

Procura de Estados Isoméricos

R. Escudeiro^a, N.H. Medina^a, P.R.P. Allegro^a, D.L. Toufen^{a,b}, J.R.B. Oliveira^a, R.V. Ribas^a, V. A. P. Aguiar^a, J. Alcántara-Núñez^a, V.A.B. Zagatto^a, N. Added, E.L.A. Macchione, M.A.G. Silveira^c, D. Torres^d e F. Cristancho^d

^a Departamento de Física Nuclear – Instituto de Física da USP.

^b Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Guarulhos Brasil.

^c Centro Universitário da FEI, S.B. do Campo, Brasil.

^d Universidad Nacional de Colombia, Colômbia.

Resumo

Este trabalho consiste na procura e medida das vidas-médias de estados isoméricos dos núcleos $^{49,50}\text{Cr}$, ^{67}Ge e ^{68}Ga . Os isótopos serão produzidos através de reações de fusão-evaporação utilizando o acelerador Pelletron. As medidas de vidas-médias serão realizadas utilizando-se o feixe pulsado de 82 ns do acelerador Pelletron. A procura e as medidas das vidas-médias dos estados isoméricos serão feitas utilizando-se também o SISMEI (SIStema de Medidas de Estados Isoméricos), que foi desenvolvido para medida de vidas médias, utilizando-se a técnica de coincidência atrasada entre partículas carregas e raios gama. Esse sistema permite medidas de vidas-médias numa faixa de valores desde dezenas de ns a alguns μs . Serão medidas, inicialmente, vidas-médias conhecidas, no intuito de calibrar os sistemas e aumentar a precisão dos valores conhecidos.

Introdução

A estrutura dos núcleos pode ser entendida a partir do estudo dos seus estados quânticos internos e suas interconexões. Conhecer os estados quânticos internos implica em determinar suas funções de onda, porém estas não podem ser medidas diretamente. Assim, devem-se estudar as propriedades de cada estado nuclear: energia, spin, paridade, vida média, probabilidades de transição reduzidas elétricas ($B(E\lambda)$) e magnéticas ($B(M\lambda)$), entre outras e, a partir delas, inferir informações a respeito da função de onda dos estados excitados. Dentre as propriedades dos estados nucleares, a vida média tem grande importância, pois é a partir dela que se pode determinar as probabilidades de transição reduzidas elétricas ($B(E\lambda)$) e magnéticas ($B(M\lambda)$). Tais probabilidades dependem fortemente da função de onda e, por isso, representam um teste rigoroso para modelos nucleares, visto que certos modelos podem prever bem as energias dos estados, porém não são capazes de determinar as funções de onda com precisão. Em suma, o conhecimento das propriedades estáticas de níveis nucleares juntamente com a descrição através de modelos nucleares, permite um melhor entendimento da estrutura de núcleos [1,2].

Os estados isoméricos são estados nucleares que decaem com vidas médias longas ($T_{1/2} > 10 \text{ ns}$) e indicam, geralmente, uma grande alteração no momento angular, um pequeno elemento de matriz ou uma energia de transição pequena [3]. Na referência [3] podem ser visto, em detalhes, a física de vários casos da formação de estados isoméricos, como por exemplo isômeros de senioridade, mistura de valores de K (projeção do momento angular no eixo de maior elongação da deformação nuclear) em núcleos bem deformados, excitação de muitas quasi-partículas, coexistência de forma e isômeros em núcleos transicionais. O conhecimento das vidas médias de estados nucleares permite, em alguns casos, a identificação da configuração do estado nuclear. Por exemplo, os estados isoméricos de alto K proporcionam importantes pontas de prova da estrutura de núcleos. Estados de alto K podem indicar deformação prolata axialmente simétrica em núcleos onde são previstas coexistência das formas: esférica, oblata e prolata. A existência de estados isoméricos de alto K é proveniente da regra de

seleção de transições gama que não permite transições com valores de ΔK altos entre os estados inicial e final. Essas transições são na verdade atenuadas, aumentando em muitas ordens de grandeza o tempo de decaimento. A presença ou ausência de estados isoméricos tem também grande importância em estudos de astrofísica nuclear. Os isótopos de ^{64}Ge , ^{68}Se e ^{72}Kr , por exemplo, possíveis pontos finais dos processos rápidos de captura de prótons, têm vida média no meio estelar fortemente dependente da existência e da própria vida média de estados isoméricos, com grandes implicações para a nucleossíntese em explosões estelares [4]. A medida da vida-média dos estados isoméricos nucleares permite também uma ampliação dos fenômenos a serem estudados na estrutura dos núcleos, além de possibilitar as medidas das propriedades eletromagnéticas desses estados, como os momentos de dipolo magnético [5-7].

Neste trabalho, serão medidas vidas-médias de estados isoméricos nucleares numa faixa de 5 a 60 ns, utilizando-se o feixe pulsado de 82 ns, disponível no acelerador Pelletron, e também através do Sistema de Medidas de Estados Isoméricos (SISMEI) [8], que foi desenvolvido no grupo de raios gama do Departamento de Física Nuclear para o estudo de estados isoméricos numa faixa de vidas médias de 10 ns até alguns μs . Será realizada a procura de estados isoméricos em núcleos com núcleons de valência ocupando a camada pf e também na região de massa $A=60-70$.

A região de massa $A=60-70$

Na região de massa $A=60-70$, diversos núcleos de Zn, Ga e Ge, com número de massa A ímpar e núcleos duplamente ímpares de Ga, apresentam inúmeros estados isoméricos [9-15]. No caso dos isótopos duplamente ímpares de Ga, a maioria dos estados isoméricos conhecidos é proveniente de transições E2 com energias menores do que 250 keV, enquanto que para os isótopos de Zn, Ga, e Ge, com número de massa A ímpar, a maioria desses estados isoméricos são devidos a transições do tipo quadrupolo magnético ($M2$). Há pouco tempo, os estados excitados dos isótopos duplamente ímpares de Ga, assim como dos núcleos de Zn, Ga e Ge com número de massa A ímpar foram alvo de um estudo, utilizando as previsões Modelo de Camadas em Larga Escala [16]. Das previsões teóricas utilizando esse modelo, duas se mostraram interessantes como candidatos a estados isoméricos não conhecidos experimentalmente até o momento: o estado 0^+ , pertencente ao núcleo ^{68}Ga e o estado $9/2^-$, pertencente ao núcleo ^{67}Ge . As previsões do Modelo de Camadas em Larga Escala foram feitas utilizando o código Antoine [17] e a interação residual JUN45 [18] e indicam uma meia vida da ordem de 400 ns para o estado 0^+ do núcleo ^{68}Ga e da ordem de 450 ns para o estado $9/2^-$ do núcleo ^{67}Ge .

Medidas com o feixe pulsado do acelerador Pelletron

O feixe pulsado do acelerador Pelletron tem as seguintes características: o intervalo de tempo entre dois pulsos é da ordem de 82 ns e resolução temporal é de aproximadamente 1,5 ns. Essas características devem permitir que sejam feitas medidas de estados isoméricos com vidas-médias da ordem de 10 a 60 ns. Na medida da vida-média do estado isomérico, o início da contagem dos tempos é fornecido pelo feixe pulsado e o final é dado pela detecção do raio gama. Com o feixe pulsado do acelerador Pelletron será feita a procura de estados isoméricos nos núcleos da camada pf: $^{49,50}\text{Cr}$. Na produção desses núcleos será utilizada a reação de fusão evaporação $^6\text{Li} + ^{46}\text{Ti}$, $E_F = 25 \text{ MeV}$. As seções de choque na produção dos núcleos $^{49,50}\text{Cr}$, previstas pelo programa PACE [21], são da ordem de $\sigma = 270 \text{ mb}$ e $\sigma = 300 \text{ mb}$, respectivamente. Esses núcleos, assim como os outros canais mais fracos, são bons candidatos para a procura de estados isoméricos uma vez que apresentam bandas de alto- K

próximas a bandas com pequena projeção K. Nessa reação também deve ser produzido o núcleo ^{49}V com uma seção de choque estimada em aproximadamente $\sigma = 180$ mb. Esse nuclídeo possui um estado isomérico $I^\pi=3/2^-$ de $T_{1/2} = 19,90(24)$ ns ($E_{\text{ex}} = 152,9$ keV) [22], que será medido para o controle das condições experimentais. Com esta seção de choque e uma corrente de feixe média de 1 pnA o tempo estimado para a medida da vida-média do estado $3/2^-$ do ^{49}V é de aproximadamente 40 horas. O alvo de $1,0 \text{ mg/cm}^2$ de ^{46}Ti já está disponível no acelerador Pelletron.

Medidas utilizando-se o SISMEI

A procura por novos estados isoméricos será feita com sistema Sistema de Medidas de Estados Isoméricos (SISMEI) [8], que foi construído a partir de pequenas modificações no espectrômetro Saci-Pererê do Laboratório Aberto de Física Nuclear [19]. O SISMEI é composto por 10 detectores de partícula do tipo “*Phoswich*” posicionados ao redor de uma câmara em forma de dodecaedro (SACI – Sistema Ancilar de Cintiladores [19]) e dois detectores de raios γ : um detector de GeHP e um de NaI(Tl), posicionados no final de um cone, 15 cm após o alvo. O detector de GeHP é utilizado devido a sua boa resolução em energia (~ 2 keV em 1,3 MeV), essencial para distinguir picos de raios gama com energias próximas. Já o detector de NaI(Tl) tem uma resolução em tempo superior (~ 10 ns), o que é importante para se realizar medidas de vidas médias mais curtas. A resolução temporal dos detectores de GeHP é da ordem de dezenas de ns. O SISMEI utiliza uma técnica alternativa para a medida de vidas médias de estados nucleares na faixa de 10 ns a $10 \mu\text{s}$, sem a utilização de feixe pulsado. Esta técnica baseia-se principalmente na coincidência atrasada entre partículas carregadas (prótons e alfas) evaporadas pelo núcleo composto, formado na reação de fusão-evaporação, e os raios gama emitidos pelo núcleo residual. No SISMEI, o núcleo residual formado na reação nuclear, após a evaporação de partículas ($\sim 10^{-19}$ s), recua em vácuo, por uma distância suficiente para permitir a blindagem dos detectores de raios gama da intensa radiação proveniente do alvo, até atingir um anteparo (*stopper*). Com isso, os decaimentos de estados isoméricos com vida-média da ordem do tempo de voo do núcleo, ou superior, podem ser observados por detectores de raios gama nas proximidades do anteparo, em coincidência atrasada com as partículas carregadas observadas nos detectores de partículas do SACI. O sinal do início da contagem de tempo (*start*) é dado pelos detectores de partículas carregadas do SACI e o sinal do fim da contagem de tempo (*stop*) é fornecido pelos detectores de raios γ de NaI(Tl) e/ou GeHP, posicionados na extremidade final do cone. Um equipamento similar a este foi construído no Japão para medida de estados isoméricos na região de ns a μs utilizando-se reações profundamente inelásticas [20]. Com esse equipamento foi possível determinar a vida-média de 25(5) ns de um estado isomérico no núcleo ^{69}Cu , numa energia de excitação $E_{\text{ex}} = 2741$ keV.

Os núcleos candidatos para se encontrar estados isoméricos: ^{68}Ga e ^{67}Ge , serão produzidos no acelerador Pelletron através de reações de fusão-evaporação: $^{55}\text{Mn}(^{16}\text{O}, 2\text{pn})^{68}\text{Ga}$, $E_f=55$ MeV e $^{58}\text{Ni}(^{12}\text{C}, 2\text{pn})^{67}\text{Ge}$, $E_f= 50$ MeV, com seções de choque estimadas da ordem de 80 e 220 mb, respectivamente. As estimativas das seções de choque foram feitas através do programa PACE, que descreve reações de fusão-evaporação através de técnicas de Monte Carlo [21]. Alvos finos de ^{55}Mn e ^{58}Ni estão disponíveis no acelerador Pelletron.

Caso as reações a serem realizadas não populem estados isoméricos, pretende-se realizar novos experimentos para a procura de estados isoméricos, utilizando-se os feixes disponíveis no acelerador Pelletron: ^9Be , $^{10,11}\text{B}$, $^{12,13}\text{C}$ e $^{16,18}\text{O}$ e os alvos de ^{46}Ti , ^{51}V , ^{55}Mn e $^{58,60}\text{Ni}$.

Solicitação de Dias de Máquina

Para a procura e medida de vidas médias nos isótopos na região de massa $A=50$, utilizando-se o feixe pulsado do acelerador Pelletron, solicita-se:

- **2 dias** para testes do feixe pulsado e do aparato experimental. Neste teste será utilizada a reação $^{46}\text{Ti}(^6\text{Li}, 2\text{pn})^{49}\text{V}$, $E_{\text{feixe}} = 25 \text{ MeV}$, para a medida do estado $I^\pi=3/2^-$ de $T_{1/2} = 19,90(24) \text{ ns}$ ($E_{\text{ex}} = 152,9 \text{ keV}$).
- **3 dias** para a procura e medida dos estados isoméricos dos núcleos $^{49,50}\text{Cr}$.

Para a procura e medida de vidas médias nos isótopos na região de massa $A=60-70$, solicita-se:

- **1 dia** para testes da eletrônica de aquisição e do arranjo experimental. Neste teste será utilizada a reação $^{46}\text{Ti}(^{11}\text{B}, 1\text{p}2\text{n})^{54}\text{Fe}$, $E_{\text{feixe}} = 30 - 40 \text{ MeV}$. Esta experiência já foi realizada anteriormente utilizando o sistema SISMEI [8,15] e representa um bom teste do sistema.
- **4 dias** para medida da vida-média do estado isomérico do núcleo ^{68}Ga . Nesse experimento será realizada a reação $^{55}\text{Mn}(^{16}\text{O}, 2\text{pn})^{68}\text{Ga}$, $E_f = 55 \text{ MeV}$. Utilizando-se uma corrente de feixe da ordem de $1,0 \text{ nA}$ e alvo com espessura de $1,0 \text{ mg/cm}^2$, estima-se uma taxa de detecção dos raios gama provenientes do estado isomérico da ordem de $300 \text{ contagens/hora}$.
- **3 dias** para medida da vida-média do estado isomérico do núcleo ^{67}Ge . Nesse experimento será realizada a reação $^{58}\text{Ni}(^{12}\text{C}, 2\text{pn})^{67}\text{Ge}$, $E_f = 50 \text{ MeV}$.

Total de dias solicitados: 13 dias.

Referências

- [1] IONESCU-BUJOR, M. et al., Phys. Lett. B 495 (2000) 289.
- [2] CAURIER, E. et al., Rev. Mod. Phys. 77 (2005) 427.
- [3] DRACOU LIS, G.D., Phys. Scripta T152 (2013) 014015.
- [4] WIESCHER, M., REGAN, P.H., APRAHAMIAN, A., Physics World, february (2002) 33.
- [5] IONESCU-BUJOR, M. et al., Nuclear Physics A 633 (1998) 459.
- [6] IONESCU-BUJOR, M. et al., Phys. Rev. C 60 (1999) 024310.
- [7] IONESCU-BUJOR, M. et al., Phys. Rev. C 81 (2010) 024323.
- [8] TOUFEN, D. L. et al., Rev. Sci. Inst. 85(7) (2014) 073501.
- [9] BROWNE, E., TULI, J. K., Nuclear Data Sheets 111 (2010) 2425.
- [10] JUNDE, H., XIAOLONG, H., TULI, J.K., Nuclear Data Sheets 106 (2005) 159.
- [11] BHAT, M. R., TULI, J.K., Nuclear Data Sheets 90 (2000) 269.
- [12] SINGH, B., Nuclear Data Sheets 108 (2007) 197.
- [13] BROWNE, E., TULI, J.K., Nuclear Data Sheets 111 (2010) 1093.
- [14] MCCUTCHAN, E. A., Nuclear Data Sheets 113 (2012) 1735.
- [15] TULI, J. K., Nuclear Data Sheets 103 (2004) 389.
- [16] ALLEGRO, P. R. P., Sistemática de núcleos ímpar-ímpar de Ga na região de massa $A = 60-70$. Tese de doutorado, IFUSP (2013).
- [17] CAURIER, E. & NOWACKI, F., Acta Phys. Polonica B, 30 (1999) 705.
- [18] HONMA, H. et al., Phys. Rev. C, 80 (2009) 064323.
- [19] ALCÁNTARA-NÚÑEZ, J.A. et al., Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A, 497 (2003) 429.
- [20] TANIGAKI, M. et al. The European Physical Journal A, 6 (1999) 119.
- [21] GRAVON, A. Physical Review C, 21 (1980) 230
- [22] BURROWS, T.W., Nuclear Data Sheets 76, (1995) 191.

LABORATÓRIO ABERTO DE FÍSICA NUCLEAR

PAC 2016

Proposal E91	N°
Title: Procura de estados isoméricos.	
Responsible: Nilberto Heder Medina	e-mail: medina@if.usp.br
Participants Rafael Escudeiro, Vitor Angelo Aguiar, Dennis Toufen, Paula Allegro, José Roberto B. de Oliveira, Eduardo Macchione, Nemitala Added, Roberto V. Ribas, Marcilei A.G. da Silveira, Juan Núñez-Alcàntara, Fernando Cristancho e Diego Torres.	
Spokeperson: Nilberto H. Medina	e-mail: medina@if.usp.br
Telephone: +55-11-3091-6763	Skype: nilberto.medina
Number of days for experiment:	13
Period planned for the experiment (are the setup ready for beam time?): Sim, o equipamento está pronto, mas é necessário algumas semanas para a montagem do sistema SISMEI e algumas semanas para a preparação do feixe pulsado.	

Technical information

Ion source			Accelerator			Experimental Area	
Beam	Cathode	I _{mínima}	V _{min}	V _{max}	Bunched beam?	Beam line	Target
⁷ Li		300 nA	7,0	7,5	sim	30A	
¹⁶ O		300 nA	7,0	7,5	não	30A	
¹² C		300 nA	7,0	7,5	não	30A	
¹¹ B		300 nA	7,0	7,5	não	30 A	

Other relevant/needed information:

Previous Information on Project

Proposal approved	N E91
Period of beam time (date)	
Results or problems:	
Não foram realizados os experimentos propostos nesse projeto por falta de alunos ligados diretamente a esse tema.	

Proposal approved	N
Period of beam time (date)	
Results or problems:	