, as requested for the TF technique. The accelerator Pelletron in conjunction with the g -factor Sao Paulo setup will be used. Pace calculations predict the $p2n$ (^{48}Cr) evaporation channel as one of the strongest channels with a cross section of 105.8 mb. The strongest channel, $^{48}_{23}\text{V}$, has a 4^+ isomeric state of 16 days. The daughter nucleus, ^{48}V has no coincident γ -ray lines with ^{48}Cr . A total of 6 days + 1 day of preparation is required.

-
- [1] Falih H. Al-Khudair and Long Gui-Lu. Isospin and f -spin symmetry structure in low-lying levels of 48,50 cr isotopes. *Chinese Physics*, 13(8):1230, 2004.
 - [2] N Benczer-Koller and G J Kumbartzki. Magnetic moments of short-lived excited nuclear states: measurements and challenges. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 34(9):R321, 2007.
 - [3] F. Brandolini, S.M. Lenzi, D.R. Napoli, R.V. Ribas, H. Somacal, C.A. Ur, D. Bazzacco, J.A.

- Cameron, G. de Angelis, M. De Poli, C. Fahlander, A. Gadea, S. Lunardi, G. Martiñez-Pinedo, N.H. Medina, C. Rossi Alvarez, J. Sanchez-Solano, and C.E. Svensson. Precise DSAM lifetime measurements in ^{48}Cr and ^{50}Cr as a test of large scale shell model calculations. *Nuclear Physics A*, 642(3-4):387–406, 1998.
- [4] P. Descouvemont. Microscopic study of alpha clustering in ^{12}C , ^{24}Mg and ^{48}Cr . *Nuclear Physics A*, 709(1-4):275–286, 2002.
- [5] Andrius Juodagalvis, Ingemar Ragnarsson, and Sven Åberg. Cranked nilsson-strutinsky vs the spherical shell model: A comparative study of pf -shell nuclei. *Phys. Rev. C*, 73:044327, Apr 2006.
- [6] Alfredo Poves. Deformation and superdeformation: The shell model way. *Nuclear Physics A*, 731(0):339 – 346, 2004.
- [7] Y Tsunoda, T Otsuka, N Shimizu, M Honma, and Y Utsuno. Study of nuclei around $z = 28$ by large-scale shell model calculations. *Journal of Physics: Conference Series*, 445(1):012028, 2013.
- [8] C.A. Ur. The $N = Z$ $f_{7/2}$ -shell nuclei: Experimental highlights. *The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei*, 20(1):113–118, 2003.
- [9] J.P. Vary, O.V. Atramentov, B.R. Barrett, M. Hasan, A.C. Hayes, R. Lloyd, A.I. Mazur, P. Navratil, A.G. Negoita, A. Nogga, W.E. Ormand, S. Popescu, B. Shehadeh, A.M. Shirokov, J.R. Spence, I. Stetcu, S. Stoica, T.A. Weber, and S.A. Zaytsev. Ab initio no-core shell model –recent results and future prospects. *The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei*, 25(1):475–480, 2005.
- [10] S. Yeager, S. J. Q. Robinson, L. Zamick, and Y. Y. Sharon. Isoscalar g -factors of odd-odd $n = z$ nuclei. *EPL (Europhysics Letters)*, 88(5):52001, 2009.
- [11] L. Zamick. personal communication, <http://xxx.lanl.gov/pdf/1307.5735.pdf>.

Apêndice 2:

Plano de pesquisa CNPq (Edital Universal 2014)

“Desenvolvimento de um sistema de detecção de íons pesados em coincidência cinemática e de raios gama para estudo de mecanismos de reação”

Prof. Dr. J.R.B. Oliveira

IFUSP-DFN

Plano de pesquisa

Desenvolvimento de um sistema de detecção de íons pesados em coincidência cinemática e de raios gama para estudo de mecanismos de reação

Prof. Dr. J.R.B. Oliveira

IFUSP-DFN

Resumo

Planeja-se o desenvolvimento de um sistema multi-detector para estudo detalhado de mecanismos de reação com íons pesados. Este sistema terá alta granularidade para detecção de coincidências cinemáticas a altas taxas de contagens, permitindo a medida de processos raros e em coincidência com raios gama. Para esta finalidade serão utilizados cintiladores plásticos acoplados a fotomultiplicadoras de Silício (SiPM) normalmente utilizadas em tomógrafos PET, insensíveis a campos magnéticos. Com este sistema será estudada a reação de $^{28}\text{Si}+^9\text{Be}$, a energias próximas da barreira, objetivando o teste de modelos teóricos de mecanismos de reação com núcleos fracamente ligados. O equipamento será incorporado a um projeto maior denominado Nossa Caixa que estenderá a cobertura angular do sistema de detecção de partículas carregadas e 4π .

Introdução

Diversos laboratórios em todo o mundo, inclusive o LAFN-IFUSP, têm investido consideravelmente no estudo da estrutura nuclear e dos mecanismos de reação com utilização de feixes radioativos. Isto se deve ao fato de que grande parte da tabela de nuclídeos, em regiões afastadas do vale de estabilidade, ainda foi pouco explorada experimentalmente. Devido às dificuldades ou impossibilidades de se alcançar estas regiões com técnicas tradicionais, a criação de novos instrumentos e metodologias se faz necessária. Em vista disto, conclui-se que a física nuclear de baixa energia se manterá em intensa atividade na próxima década, e constituirá um campo de pesquisa do qual podemos esperar grandes avanços tecnológicos e descobertas científicas.

Por outro lado, muitas das técnicas que foram desenvolvidas para o estudo de núcleos situados no vale de estabilidade e vizinhanças continuarão a ser utilizadas, eventualmente com algumas adaptações ou modificações e aperfeiçoamentos, particularmente em função do aparecimento de novas tecnologias e instrumentos. Além disso, mesmo reações nucleares com feixes e alvos estáveis ainda são pouco compreendidas teoricamente. Reações com núcleos fracamente ligados, por exemplo, envolvem acoplamentos com estados do *continuum*, e tem repercussão sobre a física dos processos de perda de coerência quântica [1]. Estas reações envolvem grande número de processos, tais como quebra seguida ou não de fusão de parte dos fragmentos, que são difíceis de caracterizar tanto experimentalmente quanto teoricamente (vide, por exemplo, [2] e diversas referências internas). Muitas destas reações estão envolvidas em processos astrofísicos como a nucleossíntese primordial e a nucleossíntese explosiva em supernovas.

No LAFN, podemos contribuir para o entendimento dos mecanismos de reação, mesmo com feixes estáveis, se dispusermos de sistemas periféricos que permitam a obtenção de informações precisas e detalhadas dos vários processos envolvidos. Um dos objetivos principais do presente projeto é o de desenvolver um sistema com estas características. Como se verá adiante, a técnica de coincidência cinemática permitirá resolver ambiguidades nas informações experimentais, de forma prática, juntamente com a detecção de raios gama. A anisotropia da radiação gama permitirá, além disso, trazer informações sobre o alinhamento de momento angular dos estados formados na reação, um aspecto raramente investigado na literatura. O sistema deverá, em seu desenvolvimento ulterior, produzir altas taxas de contagens de eventos em coincidência cinemática com partículas carregadas, o que é particularmente importante para viabilizar também as medidas de coincidência com raios gama, cuja eficiência de detecção é normalmente baixa.

Uma das características que distingue os sistemas de detecção apropriados para uso com feixes estáveis, em comparação com feixes radioativos, é a elevada taxa de contagens que pode ser obtida. Isto contribui para o aumento da estatística, proporcionando alto grau de precisão, e permitindo a observação de processos mais raros. Isto porque atualmente a intensidade dos

feixes radioativos que é possível produzir é muitas ordens de grandeza inferior em comparação com a dos feixes estáveis. Isto não permanecerá assim no futuro, com a entrada em operação de aceleradores como o FAIR. Assim sendo, as técnicas que envolvem altas taxas de contagens serão no futuro também importantes para a pesquisa com feixes radioativos. É interessante portanto, desde já desenvolver equipamentos e técnicas com vistas a estas aplicações.

A seguir serão apresentados os objetivos principais do projeto, e em seguida alguns tópicos de interesse relativos à física envolvida nos experimentos propostos. Aspectos relativos à técnica de medidas e aos desenvolvimentos tecnológicos esperados serão apresentados. Informações adicionais serão apresentadas no Anexo 1, onde está reproduzido o projeto submetido ao CAP (Comitê de Avaliação de Projetos) do LAFN, aprovado em 18 de outubro de 2013 [3], tendo sido concedidos 6 dias de uso do acelerador para realização dos experimentos em 2014.

Objetivos principais

- Investigação detalhada da reação inversa de $^{28}\text{Si}+^9\text{Be}$, a energias próximas da barreira, contribuindo para o esclarecimento dos processos que envolvem a quebra do ^9Be , e para o teste dos modelos teóricos envolvidos.
- Desenvolvimento do sistema de detecção de íons pesados, em coincidência cinemática, com cintiladores plásticos e fotomultiplicadoras de Si, que pode ser utilizado também com o Solenóide Supercondutor RIBRAS (LAFN-IFUSP) para produção de feixes radioativos.
- Realizar testes para o embasamento de um sistema mais abrangente e completo, que possibilitará o estudo de coincidências gama-partícula de processos mais raros e com feixes radioativos tanto no LAFN como em outros laboratórios.

Núcleos fracamente ligados

Reações com núcleos fracamente ligados (que apresentam energias de separação de alguns MeV ou menores) estáveis e instáveis, são ainda pouco compreendidas teoricamente. Durante uma colisão nuclear, estes núcleos quebram-se facilmente, devido aos acoplamentos com o continuum. Diversos mecanismos de reação costumam estar envolvidos, com absorção (ou não)

de parte (transferências ou fusão incompleta) ou da totalidade (fusão completa) dos fragmentos de quebra. Há dificuldades tanto teóricas como experimentais, na definição e identificação dos próprios processos envolvidos [2]. O entendimento destas reações é importante, não somente do ponto de vista do desenvolvimento da teoria referente aos mecanismos de reação nuclear, como também pela importância destas reações para a compreensão dos processos astrofísicos de nucleossíntese, e portanto também para compreensão da própria evolução estelar e da cosmologia.

No LAFN a técnica de coincidências gama-partícula está sendo utilizada para medidas da reação do núcleo feixe fracamente ligado ^7Li em alvo de ^{120}Sn . O trabalho encontra-se em andamento (em fase de análise final de dados e cálculos teóricos) e constitui o tema de doutorado de V.A.B. Zagatto (FAPESP) sob minha orientação. A identificação das transições gama em coincidência com partículas carregadas permite inferir informações importantes sobre os mecanismos de reação nuclear envolvidos. Os cálculos teóricos estão sendo realizados em colaboração com J. Lubian, da UFF, e envolvem a utilização do potencial de São Paulo no modelo óptico (tanto na parte real como imaginária [4]) bem como acoplamentos aos canais inelásticos e de transferências, e com o *continuum* (CDCC – *continuum discretized coupled channels*). Apesar de permitir identificar o núcleo residual, as medidas de raios gama em coincidência com partículas carregadas ainda deixam margem para ambiguidades em alguns casos, com relação ao mecanismo de produção envolvido. Isto ocorre quando mais de uma massa isotópica da partícula transferida ou espalhada permite popular o mesmo núcleo residual, por exemplo, na transferência direta de um próton, ou fusão incompleta de um trítio seguido da evaporação de 2 nêutrons. Nestes casos a identificação da massa da partícula espalhada torna-se importante. Isto pode ser feito com utilização de um sistema de tempo de voo, ou da técnica de coincidência cinemática, que é a opção a ser explorada no presente projeto.

Processos de espalhamento de ângulos grandes acima da barreira

Quando ocorre uma sobreposição significativa das distribuições de massa de dois núcleos pesados, durante uma colisão, os processos dissipativos como fusão completa e incompleta tornam-se predominantes. No entanto, processos mais raros podem ainda estar ocorrendo,

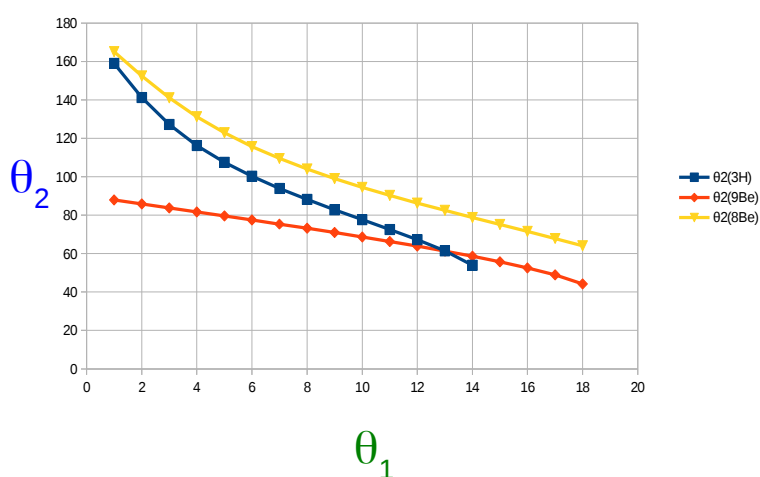
inclusive o espalhamento elástico. A região de ângulos acima do ângulo de *grazing* costuma apresentar seções de choque fortemente decrescentes em função do ângulo de espalhamento, trazendo com isso grandes dificuldades de observação dessa região. No entanto esta é uma região que pode trazer informações fundamentais sobre o processo de espalhamento, por exemplo, com relação à ocorrência de arco-íris nuclear [5]. Devido à sobreposição elevada das massas, efeitos como bloqueio de Pauli podem tornar-se importantes, alterando significativamente o potencial imaginário [6], bem como o real. Será importante para o desenvolvimento da teoria de reações nucleares a investigação destes processos raros que podem ser observados em ângulos de espalhamento grandes. O presente projeto pode trazer interessantes contribuições também neste contexto.

O Método de Coincidência Cinemática

Neste método, o ângulo polar (θ) com relação ao feixe das partículas do canal de saída da reação são medidos simultaneamente, permitindo, pela correlação cinemática, a identificação de suas massas. A figura 1, por exemplo, ilustra o ângulo de espalhamento do recuo (θ_2) em função do ângulo de espalhamento da partícula leve (θ_1) para 3 casos específicos (vide legenda) na reação de $^{28}\text{Si}+^9\text{Be}$. Observa-se que com, uma típica resolução angular de alguns graus, é possível distinguir os diferentes canais de saída da reação na

maior parte do intervalo cinemático. O projeto objetiva fazer uso destas características para a investigação detalhada dos processos nucleares em geral. O Anexo 2 apresenta um projeto de Iniciação Científica com ideias preliminares da geometria do sistema nas fases inicial e final.

Figura 1 -Coincidência cinemática das partículas do canal de



saída da reação $^{28}\text{Si}+^9\text{Be}$. Ângulos de espalhamento do recuo θ_2 em função do ângulo de espalhamento da partícula leve θ_1 . Curva vermelha: espalhamento elástico. Curva amarela: transferência de $1n$ (ângulo do centro de massa das partículas alfa da quebra do ^9Be). Curva azul: fusão incompleta (fusão do fragmento ^6Li)

Coincidências gama-partícula

O método das coincidências gama partícula foi implantado no LAFN [4] e vem sendo utilizado em pesquisas sobre os mecanismos de reação nuclear. A razão de intensidades entre detectores gama dispostos em diferentes ângulos permite o teste da anisotropia prevista pelos modelos teóricos, relacionada ao alinhamento do momento angular dos estados gerados pela reação nuclear. Este aspecto ainda é pouco explorado na literatura científica. O projeto será ideal para investigações nesta linha de pesquisa.

Aspectos tecnológicos do projeto

Os dispositivos SiPM são originalmente projetados para utilização em tomógrafos gama por emissão de aniquilação de pósitrons (PET). Neste tipo de aplicação, os raios gama de aniquilação (511 keV) são detectados em coincidência, permitindo determinar a linha de emissão. A alta granularidade do sistema proporcionada pelos detectores pixelados permite obter elevada resolução espacial da imagem (por reconstrução) da amostra. O elevado número de detectores necessário em um tomógrafo típico exige procedimentos de multiplexação dos pulsos de forma a manter o custo da eletrônica associada aceitável. No presente projeto, problemas semelhantes relativos à técnica de multiplexação necessitarão ser enfrentados. Há várias alternativas, como uso de divisões de carga resistivas (DCP – *discretized positioning system*) [8], ou leitura de linha e coluna sem ou (melhor) com acionamento pelo sinal (*Signal Driven Multiplexing*, com uso de pares de diodos Schottky para isolar o ruído dos detectores que não foram acionados), ou ainda SCR (*Scrambled Crosswire Readout*) [9], com uso de canais de limiar para identificar quais dos pixels foi acionado, juntamente com 1 canal de conversão de energia e tempo para cada SiPM. Será necessário testar diversas alternativas para buscar a mais adequada às aplicações do projeto. Há potencial para criação de novos métodos de leitura que podem ter repercussão em outras aplicações. Para auxiliar nos projetos de eletrônica está sendo solicitada uma bolsa de apoio técnico de nível superior.

Versões alternativas de uso do equipamento

Os detectores cintiladores com SiPM do presente projeto serão utilizados não somente na fase-1 do projeto Nossa Caixa (Anexo 1), mas em outras aplicações que estão sendo desenvolvidas

no Laboratório: Para espalhamento elástico (Prof. V. Cuimarões- IFUSP) em medidas com feixes radioativos, e em experimentos para medidas de momento de dipolo magnético de estados nucleares para investigação da estrutura nuclear (Prof. N.H. Medina - IFUSP). As fotomultiplicadoras convencionais do sistema ancilar (Saci) do espectrômetro gama do LAFN podem ser substituídas pelos novos SiPM, desta maneira possibilitando o uso deste sistema em ambientes de alto campo magnético, como nas vizinhanças do Solenóide Supercondutor RIBRAS, e portanto com feixes radioativos. Em futuro próximo os equipamentos serão incorporados ao sistema Nossa Caixa, e em prazo mais longo, como parte de um alvo gasoso ativo, semelhante ao sistema MAIA (Ganil) [10], também para uso com feixes radioativos.

Considerações Finais

Com este projeto será possível a dotação do Laboratório Aberto (LAFN) de um sistema de detecção único no mundo possibilitando a realização de experimentos importantes para a compreensão dos mecanismos de reação com íons pesados. Parte dos recursos serão solicitados a outras agências de fomento como a FAPESP. Os equipamentos poderão ser utilizados em várias modalidades de experimentos, com feixes estáveis e radioativos. Alunos desde IC até Doutorado estarão envolvidos contribuindo para a formação de pessoal altamente qualificado.

Orçamento

No LAFN já estão disponíveis o material para confecção dos cintiladores plásticos e detectores de raios gama de alta resolução de Germânio Hiperpuro. A técnica de confecção dos detectores é dominada, haja vista seu uso no espectrômetro Saci-Perere na canalização 30A do Acelerador Pelletron. No momento não estão sendo solicitados módulos de eletrônica pois a quantidade que é disponível no Laboratório (número de ADC's por exemplo) é suficiente para esta fase inicial. A tabela abaixo apresenta os equipamentos cujo financiamento está sendo solicitado para aquisição dos SiPM's e de diversos acessórios necessários para o projeto incluindo sistema de vácuo com nova câmara. Será utilizada a oficina do Laboratório para usinagem de peças.

Item	Marca/modelo	preço unit	no. unids	US \$	R\$
1- SiPM	Sensl/ArrayB-30035-16P-PCB	\$408.00	21	\$8,568.00	R\$ 19.706,40
2-Eval. Board	ArraySM4-EVB-PixOut	\$953.00	1	\$953.00	R\$ 2.191,90
3- Pre-amp	ArraySM4-EVB-PreAmp	\$715.00	1	\$715.00	R\$ 1.644,50
4-Socket	20 pin Through Hole PGA connector /socket	\$5.00	25	\$125.00	R\$ 287,50
5- Fonte de alimentação	Agilent/E3634A (50V 4A)	R\$ 3.746,00	1	n/a	R\$ 3.746,00
6-Passador	Lesker/IFDGG501056B- 50 pin feedthrough	\$960.00	1	\$960.00	R\$ 2.208,00
7- Conectores	Lesker/accessories FTAK5012PP kapton cable/connectors	\$1,135.00	1	\$1,135.00	R\$ 2.610,50
8-Bastidor NIM	Ortec/High current NIM Bin 4001C +powerSupply	\$2,990.00	1	\$2,990.00	R\$ 6.877,00
Material de consumo	Componentes Eletrônicos, Tubos e placas de aço inoxidável, mangueiras para N2I, válvulas, parafusos, o-rings etc.	R\$ 7.000,00	n/a	n/a	R\$ 7.000,00
Serviços	Projetos eletrônica, reparo de equipamentos	R\$ 7.000,00	n/a	n/a	R\$ 7.000,00
				Total \$	Total R\$
				\$15,446.00	R\$ 53.271,80
					Desp. Import.
					R\$ 6.394,64
				Tot. Geral	R\$ 59.666,44

O total geral solicitado é de R\$59.666,44, incluindo material importado e nacional, despesas decorrentes de importação (18%), material de consumo e serviços.

Cronograma

1o semestre: Aquisição dos equipamentos e detalhamento dos projetos de montagem do sistema

2o semestre: Usinagem de peças e montagem geral do sistema

3o semestre: Testes de funcionamento da eletrônica e do sistema de vácuo

4o semestre: Medidas da reação de $^{28}\text{Si}+^9\text{Be}$. Testes de preparação para o sistema Nossa Caixa e projeto do sistema completo.

5o semestre: Análise de dados e redação de artigos científicos. Incorporação de equipamentos de outros projetos (pedidos FAPESP) levando ao projeto final Nossa Caixa

6o Semestre: Testes e experimentos iniciais do sistema Nossa Caixa.

Participantes

J.R.B. Oliveira, N.H. Medina, V. Guimarães (Professores Associados do IFUSP)

J.A. Alcantara-Núñez (Pós-Doutor)

V.A.B. Zagatto (Aluno de Doutorado)

C. Dantas (Aluno de Mestrado)

Matheus Prado, Ivan Almeida e Felipe Montibeller Silva (alunos de Iniciação Científica)

Referências

- [1] I. J. Thompson and A. Diaz-Torres, Progress of Theoretical Physics Supplement No. 154, 69 (2004).
- [2] P.R.S. Gomes, *et al.* PHYSICAL REVIEW C 73, 064606 (2006)
- [3] Proposta de experimento – CAP - LAFN 2013 - <http://web.if.usp.br/ifusp/files/E-109.pdf>
- [4] V.A.B. Zagatto, J.R.B. Oliveira *et al.*, Nucl. Inst. Meth. 749, 19 (2014).
- [5] J.R.B. Oliveira *et al.*, J. Phys. G 40, 105101 (2013).
- [6] D. Pereira, J. Lubian, J.R.B. Oliveira, D.P. de Sousa, L.C. Chamon, Phys. Lett. B 670, 330 (2009).
- [7] D. Pereira *et al.*, Phys. Lett. B 710, 426 (2012).
- [8] S. Siegel , “Simple charge division readouts for imaging scintillator arrays using a multi-channel PMT”,ivan IEEE NSS and MIC Conf. Rec. (1995), vol. 1, pp 13
- [9] Matrix 9 User Manual, www.sensl.com .
- [10] <http://pro.ganil-spiral2.eu/laboratory/detectors/actar-tpc/maya>

Anexo 1 do Apêndice 2

Proposta de Experimento

N° E-109

Período :

Título: *Nossa caixa - Teste de um novo sistema de medidas de coincidência cinemática e raios gama e medida da reação inversa $^{28}\text{Si}+^9\text{Be}$*

Responsável: J.R.B. Oliveira, J.A. Alcantara-Núñez
e-mail: zero@if.usp.br, prof_juan@hotmail.com

Participantes:

J.R.B. Oliveira, L. Gasques, V. A. B. Zagatto, A. S. Freitas, C. Dantas, P.R.P. Allegro, L.C. Chamon, E.W. Cybulska, N.H. Medina, R.V. Ribas, E.S. Rossi Jr, W.A. Seale, V. Guimarães, J.A. Alcántara-Núñez, D.L. Toufen, M.A.G. Silveira, G.S. Zahn, F. A. Genezini, J.M.B. Shorto, R. Linares, J. Lubian, G.P.A. Nobre, Indu Bala.

Porta Voz: J.A. Alcántara-Núñez
e-mail: prof_juan@hotmail.com

Número de dias solicitados: 6
Datas preferidas: a partir de agosto/2014
Datas realmente impossíveis:
Canalização: 30A

Feixe	Est. Carga	$I_{\text{mínima}}$ (alvo)	V_{min}	V_{max}	Pulsado?
^{28}Si	4,5,6	2nA	5,5	6,5	

Alvos: ^9Be

Pastilhas: ^{28}Si

Características de Feixe Pulsado:

Continuação da Experiência já Aprovada N°:

Outras informações:

Nossa Caixa - Teste de um novo sistema de medidas de coincidência cinemática e raios gama e medida da reação inversa $^{28}\text{Si} + ^9\text{Be}$

J.R.B. Oliveira, J.A. Alcántara-Núñez, L. Gasques, V. Zagatto, A. S. Freitas, C. Dantas, P.R.P. Allegro, L.C. Chamon, E.W. Cybulska, N.H. Medina, V.A.P. Aguiar, R.V. Ribas, E.S. Rossi Jr, W.A. Seale, V. Guimarães, Indu Bala

Instituto de Física da USP, São Paulo, SP, Brazil

D.L. Toufen

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Guarulhos, SP, Brazil

M.A.G. Silveira

Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brazil

G.S. Zahn, F. A. Genezini, J.M.B. Shorto

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, SP, Brazil

R. Linares, J. Lubian

Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brazil

G.P.A. Nobre

Lawrence Livermore National Laboratory, CA, USA

Resumo

Pretende-se desenvolver um novo sistema para medidas de coincidência gama-partícula utilizando fotomultiplicadoras de Si (SiPM) com cintiladores plásticos (*phoswich*) e uma geometria de alta granularidade e cobertura angular, possibilitando a medida simultânea dos diversos produtos de reação em coincidência cinemática. O sistema será utilizado inicialmente para a medida da reação inversa de $^{28}\text{Si} + ^9\text{Be}$ ao redor da barreira (30 - 45 MeV), interessante para a investigação da quebra do alvo fracamente ligado com ou sem a transferência de um nêutron, bem como de diversos outros processos.

1. Introdução

A técnica de medidas de coincidências gama-partícula foi recentemente implantada no LAFN [1,2], através de uma adaptação de colimadores ao sistema Saci [3] de detecção de partículas carregadas. Diversos experimentos foram realizados e outras propostas estão sendo enviadas ao CAP com descrições detalhadas desta técnica e que não serão repetidas aqui. Cabe ressaltar apenas um aspecto da técnica que ainda talvez não tenha sido suficientemente enfatizado, que se refere às informações a respeito do alinhamento de momento angular dos estados excitados na reação que podem ser obtidas da correlação angular das partículas carregadas com os raios gama. Através de razões de intensidade, entre as diversas combinações de detectores de partícula e raios gama, também é possível testar os modelos teóricos utilizados para a descrição do mecanismo de reação. A utilização de um sistema de partículas de alta granularidade, como o que está sendo projetado, possibilitará medidas precisas destas correlações angulares. Pretende-se projetar um sistema de detectores versátil, para ser utilizado não somente neste tipo de experimento, mas também em diversos outros com outras configurações, como será descrito nas próximas seções. A escolha da reação de $^{28}\text{Si} + ^9\text{Be}$ como primeira experiência a ser realizada também será discutida.

2. Descrição geral do sistema de detectores

A geometria escolhida para o sistema de detectores tem a forma de uma caixa aproximadamente cúbica de cerca de 20cm de lado. Os cintiladores serão dispostos na superfície interna da caixa e o alvo será localizado próximo a uma das faces. A forma quadrada das faces é apropriada para a disposição das SiPM (que consistem de um quadrado de ~ 16 mm de lado com 16 *pixels* quadrados de 3 mm de lado). Os detectores gama de GeHP, com (ou eventualmente sem) supressão Compton, serão dispostos o mais próximo possível dos lados da caixa, a 90 graus com a direção do feixe, e alguns destes detectores poderão ser dispostos em ângulos traseiros.

Com esta geometria, será possível realizar medidas de coincidência cinemática da reação inversa, cobrindo-se praticamente todo o intervalo cinemático possível, sendo as partículas semelhantes ao feixe (Si) detectadas principalmente na face dianteira, e as semelhantes ao alvo, nas laterais. No caso da quebra em partículas alfa pode ser necessário detectar também partículas na face traseira da caixa. A assimetria da posição do alvo deve-se à anisotropia da taxa de contagens que será predominante em ângulos dianteiros, sendo necessário afastar os detectores nesta direção. O uso da reação inversa facilitará a detecção das partículas mais pesadas, que desta forma terão maior energia. A coincidência cinemática entre os diversos produtos da reação permitirá eliminar ambiguidades na identificação das partículas, por exemplo, dispensando a utilização de sistemas de tempo de voo para seleção de massa.

Os detectores plásticos tipo phoswich serão utilizados por sua alta resistência a radiação e alta velocidade de resposta temporal. Serão utilizados detectores ΔE mais finos (0,05 mm) em comparação com o sistema Saci existente, para permitir a identificação do Z das partículas mais pesadas. O uso de telescópios é importante para separar o fundo de partículas leves provenientes de reações de fusão-evaporação.

Outras reações inversas poderão ser medidas futuramente com este sistema, como com feixes de Ti ou V, ou ainda mais pesados com uso do LINAC.

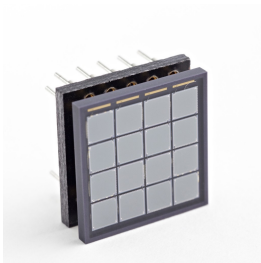
O uso de fotomultiplicadoras de Si, insensíveis à presença de campo magnético, permitirá a utilização do sistema mesmo nas proximidades do solenóide supercondutor RIBRAS para produção de feixes radioativos, em outros experimentos, além de serem muito mais compactos que fotomultiplicadoras usuais.

3. Fase 1 do sistema

Inicialmente pretende-se testar uma versão simplificada do sistema com menor número de detectores. Estes seriam dispostos somente ao longo de um plano, no interior da caixa. Isto evitará a necessidade de um investimento muito grande desde o início do projeto, tanto em detectores como na eletrônica associada. Com esta configuração será possível realizar as mesmas medidas, somente que com muito menor eficiência, particularmente nos processos de mais de 2 corpos, como quando há a quebra do ^8Be em duas partículas alfa. Com o aprendizado obtido ao longo do desenvolvimento será possível detalhar melhor e otimizar o projeto do sistema completo. Conta-se também com a evolução da eletrônica de digitalização de pulsos, atualmente em franca evolução, e das SiPM, que também poderão se tornar inteiramente digitais e auto-suficientes, em termos de eletrônica.

4. As fotomultiplicadoras de Si (SiPM)

A figura abaixo apresenta uma fotografia de uma SiPM (ArraySM-4 da Sensl). Cada pixel (quadrado de 3 mm por 3 mm) contém um grande número (mais de 4700) de



subpixels consistindo de fotodiodos de avalanche (APD). O pulso gerado pela SiPM, pela soma da contribuição dos APDs, é semelhante ao de uma fotomultiplicadora usual. O total dos pixels pode ser somado ou adquirido separadamente no sistema de aquisição. Atualmente o custo deste dispositivo é comparável ao de uma fotomultiplicadora usual.

5. Outras possíveis configurações do sistema de SiPMs

Os detectores cintiladores serão utilizados em outras configurações para diversos tipos de experimentos:

1- Alvo ativo para utilização com feixes radioativos

Planeja-se a construção de um alvo/detector ativo a gás (semelhante ao MAIA de Ganil) para uso com os feixes radioativos produzidos pelo sistema RIBRAS. Na face dianteira deste sistema é necessário um sistema de alta granularidade para detectar as partículas leves ou cujo alcance ultrapassa o volume gasoso. O sistema de detectores com SiPM seria utilizado com esta finalidade.

2- Experimentos de espectroscopia gama e gama-partícula usuais (como o Saci)

Os detectores com SiPM serão utilizados para substituir as fotomultiplicadoras usuais no sistema Saci, procurando-se explorar sua maior granularidade e insensibilidade a campos magnéticos, o que será interessante também para medidas de fator g pela técnica de campo transiente (TF).

3- Medidas de fator g pela técnica de recuo em vácuo (RIV)

Planeja-se a construção de um sistema em forma de anel com os detectores com SiPM para medida de fator g pela técnica de recuo em vácuo (RIV). Nesta técnica a atenuação da correlação angular gama-partícula é usada para inferir a intensidade do momento de dipolo magnético dos estados nucleares de meia vida curta - importantes para verificação de sua configuração. Os detectores devem ser dispostos em um anel cujo eixo coincide com o da direção do feixe, de modo a determinar o ângulo azimutal (ϕ) entre a partícula e o raio gama, para um mesmo ângulo de espalhamento (θ).

6. A reação de $^{28}\text{Si} + ^9\text{Be}$

Esta reação é interessante em um contexto de medidas de reações com núcleos fracamente ligados, como outras propostas que estão sendo apresentadas ao CAP, que envolvem outras regiões de massa. A reação direta de $^9\text{Be} + ^{28}\text{Si}$ já foi relatada em diversos trabalhos (por exemplo na ref. [4], a mais recente) ao redor e acima da barreira. No entanto as medidas não foram feitas em coincidência cinemática e nem coincidência com raios gama.

A medida da reação inversa permitirá examinar todos os mecanismos de reação envolvidos, com a particularidade adicional de, a partir do espectro gama, inferir a região de população dos estados nucleares excitados que são produzidos, e verificar o alinhamento do momento angular previsto pelos modelos nucleares que visam a descrição dos diferentes processos. Este tipo de medidas é completamente inédito e possivelmente a mais completa a ser realizada com núcleos fracamente ligados.

6. Tempo de uso do acelerador

Estamos solicitando 6 dias de uso do acelerador para realizar testes e iniciar as medidas da reação proposta, preferencialmente no final de 2014 quando espera-se ter sido possível a construção do sistema na fase 1.

Referências

- [1] J.R.B. Oliveira *et al.*, AIP Conf. Proc. 1139, 172 (2009).
- [2] J.R.B. Oliveira *et al.*, Journal of Physics: Conference Series 205 (2010) 012046 .
- [3] J.A. Alcántara-Núñez, J.R.B. Oliveira *et al.*, Nucl. Inst. Meth. A 497, (2003) 429.
- [4] M. Hugi et al. Nucl. Phys. A368 (1981) 173-188 8

Anexo 2 do Apêndice 2

Projeto de Iniciação Científica:

Fase 1 do sistema de detectores “Nossa Caixa” para medidas de coincidência cinemática e raios gama

Orientador: *José Roberto B. Oliveira*

Aluno: *Ivan Almeida*

IFUSP - DFN – LAFN

Resumo

Serão desenvolvidos projetos mecânicos e testes da Fase 1 do projeto multi-detector denominado “Nossa Caixa”. Para isto serão feitos projetos de suporte dos detectores e da câmara de vácuo, e os testes serão realizados com fonte de partículas alfa (^{241}Am) e com íons pesados no Acelerador Pelletron.

Introdução

Pretende-se projetar e construir no LAFN um sistema de detectores de partículas carregadas de alta granularidade e com geometria de detecção 4π para medida de coincidência cinemática entre os fragmentos carregados e os raios gama produzidos em reações nucleares (“Nossa Caixa”). Com este equipamento será possível estudar em detalhe, por exemplo, os mecanismos de reação envolvidos em sistemas de núcleos fracamente ligados, estáveis ou radioativos. A Fase 1 deste sistema consiste de um número reduzido de detectores de partículas carregadas, cuja finalidade será a realização de testes que ajudarão a detalhar e otimizar o projeto completo. Os detectores de partículas carregadas seriam cintiladores plásticos acoplados a fotomultiplicadoras de Silício (SiPM). Estas fotomultiplicadoras tem o interesse de serem insensíveis à presença de campos magnéticos e apresentarem cada uma uma matriz de 4×4 pixels (com milhares de sub-pixels). Foi recentemente aprovado pelo Comitê de Avaliação de Projetos (CAP) do LAFN, em 2013, um experimento para testes deste sistema (Fase 1) com utilização de feixe de ^{28}Si produzido pelo Acelerador Pelletron (LAFN/IFUSP), em alvo de ^9Be [1]. Neste projeto encontram-se detalhes adicionais sobre o sistema e sua finalidade científica.

Reações com núcleos fracamente ligados

Reações com núcleos fracamente ligados (que apresentam energias de separação de alguns MeV ou menores) são ainda pouco compreendidas teoricamente. Como, durante uma colisão nuclear, estes núcleos se quebram facilmente, diversos mecanismos de reação costumam estar envolvidos, com absorção (ou não) de parte (transferências ou fusão incompleta) ou da totalidade (fusão completa) dos fragmentos de quebra. Há dificuldades tanto teóricas como experimentais, na definição e identificação dos próprios processos envolvidos [2]. O entendimento destas reações é importante, não somente do ponto de vista do desenvolvimento da teoria referente aos mecanismos de reação nuclear, como também pela importância destas reações para a compreensão dos processos astrofísicos de nucleossíntese, e portanto também para compreensão da própria evolução estelar e da cosmologia.

O projeto “Nossa Caixa”

A geometria planejada para o sistema de detectores 4π terá, em princípio, a forma de uma caixa aproximadamente cúbica de cerca de 20 cm de lado (outras geometrias poderão ser consideradas, como a de um *rombicuboctaedro*: um poliedro semi-regular com 18 faces quadradas e 8 triangulares). Os cintiladores serão dispostos na superfície interna da caixa e o alvo será localizado próximo a uma das faces (Fig. 1). A forma quadrada das faces é apropriada para a disposição das SiPM (que consistem de um quadrado de ~ 16 mm de lado com 16 *pixels* quadrados de 3 mm de lado). Os detectores gama de GeHP, com (ou eventualmente sem) supressão Compton, serão dispostos o mais próximo possível dos lados da caixa, a 90 graus com a direção do feixe, e alguns destes detectores poderão ser dispostos em ângulos traseiros.

Com esta geometria, será possível realizar medidas de coincidência cinemática da reação inversa, cobrindo-se praticamente todo o intervalo cinemático possível, sendo as partículas semelhantes ao feixe (Si) detectadas principalmente na face dianteira, e as semelhantes ao alvo, nas laterais. No caso da quebra em partículas alfa pode ser necessário detectar também partículas na face traseira da caixa. A assimetria da posição do alvo deve-se à anisotropia da taxa de contagens que será predominante em ângulos dianteiros, sendo necessário afastar os detectores nesta direção. O uso da reação inversa facilitará a detecção das partículas mais pesadas, que desta forma terão maior energia. A coincidência cinemática entre os diversos produtos da reação permitirá eliminar ambiguidades na identificação das partículas, por exemplo, dispensando a utilização de sistemas de tempo de voo para seleção de massa.

Os detectores plásticos tipo *phoswich* serão utilizados por sua alta resistência a radiação e alta velocidade de resposta temporal. Serão utilizados detectores ΔE mais finos (0,05 mm) em comparação com o sistema Saci (sistema ancilar do espectrômetro gama) existente, para permitir a identificação do Z das partículas mais pesadas. O uso de telescópios ΔE -E é importante para separar o fundo de partículas leves provenientes de reações de fusão-evaporação.

O uso de fotomultiplicadoras de Si, insensíveis à presença de campo magnético, permitirá a utilização do sistema mesmo nas proximidades do solenóide supercondutor RIBRAS para produção de feixes radioativos, em outros experimentos, além de serem muito mais compactos que fotomultiplicadoras usuais.

Os detectores de raios gama (GeHP) permitem a identificação dos estados nucleares produzidos na reação, e a correlação angular gama-partícula traz importantes informações a respeito da orientação espacial dos momentos angulares dos estados.

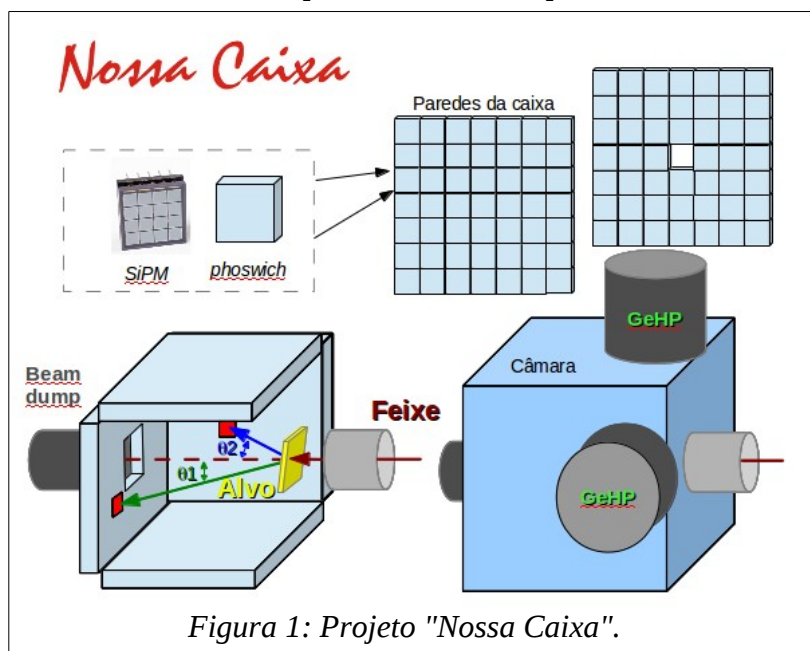


Figura 1: Projeto "Nossa Caixa".

As fotomultiplicadoras de Si (SiPM)

A figura 2 apresenta uma fotografia de uma SiPM (ArraySM-4 da Sensl). Cada pixel (quadrado de 3 mm por 3 mm) contém um grande número (mais de 4700) de *subpixels* consistindo de fotodiodos de avalanche (APD). O pulso gerado pela SiPM, pela soma da contribuição dos APDs, é semelhante ao de uma fotomultiplicadora usual. O total dos pixels pode ser somado ou adquirido separadamente no sistema de aquisição. Atualmente o custo deste dispositivo é comparável ao de uma fotomultiplicadora usual.

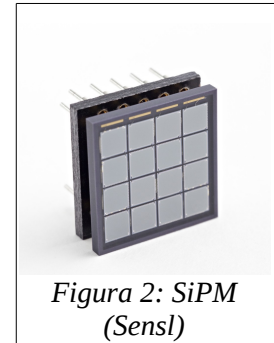


Figura 2: SiPM (Sensl)

Fase 1 do projeto “Nossa Caixa”

Inicialmente pretende-se construir uma versão simplificada do sistema com menor número de detectores. Esta seria a atividade principal do presente projeto de IC. Os detectores seriam dispostos somente ao longo de um perímetro plano, no interior da caixa. Isto evitará a necessidade de um investimento muito grande desde o início do projeto, tanto em detectores como na eletrônica associada. Com esta configuração será possível realizar as mesmas medidas, somente que com muito menor eficiência, particularmente nos processos de mais de 2 corpos. Com o aprendizado obtido ao longo do desenvolvimento será possível detalhar melhor e otimizar o projeto do sistema completo. Conta-se também com a evolução da eletrônica de digitalização de pulsos, atualmente em franca evolução, e das SiPM, que também poderão se tornar inteiramente digitais e auto-suficientes, em termos de eletrônica.

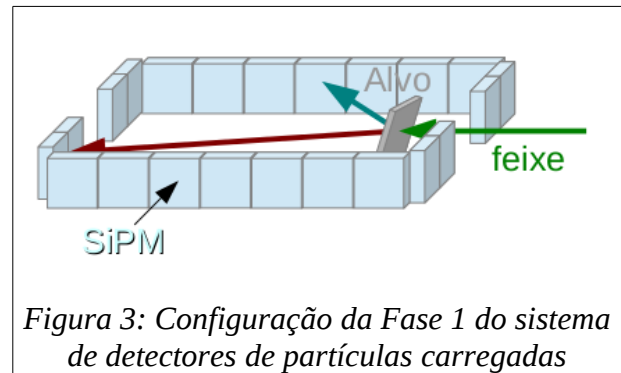


Figura 3: Configuração da Fase 1 do sistema de detectores de partículas carregadas

Atividades planejadas

- 1) Desenho e construção de um suporte para teste individual de 1 unidade detectora (phoswich + SiPM com 4×4 pixels) em sistema de vácuo.
- 2) Teste de uma unidade detectora com partículas alfa.
- 3) Teste de uma unidade detectora com íons pesados em coincidência com raios gama.
- 4) Desenho e construção de um sistema com vários detectores em geometria plana para medidas de coincidência cinemática (Fase 1).
- 5) Participação nas medidas com o sistema multi-detector (Fase 1) em geometria plana com íons pesados em coincidência cinemática e raios gama da reação $^{28}\text{Si} + ^9\text{Be}$ a cerca de 40 MeV.

Considerações finais

Como é usual para atividades de física nuclear experimental, o aluno tomará contato com diversos aspectos da atividade de pesquisa neste campo, envolvendo detectores de radiação, desenho mecânico, sistemas de vácuo, dispositivos elétricos, eletrônica e aquisição de dados etc. O aluno deverá também

participar e colaborar com outras atividades e experimentos do grupo de espectroscopia gama com o Acelerador Pelletron.

Referências

- [1] Proposta de experimento LAFN 2013 - <http://web.if.usp.br/ifusp/files/E-109.pdf>
- [2] P.R.S. Gomes, *et al.* PHYSICAL REVIEW C 73, 064606 (2006)

Apêndice 3

Proposta aprovada pelo CAP de utilização do Acelerador Pelletron do LAFN

“Medidas da reação $^{120}\text{Sn}(^6\text{He},\alpha)^{122}\text{Sn}$ em coincidência gama-partícula α ”

R. Lichtenthäler Filho, A. Yadav, J.R. B. de Oliveira, J. Alcantara Nuñez e a
colaboração RIBRAS
IFUSP-DFN

Medidas da reação $^{120}\text{Sn}(^6\text{He},\alpha)^{122}\text{Sn}$ em coincidência gama-partícula

R. Lichtenthäler Filho, A. Yadav, J.R. B. de Oliveira, J. Alcantara Nuñez e a colaboração RIBRAS

A investigação de propriedades de núcleos fora da linha de estabilidade (núcleos exóticos) com feixes secundários tem se constituído nos últimos anos a fronteira da Física Nuclear de baixas energias. Alguns destes núcleos como o ^6He apresentam propriedades diferentes dos núcleos estáveis e, em muitos aspectos, o estudo de reações induzidas por núcleos exóticos pode levar a resultados surpreendentes como secções de choque de reação bem maiores do que os isóbaros estáveis.

No Laboratório Aberto de Física Nuclear do DFN-USP temos o único equipamento na America Latina (sistema RIBRAS) capaz de produzir feixes de núcleos exóticos leves. Desde 2004 este equipamento está em operação e uma larga atividade experimental tem se desenvolvido no RIBRAS desde então.

O espalhamento de núcleos exóticos como o ^6He , ^8Li , ^7Be e outros em alvos de varias massas foi estudado e, em particular, o espalhamento $^6\text{He}+^{120}\text{Sn}$ foi medido por P.N. de Faria em sua tese de doutorado[1]. Neste sistema foi observada uma grande produção de partículas alfa com energias distribuidas ao redor da energia do pico do espalhamento elástico e com velocidade media igual a do feixe indicando que estas partículas poderiam estar sendo produzidas em reações diretas do feixe de ^6He com o alvo como por exemplo o breakup ou a transferência de nêutrons [2]. As secções de choque de produção de alfas forma medidas [2] e resultaram em valores bastante altos, em torno de centenas de milibarns, o que corresponde a uma ordem de grandeza maior do que as secções de choque de reações de transferência observadas em núcleos estáveis. A distribuição em energia destas alfas mostrou que o stripping de 2 neutrons é o processo mais provável. No caso da transferência de nêutrons, o Q_{optimo} de reação é zero, o que significa que serão preferencialmente populados estados no contínuo do núcleo final ^{122}Sn , acima do limiar de emissão de 1 neutron. O ^{122}Sn excitado irá decair emitindo 1 neutron e restará o resíduo ^{121}Sn excitado mas ligado, que subsequêntemente irá de desexcitar emitindo gamas.

As medidas realizadas até agora no RIBRAS consistem em medidas de distribuições angulares e de energia das partículas carregadas produzidas nas reações. Estas medidas fornecem informações sobre os mecanismos de reação, entretanto, estas informações são na maioria de vezes incompletas e ambíguas. Para se obter informações mais completas são necessárias medidas complementares como os gamas e nêutrons emitidos. Neste projeto propomos realizar medidas partícula-gama em coincidência das alfas emitidas na reação $^{120}\text{Sn}(^6\text{He},\alpha)^{122}\text{Sn}$ com os gamas do decaimento dos núcleos residuais.

Propomos aqui a utilização do sistema Saci-Pererê para as medidas partícula-gama. O sistema Saci consiste em 11 telescópios com detectores plásticos potswitch de grande ângulo solido para as partículas circundado por detectores gama HPGe. Este sistema tem sido utilizado em medidas semelhantes a proposta aqui mas com feixes estáveis de ^9Be .

Para isso será instalada uma extensão da linha RIBRAS para uma região onde o campo magnético do segundo solenóide seja suficientemente baixo para permitir a utilização dos detectores do Saci-pererê. Será montada uma pequena câmara de espalhamento

adaptada para receber o Saci-Pererê. Este equipamento ampliará muito a capacidade do sistema RIBRAS e possivelmente permitirá a realização de futuras experiências para medida de outros canais de reação como a fusão.

Solicitação

Estimativas com base na secção de choque medida em [2] e na eficiência de detecção do sistema indicam que poderemos ter por volta de 130 contagens por dia, o que é perfeitamente factível. Solicitamos então 7 dias de máquina para uma primeira experiência teste.

[1] P.N. de Faria, R. Lichtenthäler et al., PHYSICAL REVIEW C **81**, 044605 (2010)

[2] P.N. de Faria, R. Lichtenthäler et al, PHYSICAL REVIEW C **82**, 034602 (2010)