

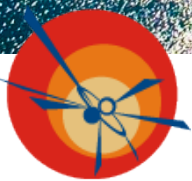
Coherent Neutrino-Nucleus Interaction Experiment

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



Irina Nasteva (UFRJ)

em nome do grupo brasileiro
da colaboração CONNIE



Workshop RENAFAE 2022
25 de Abril de 2021

Agradecimentos:



Apresentação



- CONNIE é um experimento internacional de física de neutrinos, operando adjacente ao reator de Angra 2.
- O grupo brasileiro representa 1/3 da colaboração e tem grandes contribuições.
- Estamos pleiteando **APOIO da RENAFAE** ao grupo brasileiro do CONNIE.

Plano da apresentação:

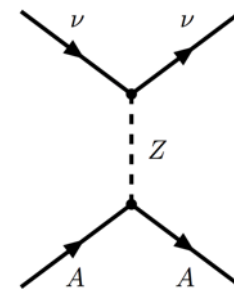
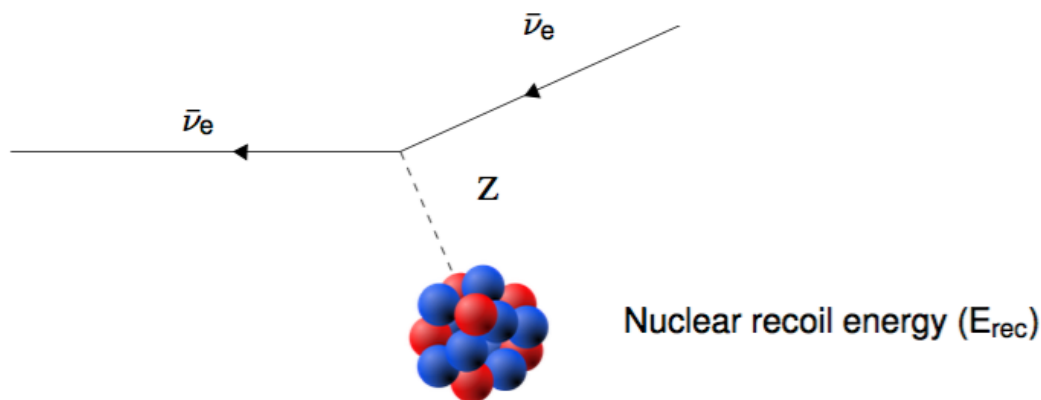
- A física do espalhamento elástico neutrino-núcleo e buscas além do MP.
- O experimento e detector CONNIE.
- Principais resultados.
- Grupo brasileiro e suas contribuições.
- Perspectivas.



Espalhamento elástico νN



- No processo de espalhamento elástico neutrino-núcleo (*Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering* ou *CE ν NS*), o neutrino se espalha do núcleo como um todo.
- Previsto no Modelo Padrão em 1974. D. Freedman, Phys.Rev. D 9 1389 (1974)
- Descoberto pelo experimento COHERENT em 2017 com neutrinos de $E_\nu \sim 20$ MeV usando um detector CsI e mais tarde LAr. Science 357, 1123, 2017
PRL, 126, 012002, 2021



$$\frac{d\sigma}{dE_{rec}}(E_{\bar{\nu}_e}, E_{rec}) = \frac{G_F^2}{8\pi} [Z(4 \sin^2 \theta_W - 1) + N]^2 \times M \left(2 - \frac{E_{rec} M}{E_{\bar{\nu}_e}^2}\right) |f(q)|^2$$

- O fator de forma nuclear $f(q) \approx 1$ para baixas energias: $E_\nu < 50$ MeV.
- A seção de choque total é $\approx 4.22 \times 10^{-45} N^2 E_\nu^2 \text{ cm}^2$ ($N = 14$ para Si).
- Neutrinos de reator com $E_\nu \sim 1$ MeV podem explorar nova física a baixas energias.

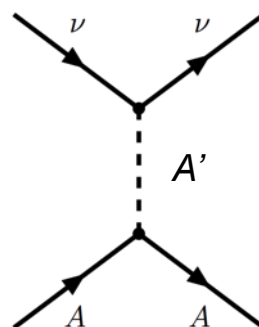
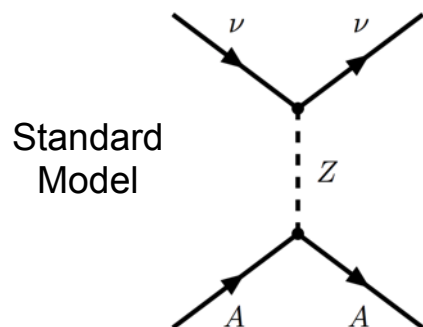


Nova física com neutrinos



- As taxas do espalhamento coerente são calculadas com precisão no Modelo Padrão.
- Qualquer discrepância poderia vir de contribuições de **novas interações além do MP**:
 - Interações Não-Padrão de neutrinos (e.g. dark photons).
 - Neutrinos estéreis leves.
 - Neutrinos com momento magnético.
 - Neutrinos com milicarga.

Y. Farzan et al, JHEP 05 (2018) 066
 D.K. Papoulias et al, Front. Phys. 7 (2019) 191
 J. Dent et al, PRD 96 (2017) 095007
 T. Kosmas et al, PRD 96 (2017) 063013
 O. Miranda et al, JHEP 07 (2019) 103
 O. Parada, Adv. HEP 2020 (2020) 5908904



- Também é importante para as buscas diretas por Matéria Escura e para a física de supernovas.
- Medida do ângulo de mistura fraca.
- Uma vez estabelecida a detecção, poderá ser usado para criar detectores compactos para monitoramento de reatores.

B. Cañas et al, PLB 784 (2018) 159
 G. Fernandez-Moroni et al, JHEP 03 (2021) 186
 B. Cogswell, P. Huber, Science and Global Security 24, 2 (2016) 114



O experimento CONNIE



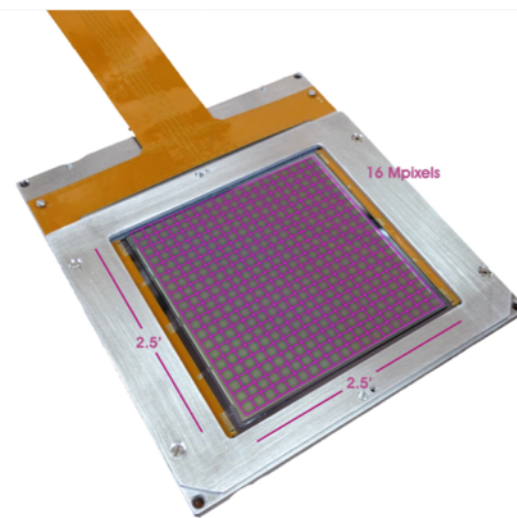
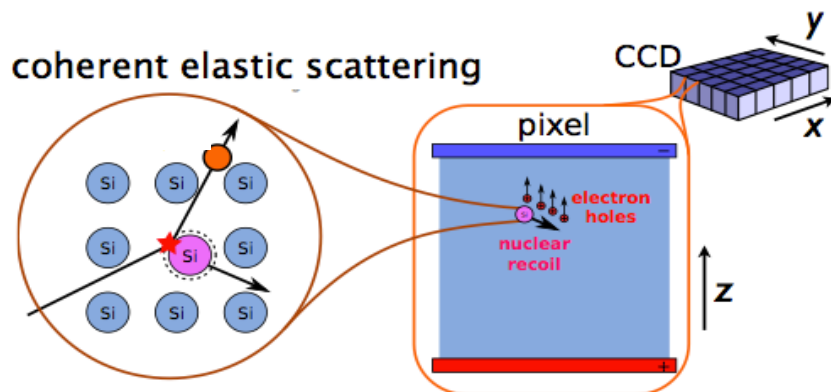
- O principal objetivo é detectar o espalhamento elástico coerente de antineutrinos de reator em núcleos de silício e colocar limites em modelos além do Modelo Padrão.

- As energias de recuo do núcleo são baixas ($E_{\text{rec}} \sim \text{keV}$).

$$\langle E_r \rangle = \frac{2}{3} \frac{(E_\nu / \text{MeV})^2}{A} \text{keV}$$

- E os sinais de ionização são uma fração de E_{rec} (*quenching factor*).

- O alvo da interação e o detector são CCDs de silício.
- 2016 – 2021: 8 CCDs científicos de 4k x 4k pixels, alta resistividade e grande espessura (675 μm , 5.75 g massa), criados no LBNL e usados também por DES e DAMIC.
- Muito baixo limiar de detecção (~ 40 eV) e baixo ruído.





O experimento CONNIE

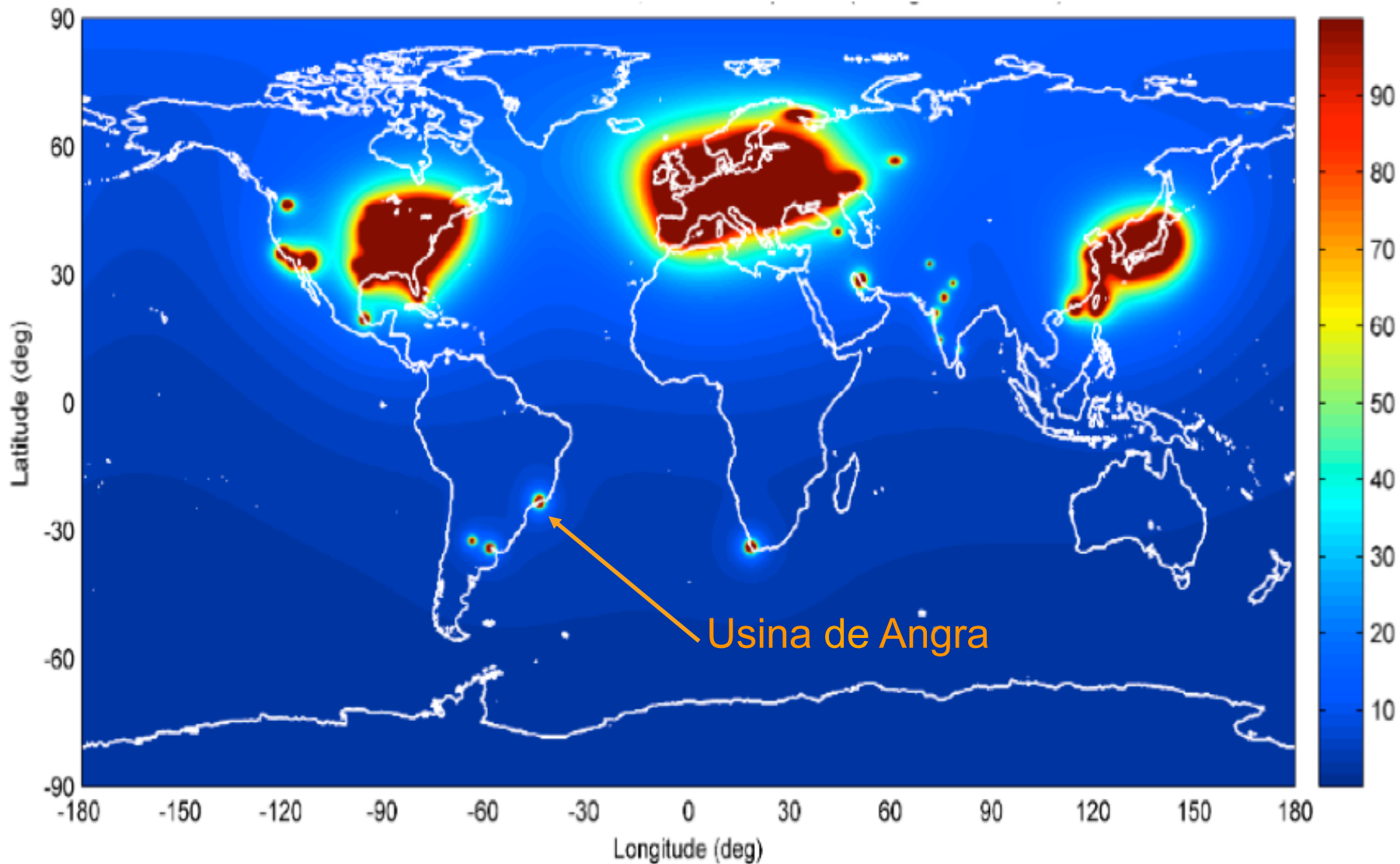


- CONNIE está instalado adjacente ao reator de Angra 2 na usina nuclear Almirante Álvaro Alberto, RJ.





Antineutrinos de reatores

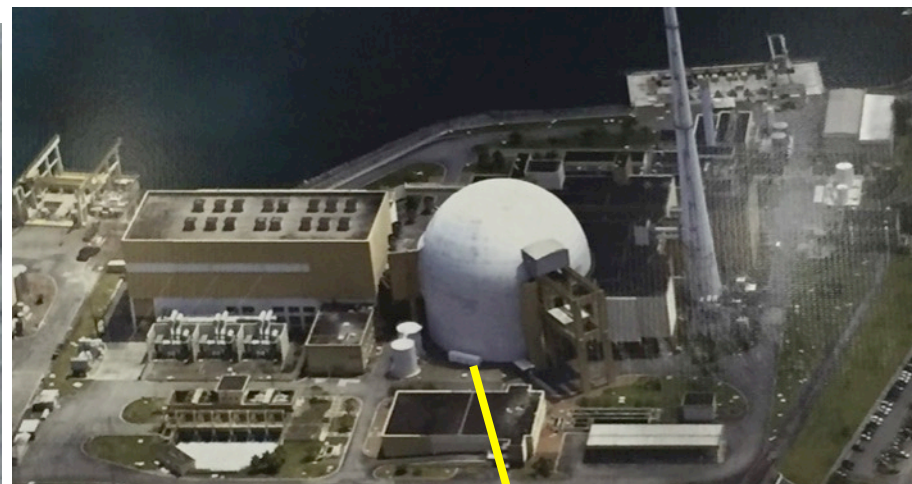




O experimento CONNIE

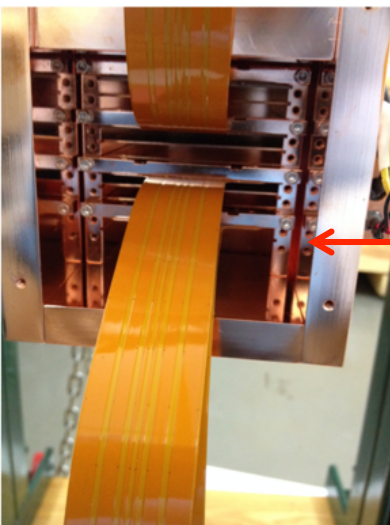


- Localizado a ~30 m do núcleo do reator Angra 2 com 3.8 GW_{th}.
- Laboratório compartilhado com o experimento Neutrinos Angra.
- Fonte de antineutrinos com fluxo de $7.8 \times 10^{12} \bar{\nu} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ na posição do detector.





O detector CONNIE



Instalado em 2014
Upgrade em 2016
Upgrade em curso 2021

← CCDs in
copper box

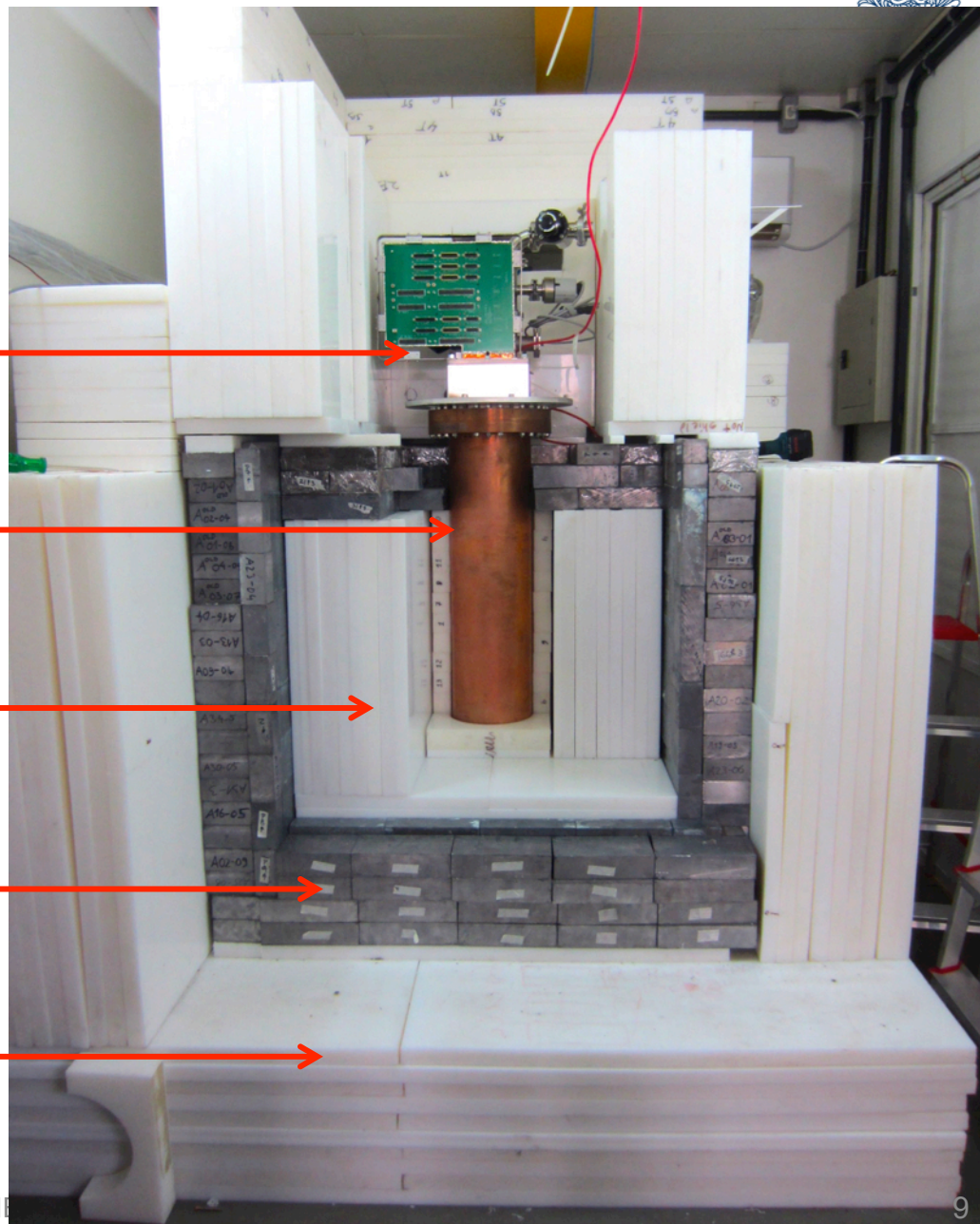
← ViB readout board
(signal transport)

← Dewar
(vacuum)

← Inner Polyethylene – 30 cm
(neutrons)

← Lead – 15 cm
(gamma)

← Outer Polyethylene – 30 cm
(neutrons)



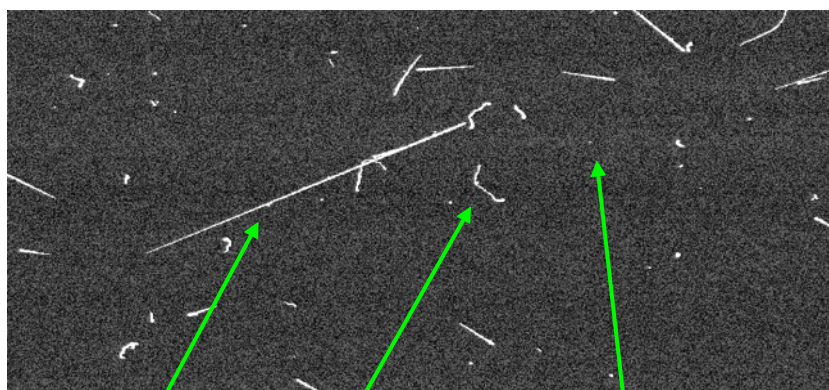


Reconstrução de eventos



- Identificar traços baseado na geometria.
- Calibração de energia in situ usando raios-x de fluorescência do cobre.
- Calibração da profundidade vs largura de difusão usando múons cósmicos.
- Monitoramento da estabilidade dos backgrounds, ruído e corrente escura.
- Seleção de neutrinos de baixa energia baseada em teste de verossimilhança.

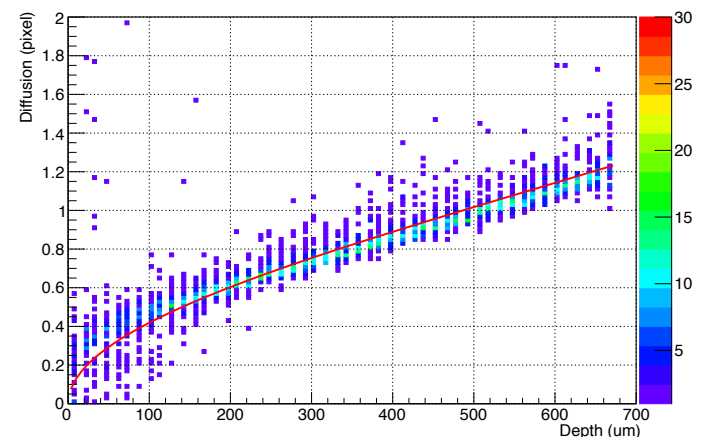
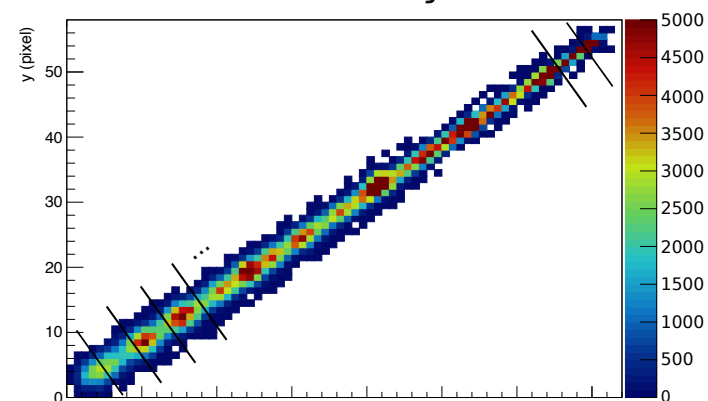
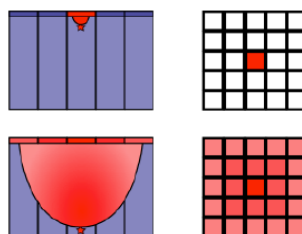
Phys. Rev. D 100 (2019) 092005



muon

electron

diffusion-limited hits
photons/neutrinos

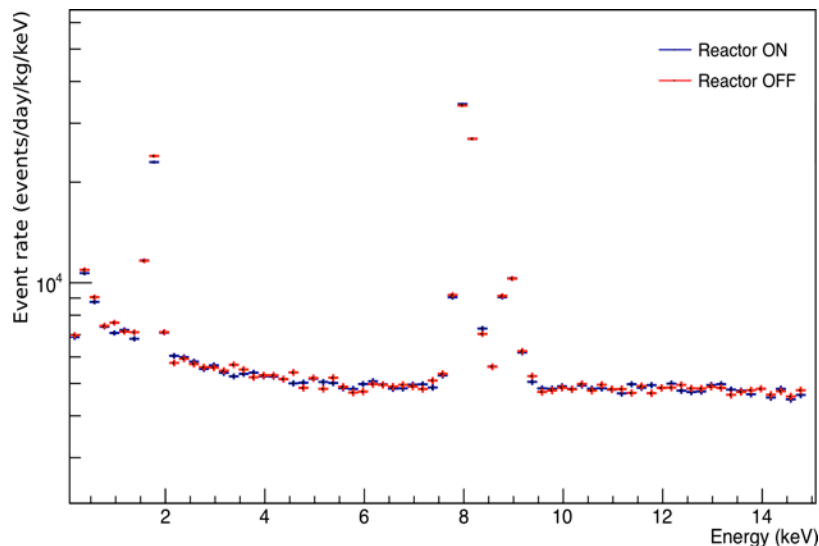




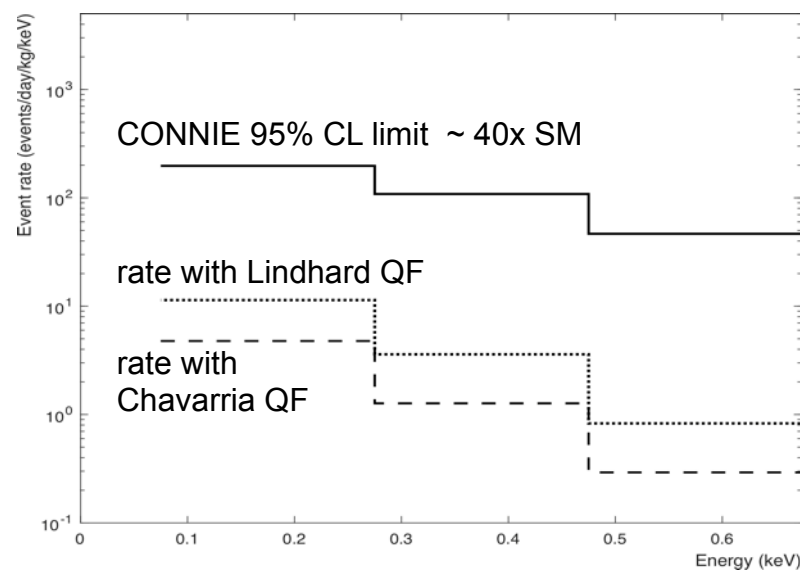
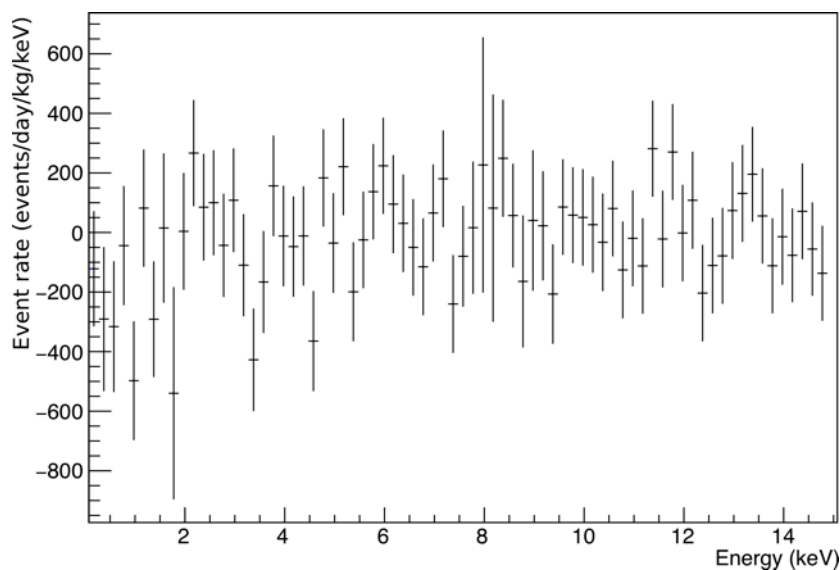
Resultados de 2016-18



Phys. Rev. D 100 (2019) 092005



- 2016-18 run com massa ativa 47.6 g.
- Espectros de energia com reator on (2.1 kg-day) vs reator off (1.6 kg-day).
- Um limite superior é colocado na taxa de interações coerentes, comparada à taxa esperada de *quenching*.

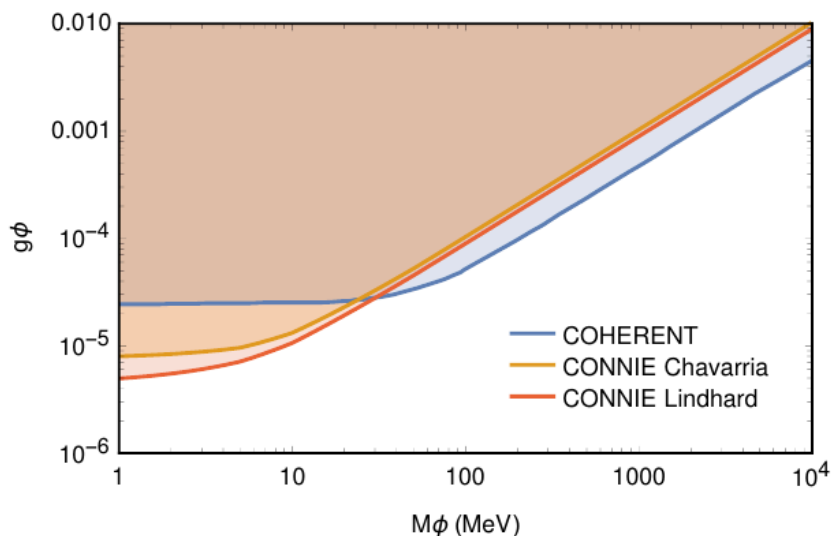




Limites a interações não padrão



JHEP 04 (2020) 054



- A taxa de eventos no bin de mais baixa energia leva a limites em modelos de interações não padrão de neutrinos com:
 - Mediador vetorial leve (Z').

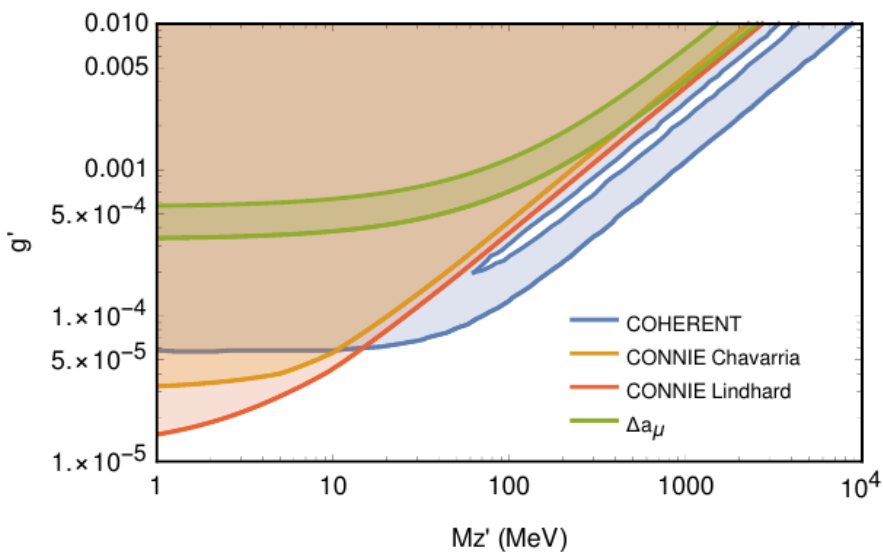
$$\frac{d\sigma_{SM+Z'}}{dE_R}(E_{\bar{\nu}_e}) = \left(1 - \frac{Q_{Z'}}{Q_W}\right)^2 \frac{d\sigma_{SM}}{dE_R}(E_{\bar{\nu}_e})$$

$$Q_{Z'} = \frac{3(N+Z)g'^2}{\sqrt{2}G_F(2ME_R+M_{Z'}^2)}$$

- Mediador escalar leve (ϕ).

$$\frac{d\sigma_{SM+\phi}}{dE_R}(E_{\bar{\nu}_e}) = \frac{d\sigma_{SM}}{dE_R}(E_{\bar{\nu}_e}) + \frac{G_F^2}{4\pi} Q_\phi^2 \left(\frac{2ME_R}{E_{\bar{\nu}_e}^2}\right) MF^2(q)$$

$$Q_\phi = \frac{(14N+15.1Z)g_\phi^2}{\sqrt{2}G_F(2ME_R+M_\phi^2)}$$



- **Melhores limites mundiais para baixas massas $M_{Z'}, (M_\phi) < 10$ (30) MeV.**
- **Primeiros limites competitivos em física além do MP de experimento de CEνNS em reator.**



Resultados de 2019

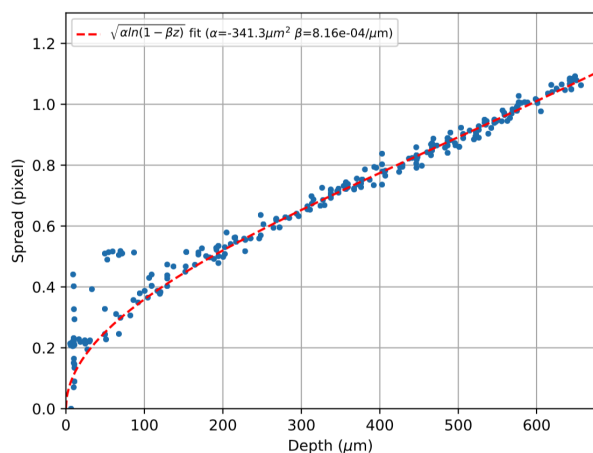


Melhorias na aquisição e análise em 2019:

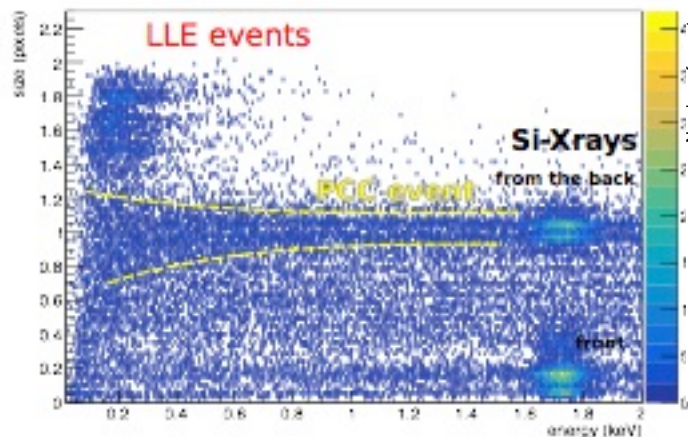
- 1x5 pixel hardware rebinning reduz o ruído de leitura.
- Reduzido tempo de exposição (3 -> 1 hora) reduz a corrente escura.
- Melhor calibração de energia e largura-vs-profundidade.
- Caracterização e redução do background a baixas energias:
 - Eventos largos de baixa energia;
 - Camada de coleção parcial das cargas.
- Análise “cega” e múltiplas verificações.

arXiv: 2110.13033
Accepted by JHEP

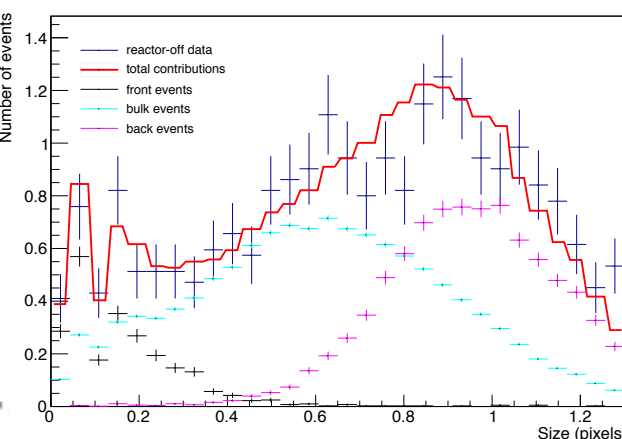
NEW



Size-depth calibration from muons



Large-size low energy events from high-energy tails and inactive volume are excluded.



Partial-charge-collection layer at the back of the sensor

G. Fernandez-Moroni et al,
PRApplied 15 (2021), 6 064026



Resultados de 2019



Melhorias na aquisição e análise em 2019:

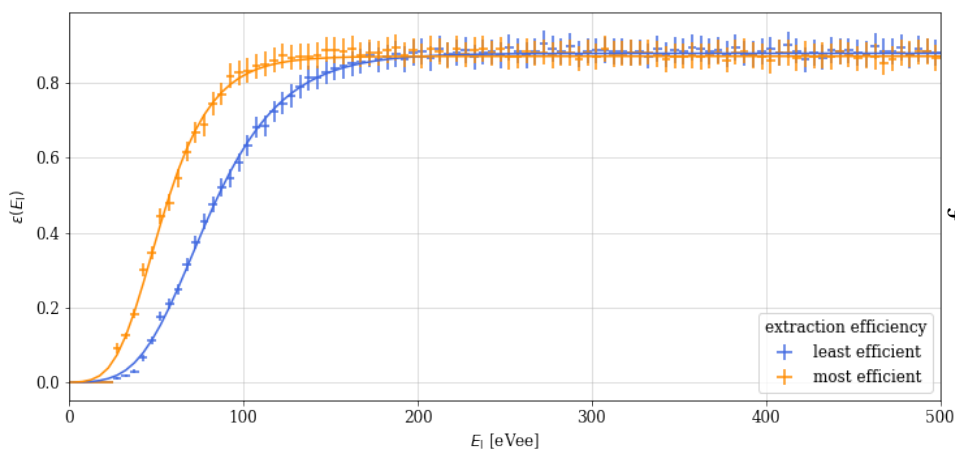
- Melhor aceitação do detector e eficiência de seleção a baixa E.
- Limiar de detecção reduzido a ~40 eV.
- Eficiência plena alcançada a 100-150 eV.

arXiv: 2110.13033
Accepted by JHEP

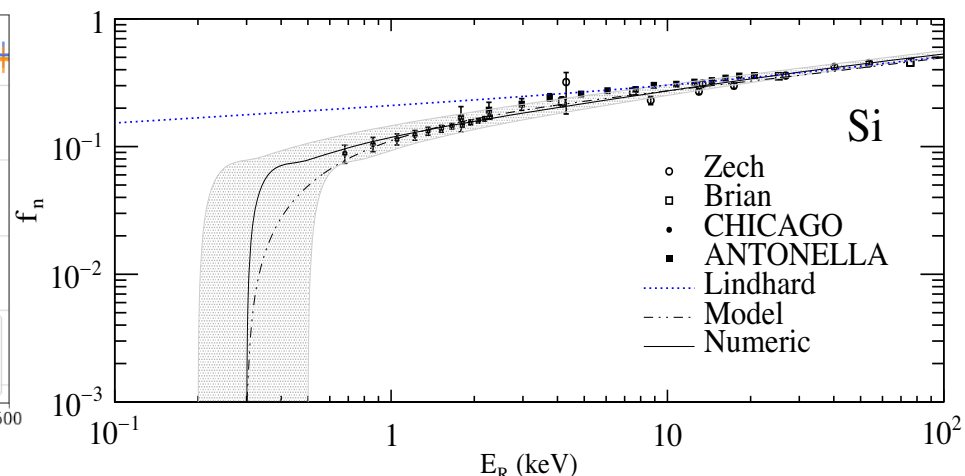
Novo modelo de Sarkis para o *quenching factor* de eficiência de ionização a baixas energias.

NEW

Y. Sarkis et al, PRD 101 (2020) 10 102001



Acceptance for most and least efficient CCDs



Sarkis quenching factor model for Si



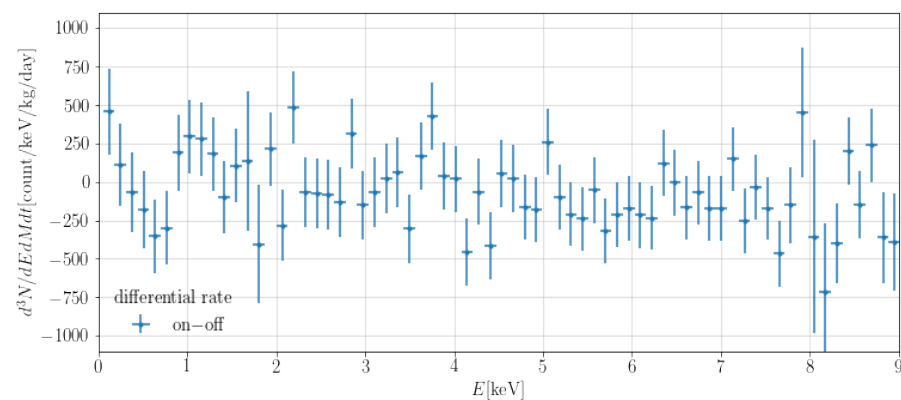
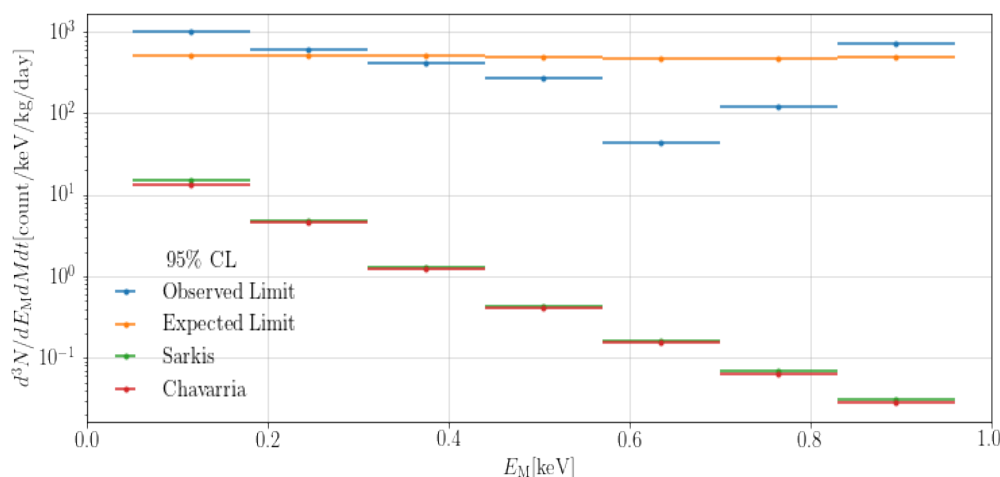
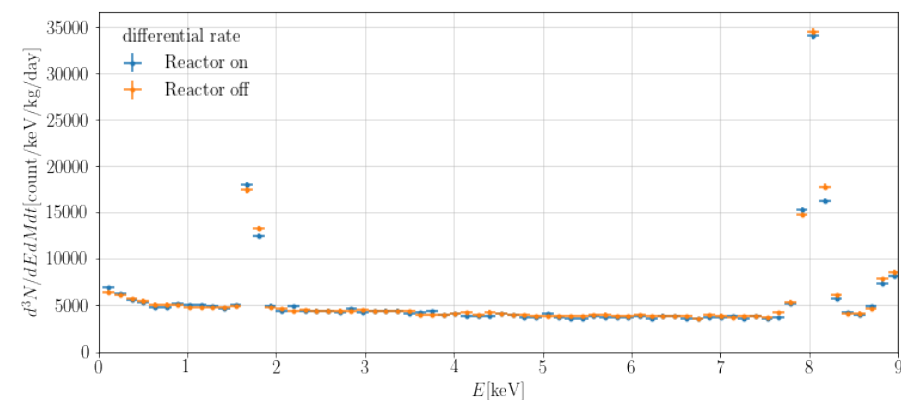
Resultados de 2019



- Dados de 8 CCDs com massa ativa total de 44.48 g.
- Exposição 31.85 dias com reator on e 28.25 dias com reator off.
- Exposição total 2.7 kg-dias.

arXiv: 2110.13033
Accepted by JHEP

NEW



On - Off rates

- Limite esperado no primeiro bin é 34x (39x) a taxa prevista com quenching factor de Sarkis (Chavarria).
- Limite observado no primeiro bin é 66x (75x) a taxa prevista com quenching factor de Sarkis (Chavarria).



A colaboração CONNIE



COherent Neutrino-Nucleus Interaction Experiment

~35 membros



Argentina

Centro Atómico Bariloche
Universidad de Buenos Aires
Universidad del Sur / CONICET



Paraguay

Universidad Nacional de Asunción



Brasil

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
Universidade Federal do Rio de Janeiro
CEFET - Angra
Universidade Federal do ABC
Universidade Federal de São Carlos



Suíça

University of Zurich



México

Universidad Nacional Autónoma de México



EUA

Fermilab National Laboratory



O grupo brasileiro



- CBPF:
 - Herman Lima Jr, João dos Anjos, Martín Makler
- UFRJ:
 - Carla Bonifazi, Irina Nasteva, Philipe Mota
 - Katherine Maslova, Pedro Zilves (mestrado)
 - Ana Oliveira, Patrick Lemos (iniciação científica)
- CEFET – Angra:
 - Aldo Fernandes
- UFABC:
 - Laura Paulucci
- UFSCar:
 - Franciole Marinho



CBPF



UFRJ



CEFET/RJ



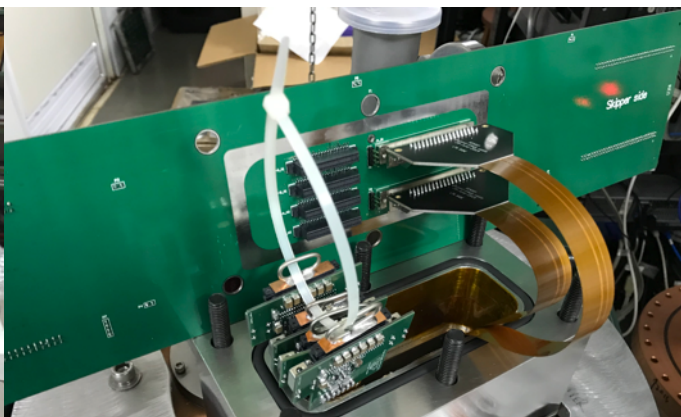
Representamos um terço da colaboração CONNIE e atuamos fortemente em todas as etapas do experimento.



Responsabilidades do grupo



- Relações institucionais com a Eletronuclear: **CBPF**.
- Instalação, manutenção e operações: **CBPF, UFRJ, CEFET**.
 - ✓ Instalação do *Upgrade* em 2021 coordenada e executada pelo grupo brasileiro.
 - ✓ Intervenções de serviço e manutenção do detector.
 - ✓ Papel formal de Coordenação de Operações.
- Desenvolvimento e testes de eletrônica para o detector: **CBPF**.
 - ✓ Desenho, construção e comissionamento da nova placa *Vacuum Interface Board*.
 - ✓ Testes e integração da eletrônica de leitura de Skipper CCDs *Low Threshold Acquisition controller* antes da instalação.

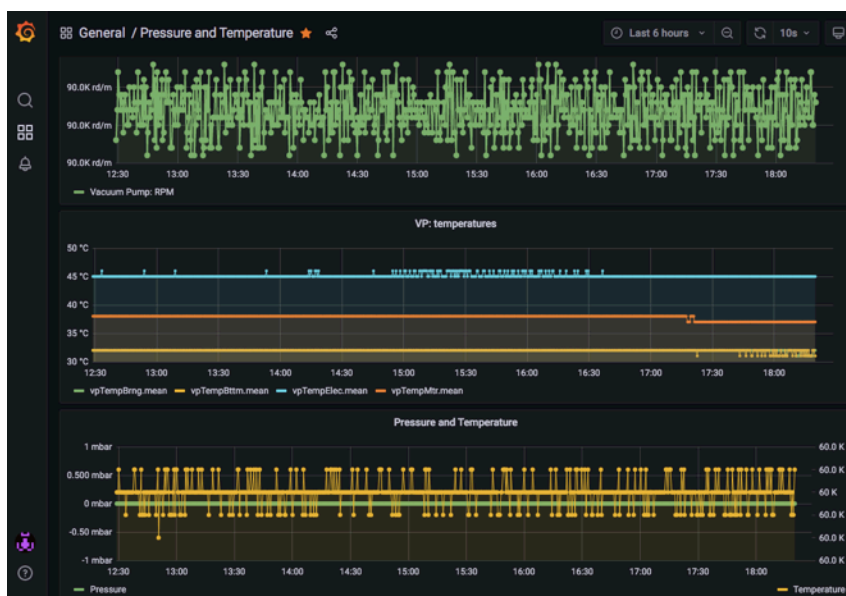




Responsabilidades do grupo



- Aquisição de dados, monitoramento e controle da qualidade: [UFRJ](#), [CEFET](#).
 - ✓ Contínua aquisição de dados e monitoramento da qualidade e estabilidade das características (ganho, ruído de leitura, etc.) dos sensores.
 - ✓ Intervenções em caso de problemas.
 - ✓ Organização de plantões de monitoramento na colaboração.
- Transferência, armazenamento e processamento de dados: [CBPF](#).
 - ✓ Transferência e armazenamento dos dados do experimento (86 TB em disco).
 - ✓ Gerenciamento do cluster e serviços associados para o processamento.



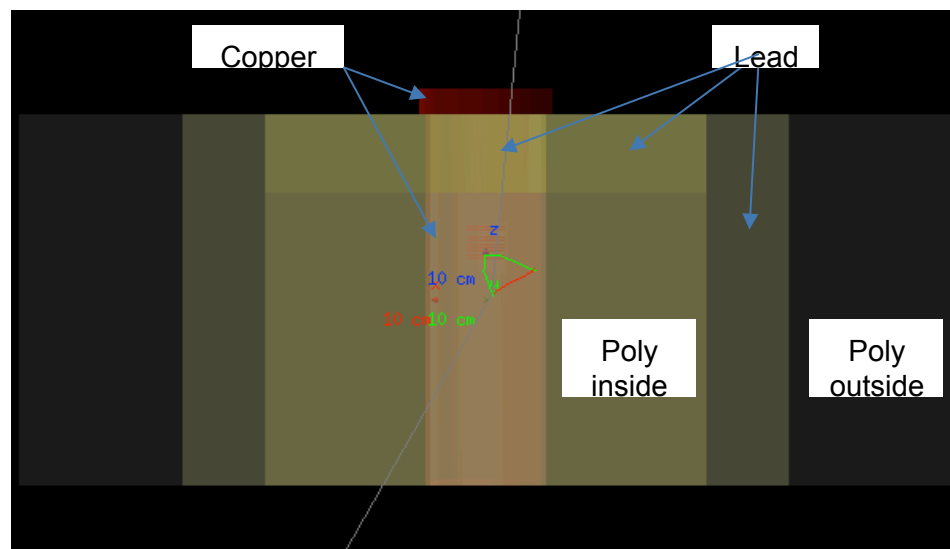
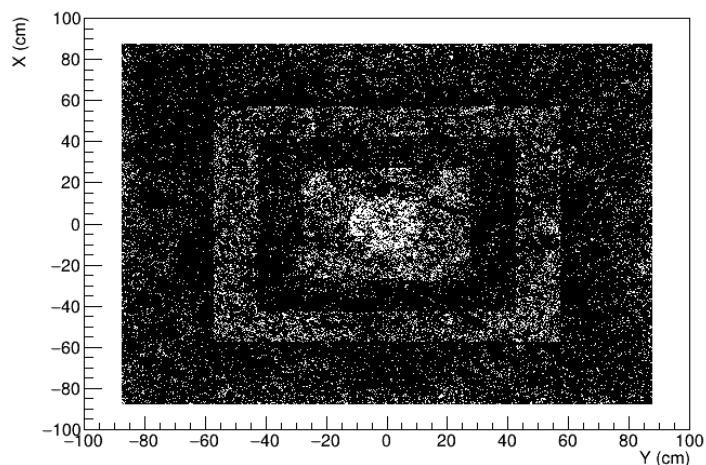
CHE cluster
no CBPF



Responsabilidades do grupo



- Análise de dados: [UFRJ](#).
 - ✓ Coordenação da análise de dados dentro da colaboração.
 - ✓ Tratamento das imagens, determinação da qualidade, calibração, até seleção de neutrinos e espectro final.
 - ✓ Códigos de análise e tratamento de dados incorporados na colaboração.
 - ✓ Coordenação do último artigo, junto com o grupo de Bariloche.
 - ✓ Atualmente trabalhando na análise dos dados de Skipper-CCDs de 2021.
- Simulação: [UFABC](#), [UFSCar](#).
 - ✓ Desenvolvimento de uma cadeia completa de simulações da resposta do detector com GEANT4.

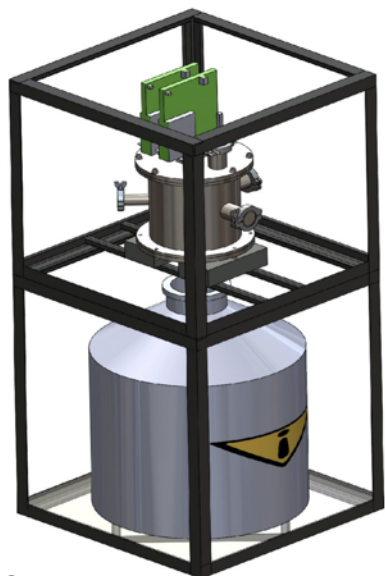




Responsabilidades do grupo



- Caracterização e testes de Skipper-CCDs: [UFRJ](#).
 - ✓ Bancada dedicada a testes e caracterização de Skipper-CCDs e sua eletrônica.
 - ✓ Câmara de vácuo, sistemas de vácuo e resfriamento por LN e eletrônica LTA.
 - ✓ Novos detectores Skipper-CCDs serão caracterizados antes de instalá-los no experimento.
- Arrecadação de recursos para o experimento: [todos](#).
 - ✓ Projetos de FAPERJ e CNPq.



Desenho IB-CAB -
Experimento DM2



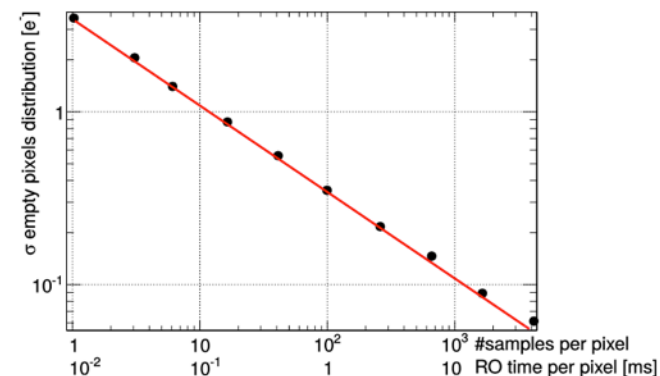


Perspectivas: Skipper-CCDs

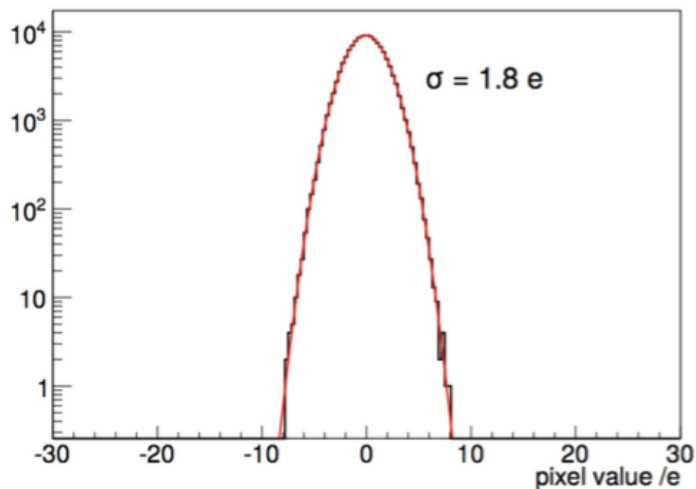


- Os sensores Skipper-CCD oferecem a perspectiva para alcançar energias muito baixas:
 - Medida repetida não destrutiva da carga.
 - Grande redução no ruído eletrônico de leitura.
 - Detecção de elétrons individuais.
- Tecnologia promissora para detecção de DM e neutrinos
 - Experimentos OSCURA, SENSEI, DAMIC-M...
 - Ótica quântica, astronomia, física nuclear.

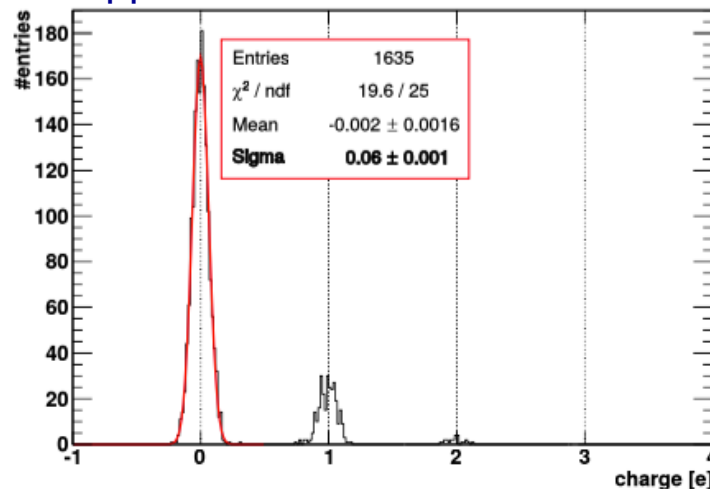
J. Tiffenberg et al, PRL 119 (2017)



CONNIE atual



Skipper-CCD 4000 samples

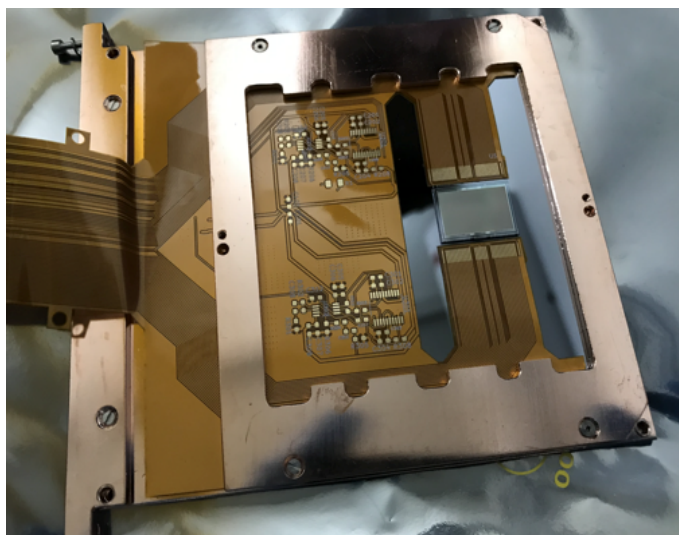




CONNIE com Skipper-CCDs



- Dois sensores Skipper-CCD foram instalados no detector CONNIE em Julho de 2021.
 - 0.5k x 1k pixels cada, 675 μm espessura, 0.4 g massa total.
 - Nova eletrônica de leitura LTA. G. Cancelo et al, JATIS 7 (2021), 1 015001
 - Nova placa *Vacuum Interface Board*, desenvolvida no CBPF.





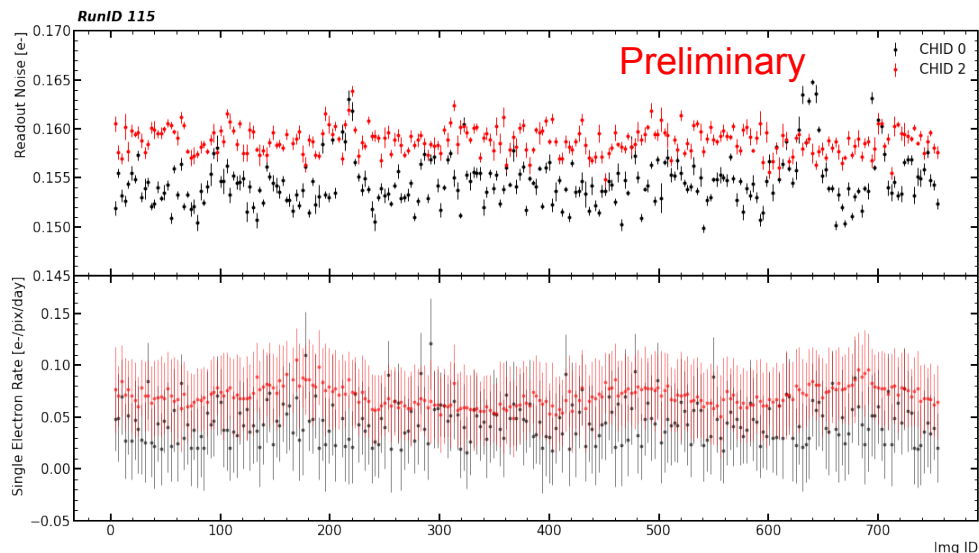
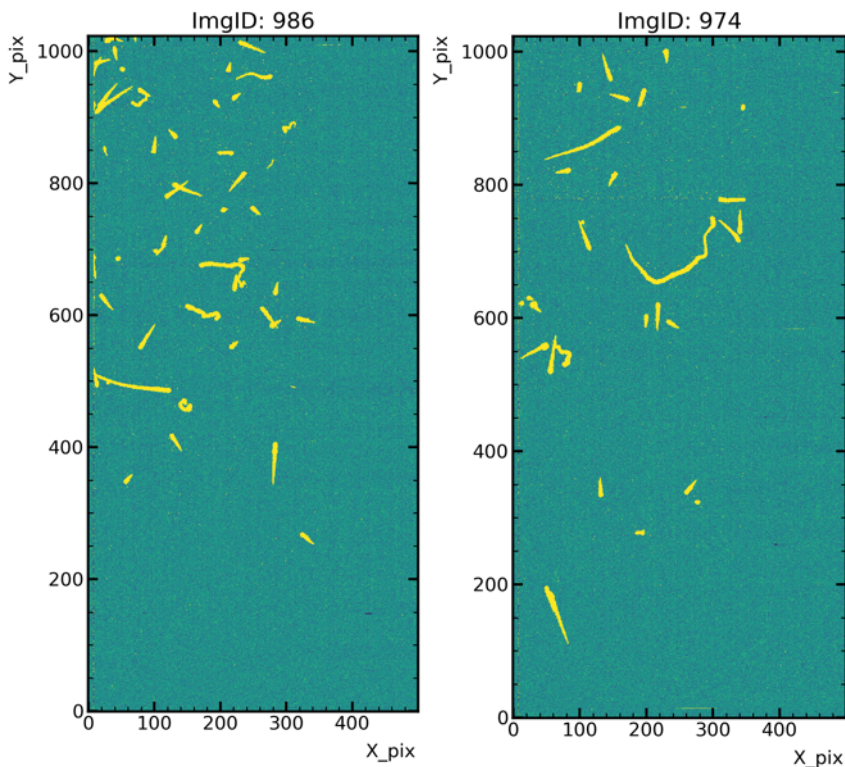
Análise com Skipper-CCDs



- Tomando dados desde Julho de 2021 para caracterizar a performance e o background dos novos sensores Skipper-CCD.
 - Testes da aquisição LTA e modos de leitura.
 - Medidas de ruído e corrente escura.

NEW
Preliminary

Images with 400 samples



Preliminary
Readout noise = 0.16 e-
Single-electron rate = 0.08 e-/pix/day

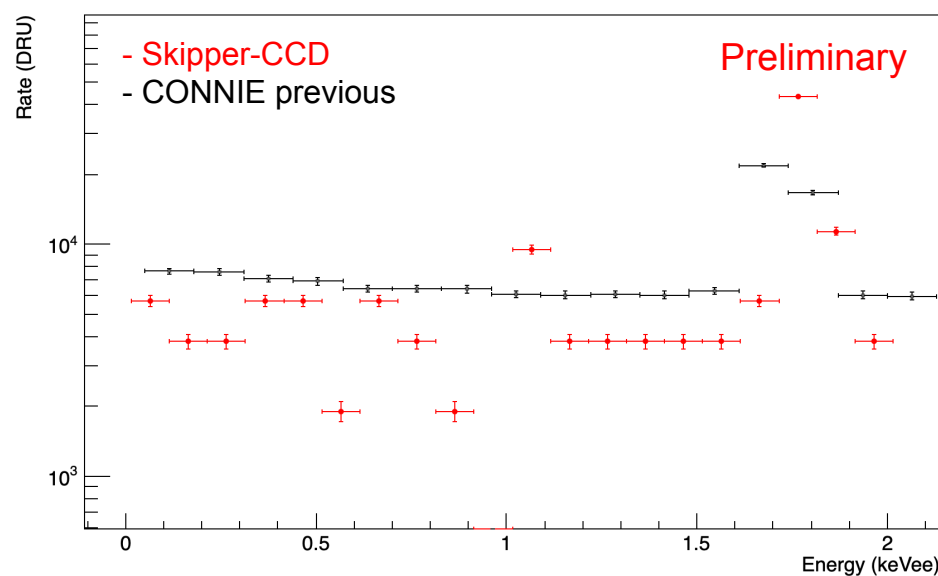
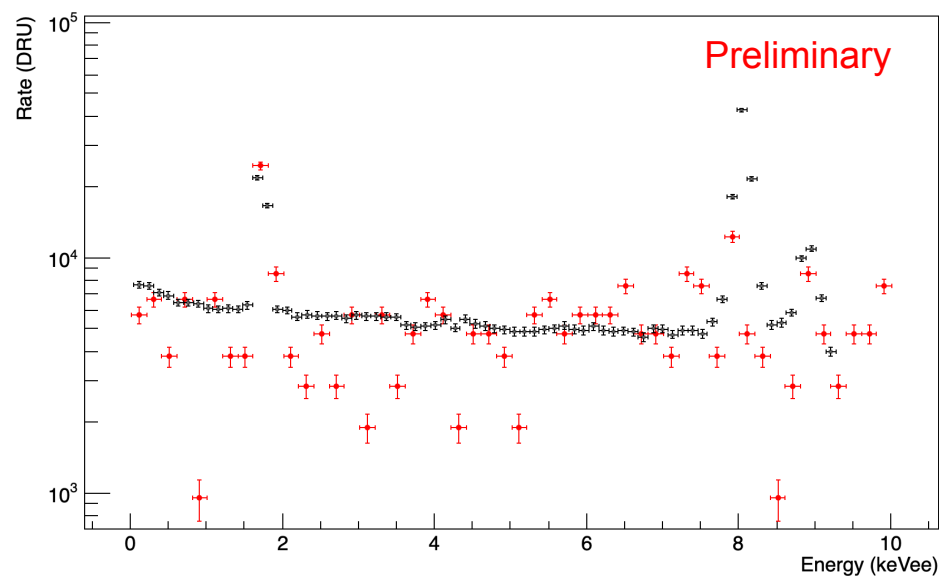
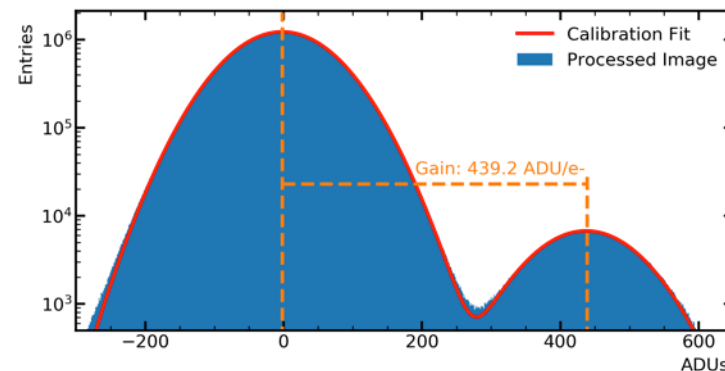


Análise com Skipper-CCDs



- Tomando dados desde Julho de 2021 para caracterizar a performance e o background dos novos sensores Skipper-CCD.
 - Calibração de energia.
 - Seleção e espectro do background.

NEW
Preliminary

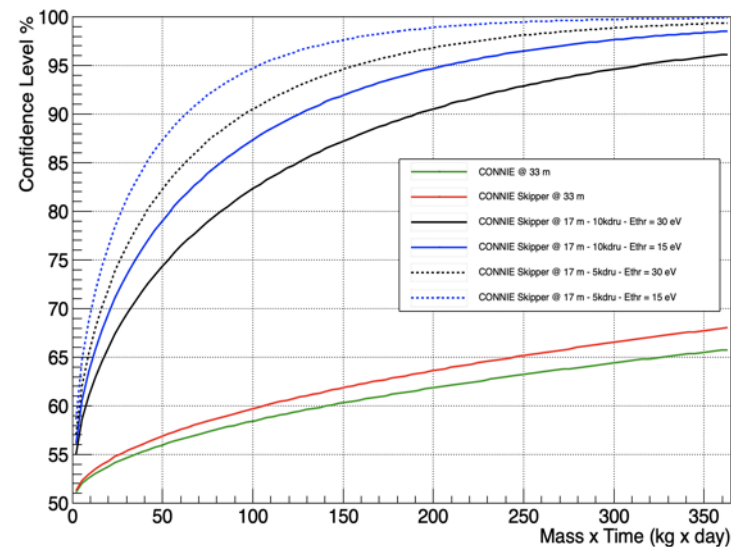




Planos para CONNIE

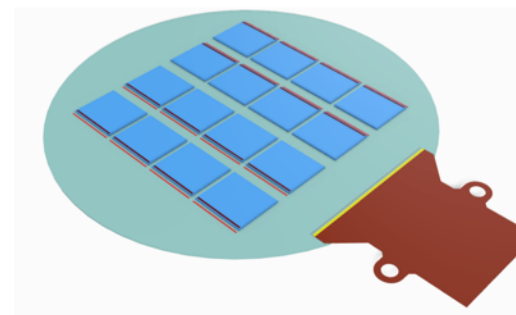


- Para aumentar a sensibilidade e alcançar a detecção do espalhamento coerente de neutrinos, precisamos de:
 - ✓ Menor ruído e limiar de detecção, e/ou
 - Maior massa, e/ou
 - Maior fluxo de neutrinos.
- Preencher o detector com Skipper-CCDs:
 - Estratégia das medidas.
 - Redesenho da blindagem.
 - Nova placa *Vacuum Interface Board*.
- Aumento do fluxo de neutrinos e redução do background:
 - Estudos da possibilidade de colocar o detector mais perto do reator e conversas com Eletronuclear.



Skipper-CCD sensor

6k x 1k (SENSEI)



Oscura - arranjo de 16
skippers de 1k x 1k



Conclusão



- CONNIE é o experimento de espalhamento coerente de neutrinos de reator com maior sensibilidade atualmente.
- Obteve os limites mais restritivos em modelos além do Modelo Padrão em baixas energias (recorde mundial para experimentos de neutrinos de reator).
- O primeiro experimento a instalar sensores Skipper-CCD perto de um reator nuclear.
- CONNIE é provavelmente o único experimento de pesquisa fundamental em física de partículas sediado no Brasil.
- Forte atuação brasileira em todas as etapas:
 - ✓ Instalação, operação, infraestrutura e análises científicas.
 - ✓ Formação de pessoal e envolvimento da comunidade local.
 - ✓ Reconhecimento internacional, palestras convidadas em congressos na área.
 - ✓ O apoio da Eletronuclear tem sido fundamental.
- Possibilidade de fortalecer a liderança do grupo brasileiro no upgrade do experimento para atingir maior sensibilidade e testar nova física.





Back up





Custos e financiamento



Projetos de desenvolvimento de detectores (LDRD) do Fermilab – 2014:

- US\$ 200k – fabricação de sensores de silício.
- US\$ 200k – compra de componentes eletrônicos de leitura, criogenia, vácuo, etc.
- US\$ 250k – produção dos detectores finais e transporte.
- Suíça, México, Argentina – aprox. US\$ 20k + componentes, transporte, viagens.

Financiamento do Brasil atualmente:

- Aprox. R\$ 450k no total – computação, blindagem, reformas, eletrônica, bancada, viagens.
- Infraestrutura, energia e rede de dados, manutenção e apoio de pessoal da Eletronuclear (Gustavo Coelho, Lívia Werneck).

Custos estimados do upgrade planejado:

- US\$ 250k – upgrade do detector com Skipper-CCDs (depende do desenho) – contrapartida do Fermilab.
- US\$ 40k – upgrade do sistema de processamento/armazenamento do cluster CHE (CBPF).
- US\$ 10k – nova eletrônica de leitura e de transferência do vácuo.
- US\$ 200k – reposições e manutenção da criogenia, vácuo; detectores de nêutrons e múons.
- R\$ 40k por ano – manutenção do experimento e laboratório, ar condicionado, viagens.

Possíveis sinergias com outras áreas e aplicações:

- Skipper-CCD – interesse na Astronomia (telescópios), Ótica Quântica (fótons), Física Nuclear (nêutrons).
- Grande interesse em experimento de salvaguarda-nuclear e monitoramento de reatores.