

Coherent Neutrino-Nucleus Interaction Experiment

Física além do modelo padrão com detectores CCD na usina de Angra 2

Resumo

A física de neutrinos é um dos campos mais ativos da física de partículas, com várias questões fundamentais ainda não respondidas. Nos últimos anos, a detecção do espalhamento elástico coerente de neutrinos em núcleos tem ganhado um forte interesse por ser um dos processos nos quais é possível por um lado observar física além do modelo padrão e por outro permite desenvolver uma nova tecnologia para o monitoramento de usinas nucleares. O Brasil está em posição privilegiada, pois dispõe de um laboratório funcional instalado em um contêiner situado a 30 m do núcleo do reator de Angra 2, condição disponível em poucos países. O experimento CONNIE (*Coherent Neutrino-Nucleus Interaction Experiment*) que opera no laboratório visa detectar pela primeira vez a interação coerente dos antineutrinos de reator nuclear utilizando detectores CCD (*Charge-Coupled Devices*) de silício e colocar limites em interações de neutrinos além do modelo padrão. Os grupos brasileiros formam um terço da colaboração CONNIE e atuam em todos os aspectos do experimento, desde a instalação e operações até os níveis mais avançados de análise de dados.

Com os dados, tomados pelo experimento no período 2016-2020 usando um conjunto de 8 CCDs com limiar de detecção de 50 eV, foi possível colocar os limites mundiais mais restritivos para modelos de nova física a baixas energias. Com o intuito de baixar ainda mais o limiar de detecção, dois sensores de última geração, Skipper-CCDs, foram instalados em julho de 2021. Atualmente estamos tomando dados de forma contínua e estável para, por um lado poder caracterizá-los, e por outro poder determinar o espectro de background para um limiar acima de ~ 10 eV. O plano é adicionar mais sensores Skipper-CCD em breve para aumentar de maneira significativa a sensibilidade de CONNIE às mais baixas energias alcançadas até agora. Desta forma, esperamos poder continuar com a liderança brasileira do CONNIE como um experimento relevante para a física fundamental de partículas em nível global, contribuindo para o entendimento da física de neutrinos e a busca de física além do modelo padrão.

1. Descrição do experimento e seu contexto internacional

O experimento CONNIE (*Coherent Neutrino-Nucleus Interaction Experiment*) vem operando desde dezembro de 2014 adjacente ao reator nuclear Angra 2, utilizando um novo método para a medida de recuos nucleares com sensores CCD, para medir o espalhamento coerente dos neutrinos e testar modelos além do modelo padrão da física de partículas. Evidências de física além do modelo padrão são buscadas em experimentos de altas energias e luminosidades, como no *Large Hadron Collider* (LHC¹) e no vindouro *Deep Underground Neutrino Experiment* (DUNE²), que é um dos projetos de maior envergadura em física de partículas na próxima década. No entanto, diversas propriedades previstas em teorias além do modelo padrão podem se manifestar em baixas energias, podendo ser testadas em experimentos com baixíssimo limiar de energia de detecção, como o CONNIE.

Em baixas energias (menor que algumas dezenas de MeV) a interação dos neutrinos com o núcleo se dá de forma coerente, de modo que sua seção de choque é amplificada com uma dependência essencialmente quadrática no número atômico. Essa interação foi prevista pelo Modelo Padrão³ e recentemente medida pelo experimento COHERENT⁴. O experimento CONNIE explora essa interação através de sensores CCD (*Charge-Coupled Devices*). Os CCDs de silício funcionam ao mesmo tempo como o meio onde a interação acontece e como o sistema de detecção dessa interação. O espalhamento coerente de um neutrino em um núcleo do silício gera um pequeno recuo do núcleo, o qual pode ser detectado através do sinal de ionização no detector. Os CCD são pixelizados, de modo que a nuvem de ionização deposita energia nos pixels, deixando um sinal característico de sua difusão. Outras partículas também interagem com o CCD, depositando energia, sendo que em geral deixam um traço característico de seus processos de interação. Por exemplo, os múons cósmicos deixam traços retos, cuja espessura varia na medida em que eles atravessam o CCD. Essa característica de resolução espacial é um diferencial dos detectores CCD (os CCDs do CONNIE são formados por matrizes de 4000 x 4000 pixels de largura 15 μm cada), que permitem ao mesmo tempo discriminar as partículas e fornecem meios de calibrar a energia medida nos sensores. Outro aspecto crucial dos CCDs é seu baixo limiar de detecção, sendo capazes de identificar recuos com energias tão baixas quanto 30 keV. Isso os torna especialmente adequados para a detecção do espalhamento coerente de neutrinos e também de matéria escura de baixa massa.

¹ <http://lhc.web.cern.ch/>

² <https://www.dunescience.org/>

³ Phys. Rev. D 9, 1389 (1974)

⁴ Science 357, 1123 (2017)

O experimento CONNIE está localizado a 30 m do reator nuclear de Angra 2 que é uma poderosa fonte de antineutrinos (do elétron) de baixas energias. Ele está localizado em um contêiner que funciona como um laboratório avançado de neutrinos, abrigando também o experimento Neutrinos Angra⁵. Em sua primeira etapa de operação os sensores utilizados foram os detectores de engenharia originários do projeto *Dark Energy Survey*. Com estes sensores fomos capazes de mostrar a factibilidade do experimento e o seu potencial. Em junho de 2016 fizemos um upgrade, inserindo novos CCD especialmente produzidos para CONNIE, aumentando sua massa ativa por um fator 40 e fazendo diversas melhorias em todo o experimento. Nossa análise mostrou que não há um excesso nas detecções comparando os períodos com reator ligado (quando esperamos ter além do background o sinal da interação) e desligado (quando apenas medimos background). Com estes dados alcançamos a sensibilidade recorde no mundo para energias de recuo da ordem de 1 keV. Obtivemos um limite superior para a taxa de interações de neutrinos que corresponde, em 95% de confiança, a 40 vezes a esperada pelo modelo padrão nessa escala de energia.

Como mencionado anteriormente, os neutrinos de baixa energia, em particular via a sua interação coerente, fornecem um campo fértil para testar modelos além do modelo padrão, incluindo modelos com momento magnético anômalo do neutrino⁶, neutrinos com milicarga⁷ e neutrinos estéreis⁸. A primeira detecção da interação coerente pelo experimento COHERENT já levou a restrições nos modelos de interações não padrão dos neutrinos⁹ e em outras propriedades¹⁰.

Várias dessas propriedades não padrão dos neutrinos aumentam a sua seção de choque e a magnitude do efeito é maior quanto menor a energia dos neutrinos. Neste sentido, o CONNIE está em uma posição privilegiada por seu baixo limiar de detecção, graças à tecnologia de CCD. Mesmo sem ter detectado ainda a interação coerente do modelo padrão, os dados de CONNIE já permitem colocar limites significativos em teorias além do modelo padrão. Por exemplo, se consideramos um modelo com um mediador vetorial (escalar) leve Z' (ϕ) com massa $M_{Z'}$ (M_ϕ), somos capazes de colocar limites no acoplamento g' para massas $M_{Z'} < 10$ MeV ($M_\phi < 30$ MeV) que são mais restritivos que os limites atuais obtidos a partir dos dados do experimento

⁵ JINST. 14, P06010 (2018), arXiv:1812.11604

⁶ JHEP 2019, 103 (2019)

⁷ arXiv:1907.04942

⁸ Phys. Rev. D 96, 063013 (2017), arXiv:1703.00054; arXiv:1901.08094; Physics Letters B 776, 451 (2018)

⁹ JHEP 7, 37 (2018); Phys. Rev. D 98, 075018 (2018), arXiv:1806.07424

¹⁰ Phys. Rev. D 97, 033003 (2018), arXiv:1711.09773

COHERENT e representam os limites mais fortes já obtidos nesse intervalo de massas. Isto ilustra o poder do experimento CONNIE de restringir física além do modelo padrão.

Um novo modo de coleta de dados que se baseia num binning de hardware de 5 pixels na direção vertical foi implementado em 2019. A técnica de binning é usada para minimizar o ruído de leitura, que é adicionado pelo amplificador na leitura sequencial. Como a carga de 5 pixels é somada antes da leitura, o ruído de leitura efetivo por pixel é 5 vezes menor. O preço pago pelo uso do binning é a perda de resolução espacial do pixel na direção do binning, pois cada pixel representa uma área de silício 5 vezes maior em tamanho. Os espectros de energia medidos não mostram excesso de dados do reator ligado em comparação com o reator desligado, produzindo um limite superior esperado (observado) no nível de confiança de 95% para a taxa de interação de neutrinos da ordem de 34 (66) vezes o esperado na faixa de energia de 50-180 eV.

Para tornar o experimento ainda mais competitivo, é fundamental aumentar a sensibilidade do CONNIE. Isso é possível agora graças ao desenvolvimento de um novo tipo de sensor conhecido como Skipper-CCD¹¹, que permite diminuir arbitrariamente o ruído eletrônico até outras fontes dominarem o ruído. Com os Skipper-CCD é possível baixar o ruído de leitura em uma ordem de grandeza em relação aos CCD utilizados em CONNIE. Este novo tipo de CCD já foi utilizado com sucesso na busca por matéria escura no experimento SENSEI¹². Como um passo inicial ao projeto de upgrade do experimento, em julho de 2021, dois sensores Skipper-CCDs foram instalados com o intuito de estudar o limiar de detecção e caracterizar o background irreduzível do experimento. Muitas outras técnicas de detecção apresentam às baixas energias um aumento do background medido que faz com que a sensibilidade para estes intervalos de energias se degrade. As primeiras medidas de background obtidas com sensores Skipper-CCDs mostram que, graças à grande resolução espacial e o baixíssimo ruído de leitura alcançado ($\sim 0.16 e^-$), somos capazes de identificar eventos falsos produzidos por defeitos do detector conseguindo um espectro bem uniforme em todo o intervalo de energia de interesse. Este estudo vai nos permitir realizar uma estimativa da massa necessária para a detecção do espalhamento elástico coerente entre o neutrino e os núcleos de silício.

Um novo conceito de placa com 16 Skipper-CCDs está sendo desenvolvido pelo grupo de Fermilab para o projeto Oscura¹³ (para a detecção direta de matéria escura), com participação

¹¹ Phys. Rev. Lett. 119, 131802 (2017), arXiv:1706.00028

¹² Phys. Rev. Lett. 121, 061803 (2018), arXiv:1804.00088; Phys. Rev. Lett. 122, 161801 (2019), arXiv:1901.10478

¹³ arXiv:2202.10518

muito ativa de membros do experimento CONNIE. Em vista dos excelentes resultados de performance obtidos, estamos planejando instalar algumas destas placas no CONNIE, para o final de 2022. Desta forma, esperamos alcançar uma massa da ordem de 200 g, a maior na história do experimento. Esta massa projetada será suficiente para poder medir com reator ligado (para detecção) e com reator desligado (para quantificar o background) para detectar o espalhamento coerente de neutrinos em cerca de 6 meses de funcionamento, e assim poder estudar as interações não padrão de neutrinos. O upgrade será novamente responsabilidade do grupo brasileiro.

Desta forma, esperamos poder continuar com a liderança do CONNIE como um experimento relevante para a física fundamental de partículas em nível global, contribuindo para o entendimento da física de neutrinos e a busca de física além do modelo padrão.

As seguintes publicações resultaram das análises de dados do experimento até o momento:

- A. Aguilar-Arevalo, et al. [CONNIE collaboration], *Results of the engineering run of the Coherent Neutrino Nucleus Interaction Experiment (CONNIE)*, JINST 11 (2016) 07024, arXiv: [1604.01343](https://arxiv.org/abs/1604.01343).
- A. Aguilar-Arevalo, et al. [CONNIE collaboration], *The CONNIE experiment*, J.Phys.Conf.Ser. 761 (2016) 1, 012057, arXiv: [1608.01565](https://arxiv.org/abs/1608.01565).
- A. Aguilar-Arevalo, et al. [CONNIE collaboration], *Exploring low-energy neutrino physics with the Coherent Neutrino Nucleus Interaction Experiment (CONNIE)*, Phys. Rev. D 100 (2019) 9, 092005, arXiv: [1906.02200](https://arxiv.org/abs/1906.02200).
- A. Aguilar-Arevalo, et al. [CONNIE collaboration], *Search for light mediators in the low-energy data of the CONNIE reactor neutrino experiment*, JHEP 04 (2020) 054, arXiv: [1910.04951](https://arxiv.org/abs/1910.04951).
- A. Aguilar-Arevalo, et al. [CONNIE collaboration], *Search for coherent elastic neutrino-nucleus scattering at a nuclear reactor with CONNIE 2019 data*, arXiv: [2110.13033](https://arxiv.org/abs/2110.13033), aceito para publicação em JHEP.

2. Participação brasileira

A colaboração internacional CONNIE conta com cerca de 35 membros de 13 instituições e 6 países: Argentina (Centro Atómico Bariloche-UNCUYO, Universidad de Buenos Aires, Universidad del Sur, Universidad Nacional de San Martín), Brasil (CBPF, UFRJ, CEFET-Angra,

UFABC, UFSCar), EUA (Fermilab), México (Universidad Nacional Autónoma de México), Paraguai (Universidad Nacional de Asunción) e Suíça (Universität Zürich).

A participação brasileira representa cerca de um terço dos membros e atualmente conta com os seguintes pesquisadores e estudantes, agrupados por instituição:

- CBPF: Herman Lima Jr, João dos Anjos (bolsista CNPq nível 1B), Martín Makler (CNPq nível 1D e Faperj CNE) - pesquisadores;
- CEFET-Angra: Aldo Rosado Fernandes Neto - pesquisador;
- UFABC: Laura Paulucci (CNPq nível 2) - pesquisadora;
- UFRJ: Carla Bonifazi (CNPq nível 2), Irina Nasteva (CNPq nível 2), Philipe Mota - pesquisadores, Katherine Maslova, Pedro Zilves - alunos de mestrado, Ana Oliveira, Patrick Lemos - alunos de iniciação científica;
- UFSCar: Franciole Marinho (CNPq nível 2) - pesquisador.

O grupo brasileiro em CONNIE participa do experimento desde o início do seu planejamento em 2011, e tem crescido com o tempo. A participação atual abrange todas as etapas experimentais, como detalhado na próxima seção.

3. Responsabilidades dos grupos brasileiros

O grupo brasileiro participa muito ativamente de todas as etapas do experimento. Em linhas gerais as responsabilidades vão desde a instalação e operação do experimento até os níveis mais avançados de análise de dados e simulações.

Pelo fato do experimento se encontrar no Brasil, somos responsáveis pelas relações institucionais com a Eletronuclear, canalizadas pelo CBPF. Temos um grupo de pesquisadores do CBPF, da UFRJ e do CEFET que têm treinamento outorgado pela Eletronuclear para poder acessar o experimento (contêiner de neutrinos) sem a necessidade de ser escoltado por pessoal da Eletronuclear. Somos responsáveis por executar todas as tarefas de instalação no experimento e manutenção das operações do detector e também do laboratório de neutrinos. A UFRJ tem o papel formal de Coordenação de Operações dentro da colaboração.

Em 2021 realizamos um upgrade com a instalação de dois sensores novos de Skipper-CCDs que ficou 100% coordenada e executada pela equipe brasileira. A instalação consistiu não só na abertura do experimento para a instalação dos novos sensores, mas também na

substituição da eletrônica existente por uma especialmente desenhada para a leitura dos Skipper CCDS (LTA, *low threshold acquisition controller*). A integração da eletrônica antes de ser levada ao experimento foi feita no CBPF, onde também foi testada. Além disso, o CBPF teve a responsabilidade do desenho, construção e comissionamento da placa VIB (*vacuum interface board*) que é responsável por transportar os sinais do interior da câmara de vácuo onde estão os detectores com as placas de aquisição LTA no exterior.

A responsabilidade pela aquisição de dados e o controle da qualidade dos mesmos ficam, principalmente, sob a responsabilidade da UFRJ e CEFET. Isso inclui o monitoramento contínuo dos parâmetros de operação do experimento e da qualidade e estabilidade das características (ganho, ruído de leitura, etc.) dos sensores, e intervenções pontuais em casos de problemas técnicos ou de qualidade. A UFRJ coordena os turnos de monitoramento dentro da colaboração, onde cada turno dura uma semana e é realizado por um *shifter* designado.

O grupo do CBPF é responsável pela transferência e armazenamento dos dados do experimento, além do gerenciamento do cluster e dos serviços associados que são usados para o processamento, armazenamento e distribuição dos dados de neutrinos.

Em relação à análise dos dados, o grupo da UFRJ tem a responsabilidade dentro da colaboração da coordenação da análise desde o tratamento das imagens e determinação da qualidade dos dados, passando pela calibração, seleção dos dados até a determinação do espectro de energia final. O grupo tem produzido vários códigos de análise e tratamento de dados, que têm sido incorporados para uso pela colaboração. O grupo brasileiro tem contribuído a todas as publicações da colaboração. O último artigo, recém aceito para ser publicado na revista JHEP, foi coordenado pela UFRJ em colaboração com o grupo de Bariloche, Argentina.

Recentemente têm ingressado na colaboração pesquisadores especialistas em simulações de detectores da UFABC e UFSCar que estão desenvolvendo uma cadeia completa de simulações da resposta do detector com GEANT4. Até o momento, algumas simulações gerais foram feitas na colaboração, mas não temos uma cadeia completa de simulações. Os pesquisadores da UFABC e UFSCar pretendem desenvolver em simulação a descrição completa do experimento, sua blindagem, condições e respostas do detector.

Atualmente, estamos analisando e produzindo os resultados científicos relacionados com os novos sensores Skipper-CCDs instalados em 2021, que têm mostrado uma excelente

performance. O grupo da UFRJ está coordenando este estudo e planejando uma publicação nos próximos 6 meses.

Em termos de instrumentação, o grupo da UFRJ está montando no laboratório LAPE-UFRJ uma bancada dedicada a testes e caracterização de Skipper-CCDs e sua eletrônica, contendo uma câmara de vácuo, sistemas de vácuo e resfriamento por nitrogênio líquido e eletrônica LTA de leitura. Planejamos completar a montagem e comissionamento da bancada para realizar testes de caracterização dos novos detectores Skipper-CCDs antes de instalá-los no experimento. Além da contribuição direta ao upgrade, a bancada de testes de CCDs servirá para transferir conhecimento sobre esta tecnologia de ponta ao Brasil e para formar novos especialistas em instrumentação entre estudantes e pesquisadores.

O grupo brasileiro tem tido um papel importante na arrecadação de recursos para o experimento. O CONNIE foi principalmente construído com fundos internacionais (EUA e México) e nacionais, FAPERJ, utilizados para a blindagem, instalação e operação. No momento, temos vigentes dois projetos FAPERJ para manutenção do experimento e compra de alguns equipamentos para instalação dos Skipper-CCDs protótipos (~R\$300k) que já foram amplamente utilizados. Recentemente, recebemos recursos do CNPq (R\$42k) para a compra da eletrônica de controle dos sensores protótipos instalados no experimento e para a bancada de teste, contando com a contrapartida de Fermilab para os sensores Skipper-CCDs. Temos também um projeto Universal do CNPq recém aprovado para o upgrade do experimento (R\$96k). Atualmente os custos de manutenção do experimento são cobertos quase inteiramente pelos projetos de financiamento brasileiros.

O grupo brasileiro atua também na formação de recursos humanos, com um projeto de mestrado já concluído no CBPF (“*An independent event identification pipeline for the CONNIE experiment*” de Iruatã Martins, orientado por Martín Makler) e outros dois em andamento na UFRJ, com temas relacionados à bancada de testes e à análise de dados de Skipper-CCDs, além de três projetos de iniciação científica na UFRJ. Temos realizado várias visitas científicas de pesquisadores do grupo ao Fermilab. Somos ativos na organização e participação de eventos e escolas de física experimental de neutrinos, tais como a primeira *School on Dark Matter and Neutrino Detection* em 2018.