

Proposta de vaga MS-3 - IFUSP

# **Física experimental fundamental e aplicada com feixes de núcleos fora da linha de estabilidade no Brasil**

Rubens Lichtenthäler Filho  
Kelly Cristina Cezaretto Pires

21 de fevereiro de 2024

## **1 Relevância atual da área**

A pesquisa em núcleos fora da linha de estabilidade (núcleos exóticos) constitui uma das áreas mais importantes da física nuclear atualmente. Questões fundamentais, como os limites do núcleo atômico, a formação dos elementos pesados e a estrutura nuclear em situações extremas de isospin, e suas implicações na astrofísica nuclear, são exemplos de desafios em aberto nesta área. Para ilustrar a relevância dessa área, citamos três trabalhos recentemente publicados na revista Nature [1–3]. Vale ressaltar que este último é particularmente relevante, sendo diretamente relacionado à física que propomos neste projeto, com trabalhos do grupo RIBRAS citados entre as referências.

O RIBRAS (*Radioactive Ion beams in Brasil*) é um equipamento singular no cenário brasileiro e latino-americano, com a capacidade de gerar feixes secundários de núcleos leves fora da linha de estabilidade. Trata-se de um sistema de duplos solenoides supercondutores em funcionamento desde 2004 na linha 45B do acelerador Pelletron 8UD, localizado no Laboratório Aberto de Física Nuclear (LAFN) do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP). Ao longo desse período, foram desenvolvidos e publicados mais de 50 trabalhos científicos em revistas internacionais de alto parâmetro de impacto, totalizando mais de 500 citações. Além disso, o RIBRAS contribuiu para a orientação de mais de 20 dissertações de mestrado, teses de doutorado e pesquisas pós-docs.

Após a interrupção devido à pandemia de COVID-19, o sistema retomou suas operações em outubro de 2023 com o resfriamento do primeiro solenoide. Desde então, estão sendo

realizados vários experimentos bem-sucedidos, envolvendo feixes radioativos de  ${}^6\text{He}$ ,  ${}^8\text{Li}$  e  ${}^8\text{B}$  em diferentes alvos, que constituem os temas de quatro trabalhos de mestrado em andamento e dois pós-doutorados.

Recentemente, houve investimentos significativos na eletrônica, sistema de aquisição e detecção do RIBRAS, por meio do projeto Temático FAPESP 2019/07767-1. Esses aportes ampliaram consideravelmente a capacidade experimental do equipamento. A implementação da nova aquisição totalmente digital abriu a possibilidade da realização de medidas em coincidência cinemática partícula-partícula e partícula-gama. A realização dessas medidas está prevista para breve, após o resfriamento do segundo solenoide. Essas melhorias representam um avanço significativo e abrem amplas perspectivas para a linha de pesquisa experimental envolvendo núcleos exóticos.

## 1.1 O RIBRAS e o futuro

Além da pesquisa básica conduzida no RIBRAS ao longo dos últimos 20 anos, atualmente encontra-se em andamento uma proposta de colaboração com o Dr. Erich Leistenschneider e um dos laboratórios da Universidade de Berkeley (LBL). Essa iniciativa visa estabelecer uma nova linha de pesquisa em física aplicada no RIBRAS, com a instalação de uma estação dedicada à ressonância nuclear magnética beta.

A ressonância magnética nuclear por detecção beta é uma técnica de espectroscopia recentemente desenvolvida [4], que envolve a implantação de um núcleo radioativo polarizado, como o  ${}^8\text{Li}$ , em um meio material, seguida pela observação da assimetria do seu decaimento beta. Esta técnica apresenta uma sensibilidade várias ordens de magnitude superior ao NMR tradicional. Além disso, a ressonância magnética nuclear por detecção beta oferece informações detalhadas sobre as propriedades locais de materiais em escala nanométrica. Suas aplicações são muito extensas, abrangendo diversas áreas da ciência, incluindo estado sólido, análise de materiais, produção de energia, biofísica, medicina e física médica. As técnicas de  $\beta$ -NMR foram inicialmente empregadas em estudos de física nuclear, com foco particular na estrutura nuclear, devido à sua sensibilidade aos spins e momentos eletromagnéticos de radioisótopos [5–7]. Mais recentemente, essa abordagem tem sido amplamente utilizada para investigações em materiais. O laboratório TRIUMF, localizado em Vancouver (Canadá), é central nesse contexto, mantendo um conjunto de

estações especializadas para  $\beta$ -NMR. O grupo é bastante ativo e costuma atrair parcerias com o setor privado, incluindo, por exemplo, parcerias com laboratórios da Toyota para o desenvolvimento de baterias elétricas. No entanto, é importante notar que o tempo de feixe radioativo dedicado à ciência de materiais nesse laboratório é atualmente limitado a aproximadamente 5 semanas por ano, o que não atende à demanda crescente.

A espectroscopia  $\beta$ -NMR, até então aplicada em laboratórios como TRIUMF (Canadá) e CERN-ISOLDE, utiliza feixes de  $^8\text{Li}$  de baixa energia (10-100 keV). O RIBRAS, por sua vez, produz feixes de  $^8\text{Li}$  com energias mais elevadas, da ordem de 10-30 MeV, possibilitando uma implantação mais profunda e a análise de amostras líquidas. Essa característica tornaria o RIBRAS uma facilidade única no mundo.

## **2 Impacto da contratação e justificativa de um docente na área**

A perspectiva futura apresentada para a área de física de núcleos fora da linha de estabilidade e núcleos exóticos motiva a contratação de um docente MS-3 para o grupo RIBRAS. Além da considerável ampliação da capacidade experimental do RIBRAS devido à implementação da nova aquisição digital, o desenvolvimento do trabalho de implantação da estação  $\beta$ -NMR prevê um aumento significativo na capacidade de pesquisa realizada com o RIBRAS. Este último trabalho está programado para ser conduzido por um pesquisador pós-doc e um estudante de doutorado do RIBRAS, os quais deverão passar seis meses em Berkeley para desenvolver o espectrômetro. Posteriormente, o sistema será instalado na linha RIBRAS. O financiamento será parcialmente providenciado por Berkeley e parcialmente pela FAPESP, através de bolsas de pós-doc e apoio do Projeto Temático vigente, além de suporte de auxílios regulares da FAPESP e CNPq.

O envolvimento de pós-doutores e estudantes no projeto é extremamente bem-vindo, e grande parte do trabalho desenvolvido no RIBRAS nos últimos anos tem sido conduzido por pós-doutores extremamente ativos e dedicados. Entretanto, a participação de pós-doutores é limitada no tempo devido à restrição de bolsas de estudo. Portanto, para dar continuidade à linha de pesquisa e consolidar a implementação desta nova linha aplicada, será necessária a contratação de novos pesquisadores e técnicos para o grupo. Atualmente,

o grupo RIBRAS é composto por dois docentes ativos, o Prof. Rubens Lichtenthäler Filho e a Profa. Kelly C. C. Pires, sendo que o Prof. Rubens deverá se aposentar nos próximos anos.

A natureza interdisciplinar deste projeto é evidente e altamente motivadora, abrangendo aplicações em diversas áreas da física. Portanto, o impacto esperado pela contratação de um docente para consolidação desta nova linha de pesquisa deverá ser grande.

### **3 Prognóstico de potenciais candidatos**

O grupo RIBRAS possui vários pós-doutores altamente ativos, demonstrando um grande potencial para futuras contratações, especialmente na categoria de MS-3 no IFUSP. Com a abertura de uma vaga nas áreas de Física Nuclear Experimental, tanto básica quanto aplicada, em baixas energias, o número de possíveis candidatos seria ainda maior, abrangendo pós-doutores de outras instituições do Brasil e do exterior. No último concurso realizado no IFUSP nesta área, contamos com a participação de 11 candidatos de excelente nível.

### **4 Viabilidade de execução de projetos na área**

A parte mais crucial deste projeto é o feixe de  $^8\text{Li}$ , que já está em operação no RIBRAS. Dessa forma, o projeto é plenamente viável.

### **5 Justificativa para atividades de cultura e extensão**

A implementação de uma nova linha de pesquisa de fronteira geralmente resulta em consequências benéficas nas áreas de ensino, cultura e extensão. Especificamente neste caso, está sendo proposta uma linha de pesquisa de medidas de precisão com grande potencial inovador e de aplicação em diversas áreas da ciência, o que certamente estimulará a criação de novos cursos de pós-graduação. De fato, um novo curso de pós-graduação nesta área já está sendo organizado pelo grupo RIBRAS em colaboração com Berkeley. Dado que se trata de uma linha experimental, é altamente motivador para os estudantes realizar sua iniciação científica em um laboratório como este. Atualmente, o grupo RIBRAS conta com diversos estudantes de iniciação científica, mestrado e doutorado.

## Referências

- [1] N. Tsunoda, T. Otsuka, K. Takayanagi, N. Shimizu<sup>1</sup>, T. Suzuki, Y. Utsuno, S. Yoshida, H. Ueno, The impact of nuclear shape on the emergence of the neutron dripline, **Nature** 587 (2020) 66. doi:10.1038/s41586-020-2848-x.
- [2] Y. Kondo, et al., First observation of  $^{28}\text{O}$ , **Nature** 620 (2023) 965. doi:10.1038/s41586-023-06352-6.
- [3] L. Yang, et al., Breakup of the proton halo nucleus  $^8\text{B}$  near barrier energies, **Nature Communications** 13 (2022) 7193. doi:10.1038/s41467-022-34767-8.
- [4] W. MacFarlane, Implanted-ion  $\beta\text{NMR}$ : A new probe for nanoscience, *Solid State Nuclear Magnetic Resonance* 68-69 (2015) 1–12. doi:10.1016/j.ssnmr.2015.02.004.
- [5] D. Nagae, H. Ueno, D. Kameda, M. Takemura, K. Asahi, K. Takase, A. Yoshimi, T. Sugimoto, K. Shimada, T. Nagatomo, M. Uchida, T. Arai, T. Inoue, S. Kagami, N. Hatakeyama, H. Kawamura, K. Narita, J. Murata, Ground-state electric quadrupole moment of  $^{31}\text{Al}$ , *Phys. Rev. C* 79 (2009) 027301. doi:10.1103/PhysRevC.79.027301.
- [6] D. Borremans, D. L. Balabanski, K. Blaum, W. Geithner, S. Gheysen, P. Himpe, M. Kowalska, J. Lassen, P. Lievens, S. Mallion, R. Neugart, G. Neyens, N. Vermeulen, D. Yordanov, New measurement and reevaluation of the nuclear magnetic and quadrupole moments of  $^8\text{Li}$  and  $^9\text{Li}$ , *Phys. Rev. C* 72 (2005) 044309. doi:10.1103/PhysRevC.72.044309.
- [7] A. Voss, M. R. Pearson, F. Buchinger, J. E. Crawford, R. F. Kiefl, C. D. P. Levy, W. A. MacFarlane, E. Mané, G. D. Morris, O. T. J. Shelbaya, Q. Song, D. Wang, High precision measurement of the  $^{11}\text{Li}$  and  $^9\text{Li}$  quadrupole moment ratio using zero-field  $\beta\text{-NQR}$ , *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 41 (1) (2013) 015104. doi:10.1088/0954-3899/41/1/015104.