

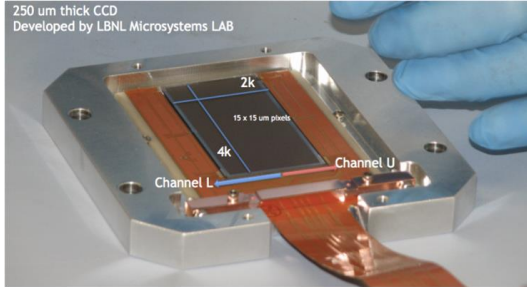
Upgrade do experimento CONNIE com novos sensores skipper-CCD

Herman P. Lima Jr (CBPF)

Pela Colaboração CONNIE

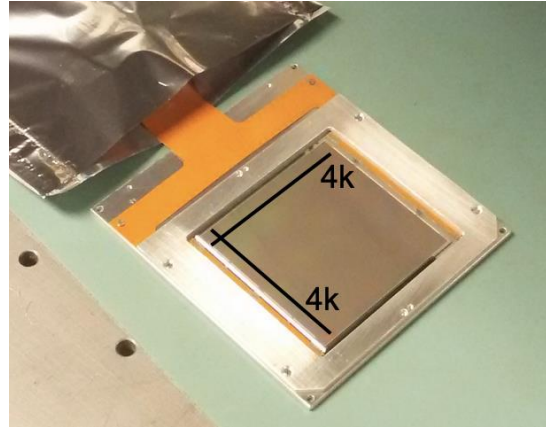
O Experimento CONNIE

Coherent Neutrino-Nucleus Interaction Experiment



CONNIE - Prova de conceito
4 CCDs de 2k x 4k pixels
com espessura de 250 μm
Massa: 4 g

Estudo de desenho e
operação do experimento
desde Dezembro 2014 até
Março 2016



CONNIE
14 CCDs de 4k x 4k pixels
com espessura de 675 μm
Massa: 84 g

Funcionamento: de Agosto
2016 a Dezembro 2020



ν lab already installed by Neutrinos
Angra Project



O Experimento CONNIE

Coherent Neutrino-Nucleus Interaction Experiment

Colaboração Internacional



Brasil

CBPF

CEFET/RJ - Angra dos Reis

IF - UFRJ



Argentina



México



Paraguay

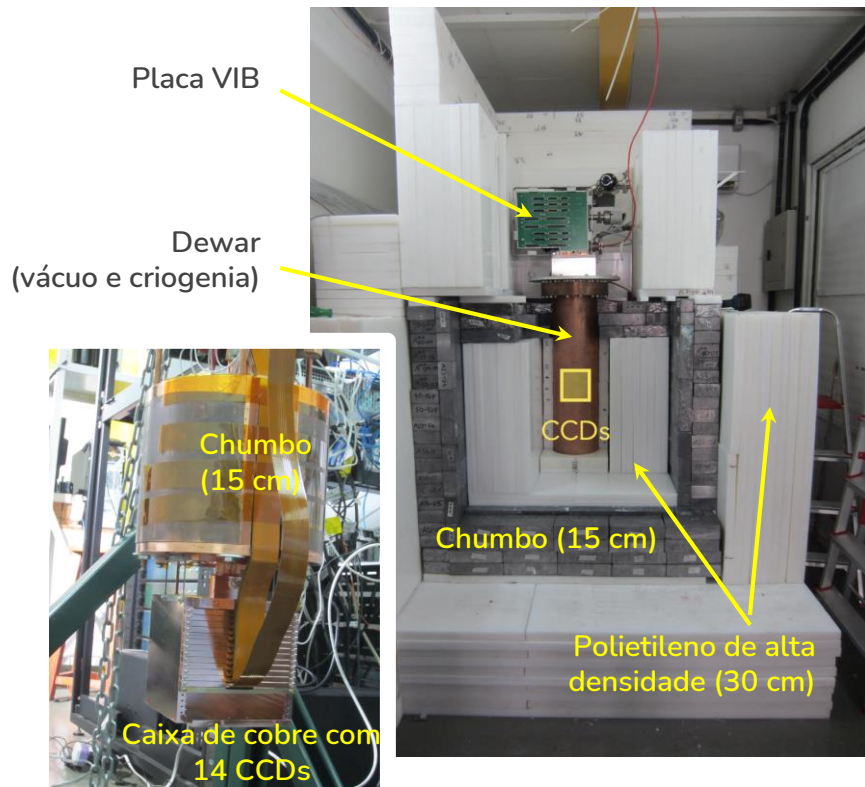


Suíça



USA

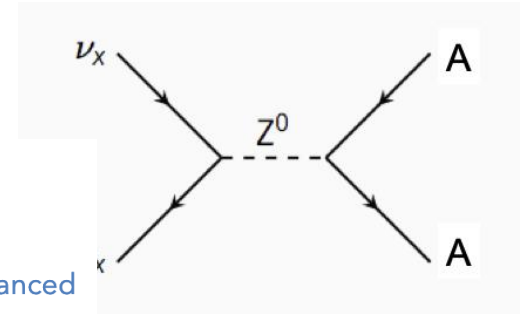
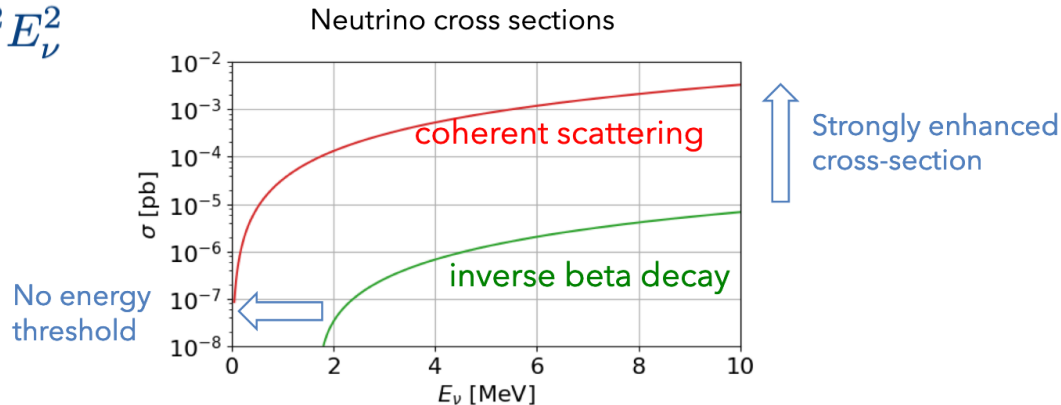
Medir CEvNS do antineutrino de reator em CCDs e procurar por física além do Modelo Padrão



Espalhamento elástico coerente neutrino-núcleo (CEvNS)

- Previsto pelo Modelo Padrão das partículas em 1974 D. Freedman, *Phys. Rev. D* 9 1389 (1974)
- Interação foi medida pela primeira vez em 2017 pela colaboração COHERENT D. Akimov et al, *Science* 357 (2017)
- Processo dominante para baixas energias $E_\nu \lesssim 50$ MeV
- Secção de choque aumenta com o N^2

$$\sigma = \frac{G^2}{4\pi} N^2 E_\nu^2$$



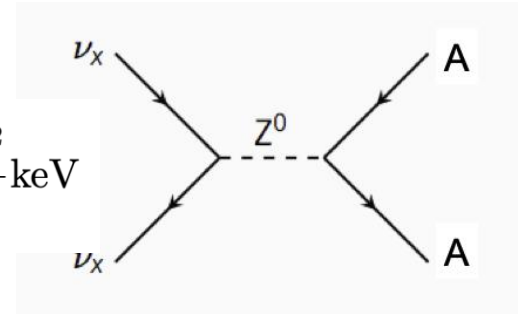
Espalhamento elástico coerente neutrino-núcleo (CEvNS)

- Previsto pelo Modelo Padrão das partículas em 1974 D. Freedman, Phys.Rev. D 9 1389 (1974)
- Interação foi medida pela primeira vez em 2017 pela colaboração COHERENT D. Akimov et al, Science 357 (2017)
- Processo dominante para baixas energias $E_\nu \lesssim 50$ MeV
- Secção de choque aumenta com o N^2

Mas muito difícil de observar !!

- Energia de recuo muito pequena $E_r \sim \text{keV}$
 - Muito difícil de medir no passado
 - Agora é possível graças ao desenvolvimento de detectores com baixo limiar de detecção desenvolvidos para CEvNS e para a detecção de matéria escura

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

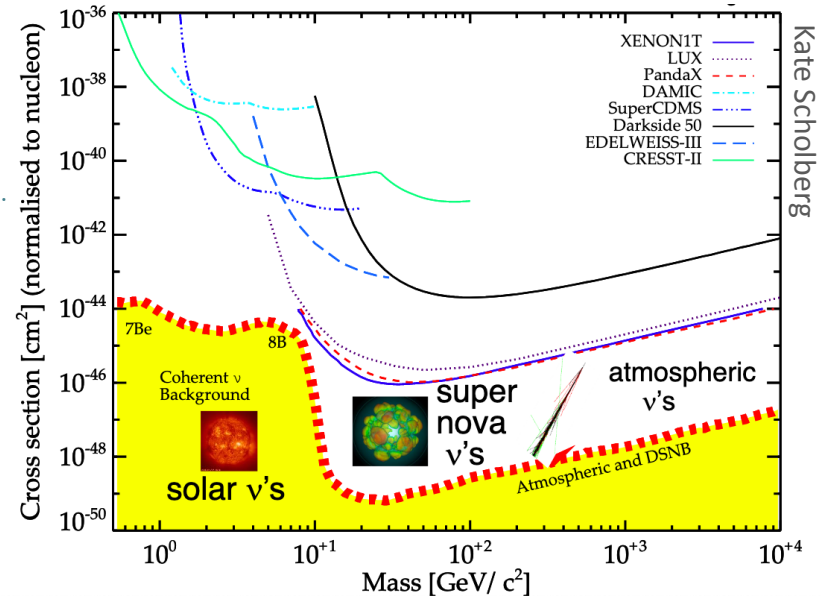


Detectores CCDs possuem limiar de detecção muito baixo

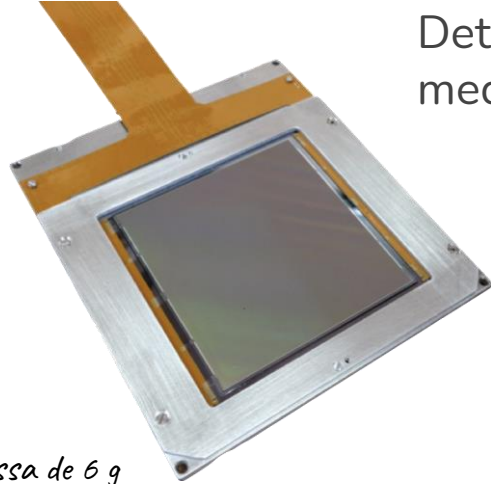
Por quê CEvNS ?

Espalhamento elástico coerente do neutrino com o núcleo

- Para entender/verificar o Modelo Padrão
- Ferramenta para buscar por “nova física”, além do Modelo Padrão
Momento magnético, neutrino estéril, fótons escuros, etc..
- Os neutrinos são um background irreduzível para os experimentos de Matéria Escura
- A física do MeV-neutrino tem grande relevância para o transporte de energia em supernovas
- Monitoramento de reatores nucleares



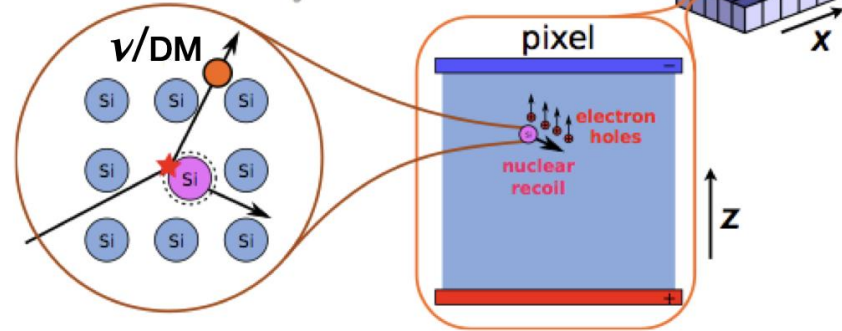
Detectores CCDs



massa de 6 g
675 μm de espessura
16 Mpix de 15 μm x 15 μm
desenvolvidas no Lawrence Berkeley
National Laboratory MicroSystems Lab

Detectar a interação coerente com o núcleo de Si através da medida da ionização produzida pelo recúo nuclear

Dispersão coerente elástica



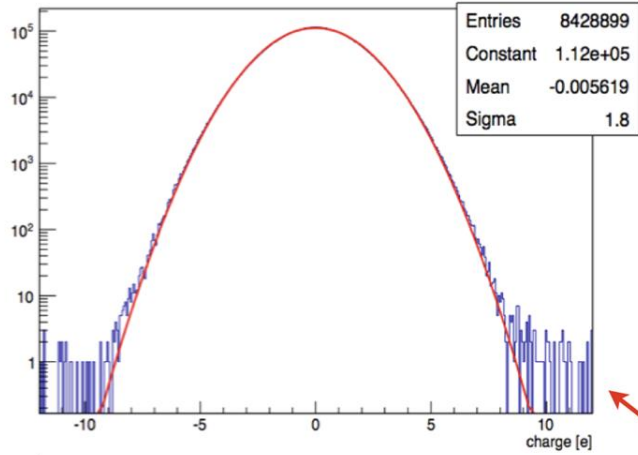
Vantagem:

- O alvo é o próprio detector
- Limiar de detecção baixo
- Resolução espacial muito boa

Desafios:

- Pequenas energias de ionização
- Eficiência de ionização nunca medida

Leitura das CCDs



Baixo nível de ruído $\sim 2e^-$

muons

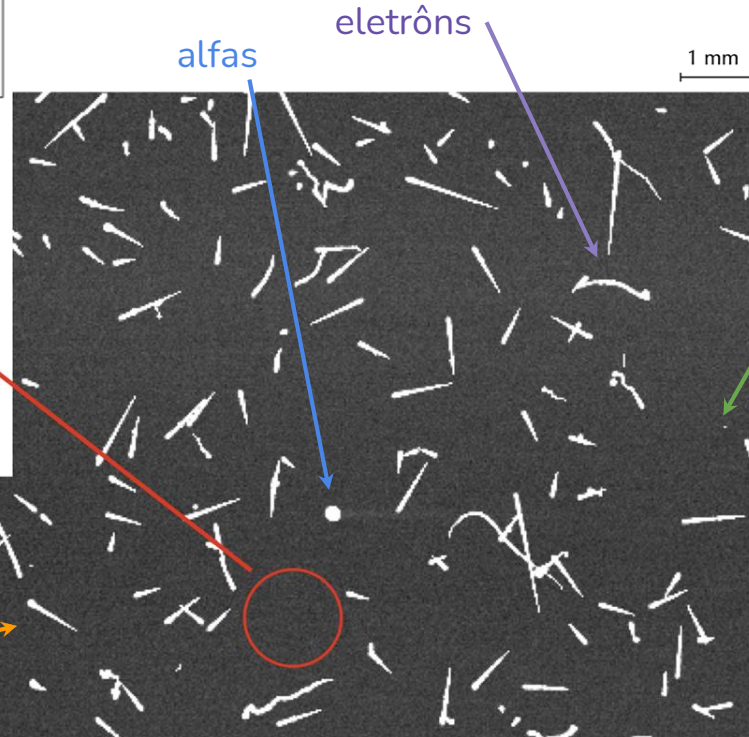


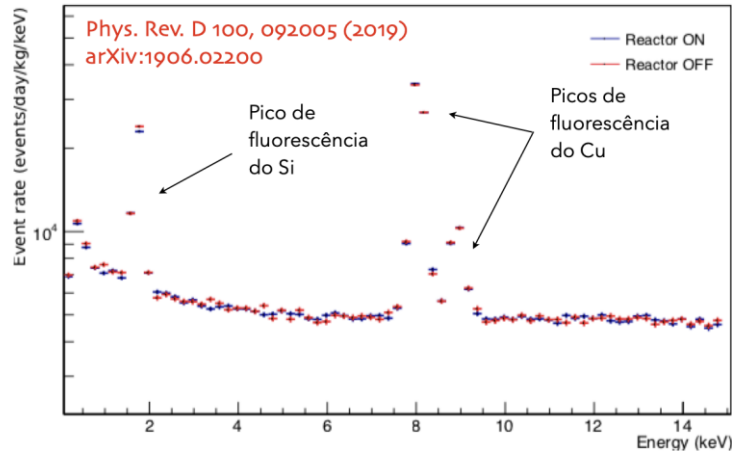
Imagem de uma porção de CCD com 3 h de exposição em CONNIE

Resultados de CONNIE

Estrategia análise: Reator_ON - Reator_OFF

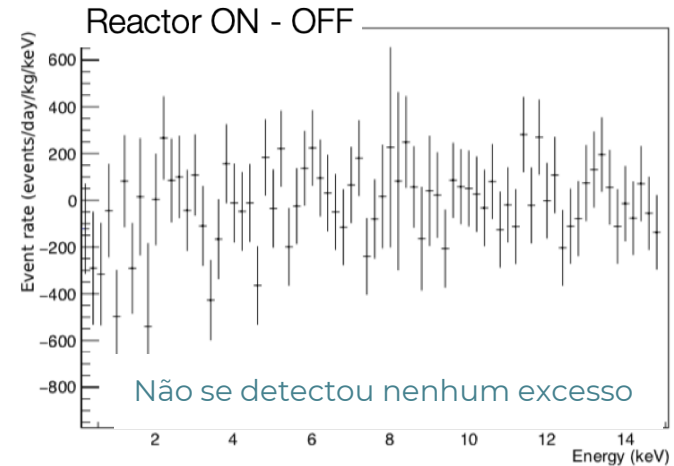
Seleção de eventos:

- Períodos de ótimo funcionamento do detector e escolha dos melhores CCDs. Experimento estável.
- Escolha de um volume livre de contaminação externa ou pixels defeituosos



Exposição total: 2.1 kg-day para reator_ON

1.6 kg-day para reator_OFF

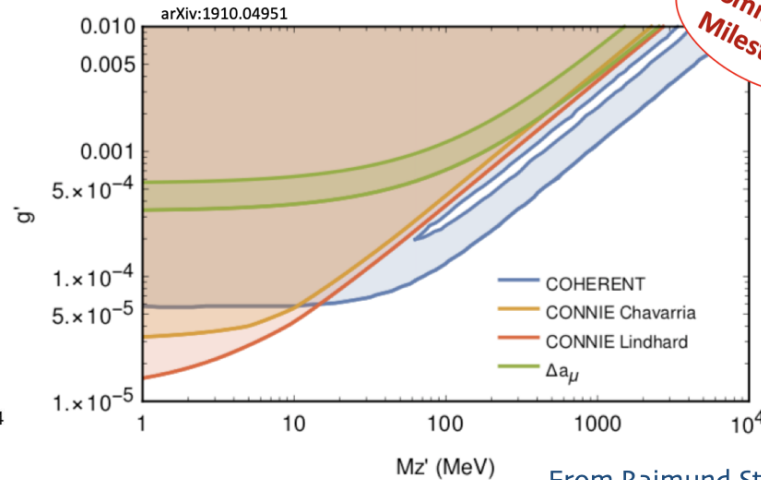
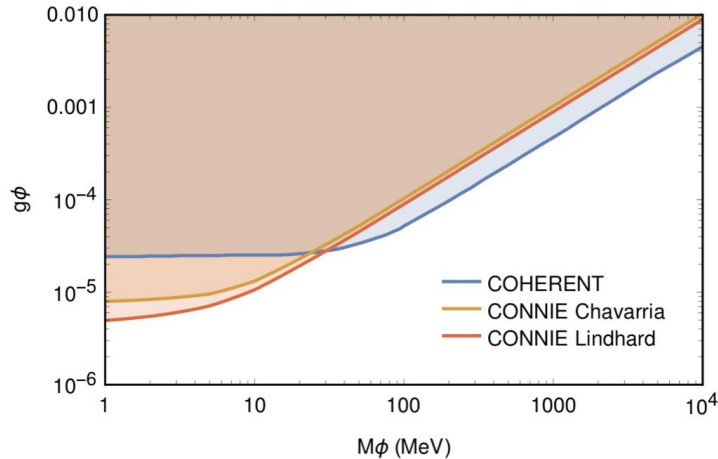


Limite superior para CEvNS 40 vezes maior
que sinal esperado pelo Modelo Padrão

Resultados de CONNIE

Limites para física além do Modelo Padrão

- Limites para dois modelos simplificados de mediadores leves
 - Mediador vetorial leve (Z') e Mediador escalar leve (φ)
- Melhor limite no mundo (CEvNS em reatores) em baixas energias



First competitive BSM
constraint from CEvNS
at reactors!

Despite background ~ 40
times above CEvNS
signal.

From Raimund Strauss @ Neutrino 2020

Experimentos de neutrinos de reator são especialmente aptos para sondar nova física em baixas energias

Precisamos ...

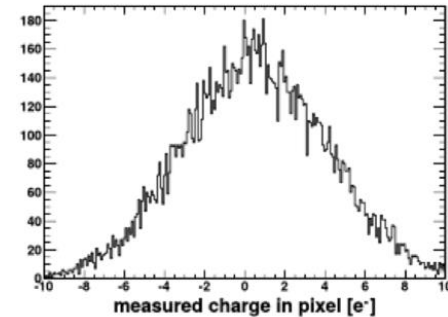
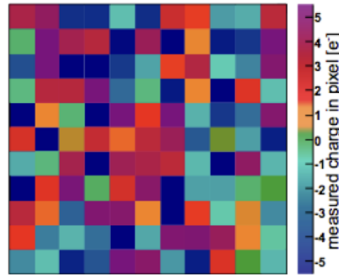
Maior massa e/ou menor ruído e/ou menor background e/ou maior fluxo

Nova tecnologia: Skipper-CCDs

CCD - Standard: a carga do pixel é medida uma vez só

$$N_{\text{leituras}} = 1$$

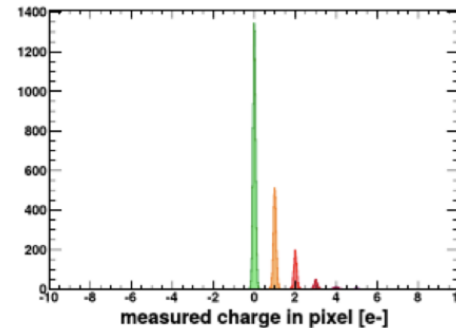
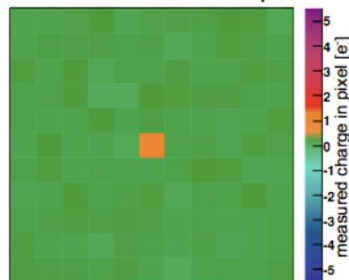
$$\sigma = 3.5e^-$$



CCD - Skipper: a carga do pixel é medida múltiplas vezes

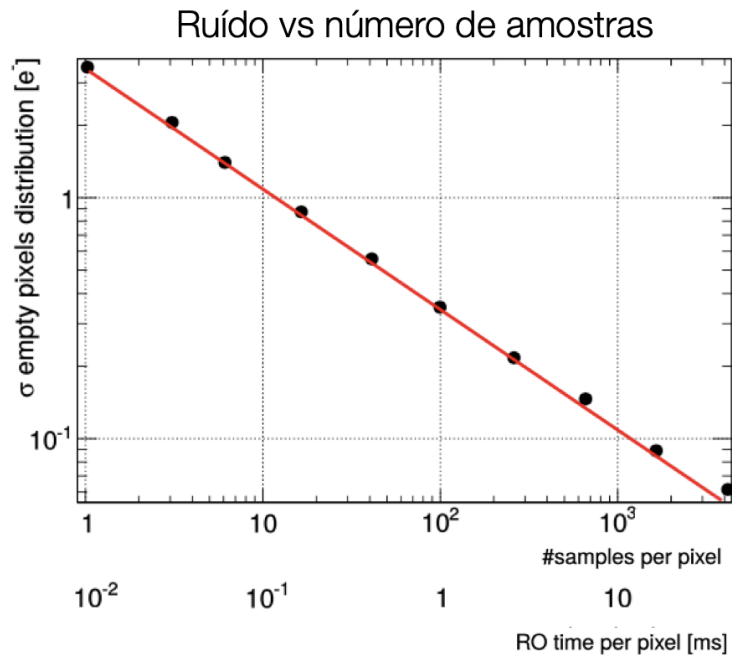
$$N_{\text{leituras}} = 4000$$

$$\sigma = \frac{3.5e^-}{\sqrt{4000}} = 0.06e^-$$



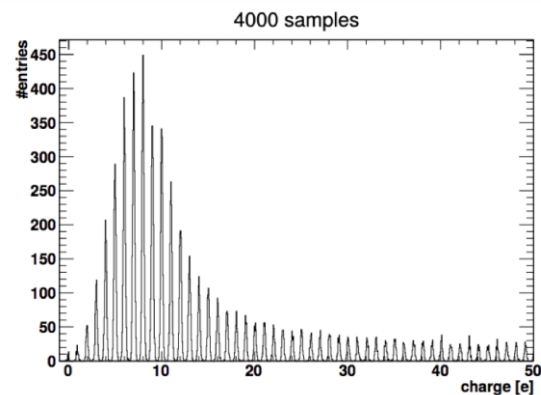
J. Tiffenberg et al, PRL 119 (2017)

Nova tecnologia: Skipper-CCDs

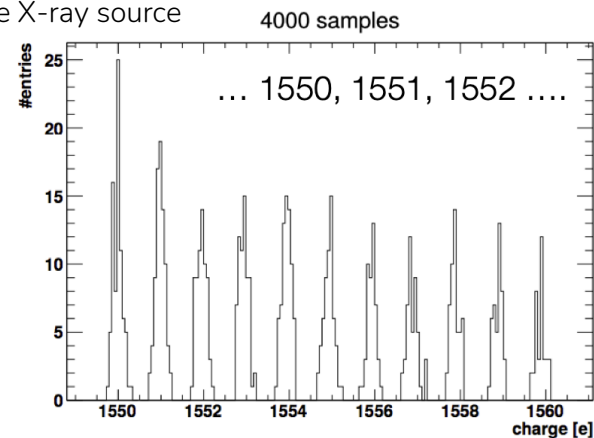


J. Tiffenberg et al, PRL 119 (2017)

► Contando elétrons... 48, 49, 50

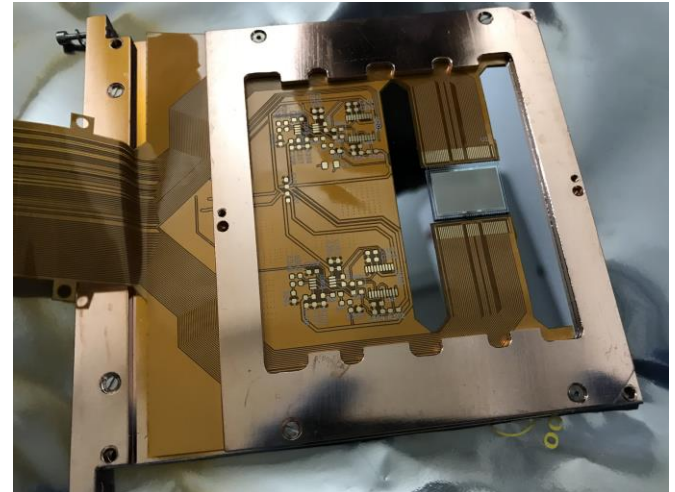


^{55}Fe X-ray source



Instalação de Skipper-CCDs @ CONNIE (P&D)

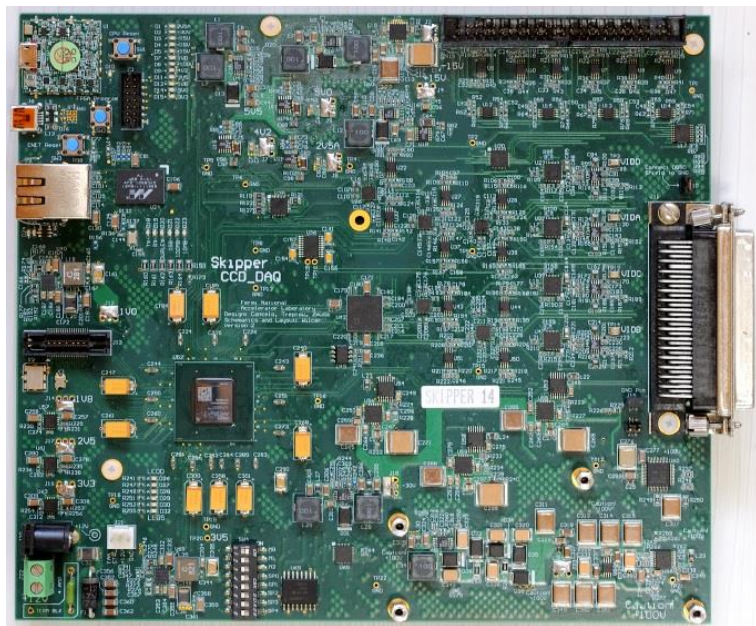
- Detecção de CEvNS com tecnologia de Skipper-CCDs
 - O ruído já não vai ser um problema
 - Mais sensível a sinais de baixa energia ← ótimo e ao mesmo tempo um novo desafio!
- Por quê em CONNIE?
 - Único experimento atualmente funcionando perto de um reactor nuclear usando CCDs
 - 5 anos de dados com CCDs normais permite um bom conhecimento do background do experimento
- Experimento:
 - 2 CCDs Skipper ~ 0.4 g (0.5k x 1k pixels, 675 μm)
 - 2 CCDs Normais ~ 12 g (4k x 4k pixels, 675 μm)
 - Instalação de uma nova eletrônica de leitura (LTA)
 - Manutenção & Infraestrutura



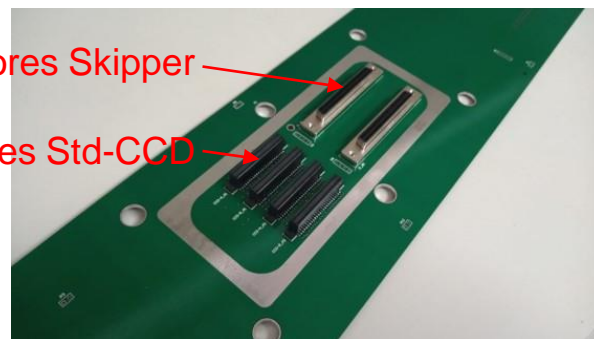
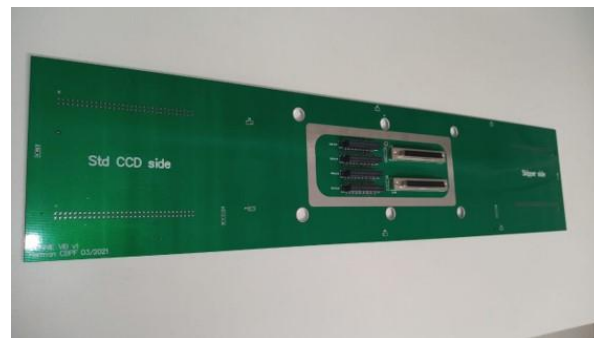
CONNIE-Skipper 2021 – eletrônica

Novo DAQ: módulo LTA (*Low Threshold Acquisition*). Um LTA pode ler 2 Std-CCDs ou 1 Skipper.

Nova placa de interface (VIB) entre o volume com vácuo (eletrônica fria) e o exterior. Produzida no Brasil



Módulo LTA



Interface VIB (vista inferior)

CONNIE-Skipper 2021 – eletrônica

Integração da eletrônica e testes @ CBPF



Novo DAQ @
CONNIE



Nova VIB instalada @ CONNIE

Instalação de Skipper-CCDs @ CONNIE

29/Junho a 1/Julho



Primeiras imagens...

Performance e o começo da busca dos parâmetros ótimos de funcionamento

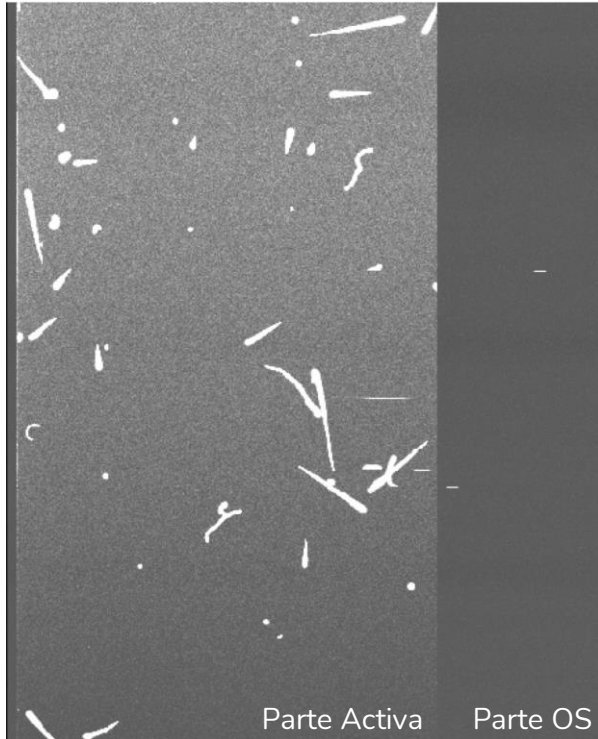
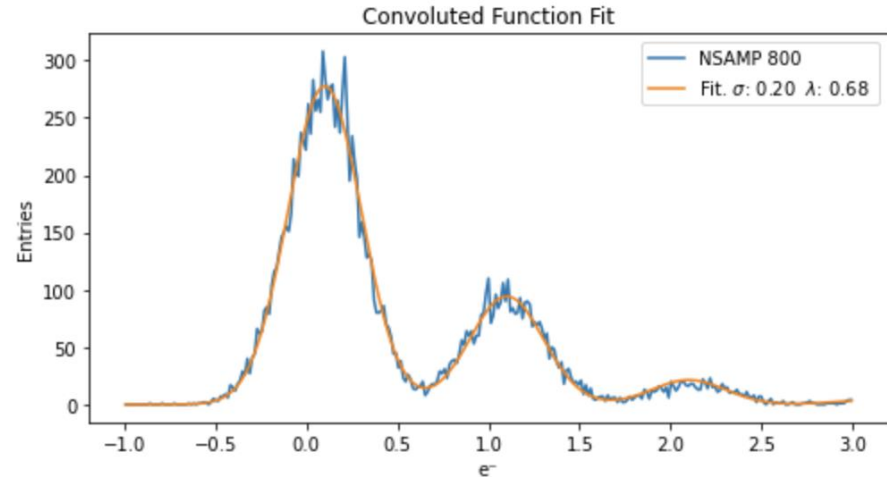


Imagem $\frac{1}{4}$ CCD



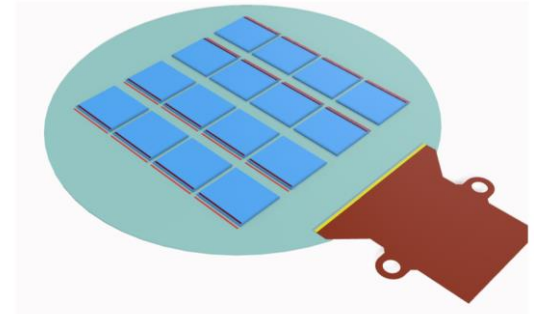
Ruído $\sim 0.2e^-$ / Corrente escura $\sim 0.22 e^-/\text{pix}/h$

Objetivo: caracterizar a performance dos novos Skipper-CCDs @ CONNIE e determinar o background

Upgrade CONNIE

- Instalação de um arranjo de skipper CCDs maiores (6-10 g) trabalhando em simultâneo (multiplex) associado a uma LTA
- Baseado nas medidas realizadas com Skipper-CCDs instalados agora em CONNIE
 - Massa total do experimento
 - Estratégia nas medidas
 - Redesenho da blindagem
 - Nova interface VIB para passagem da eletrônica fria para a quente

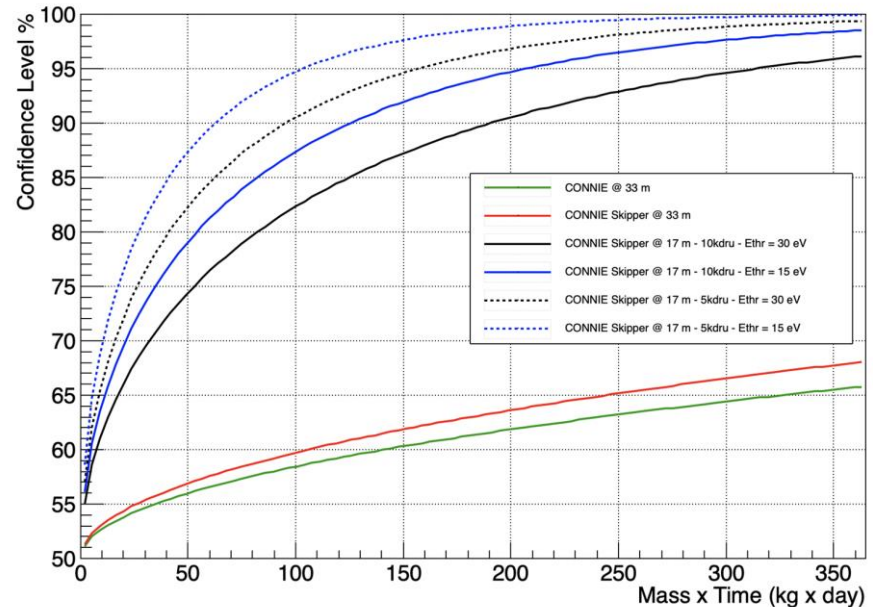
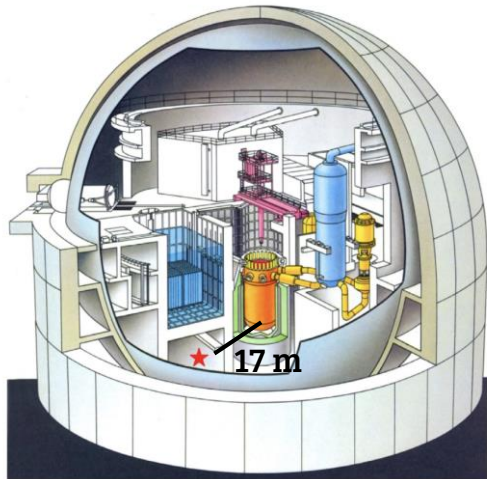
6k x 1k (SENSEI)



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

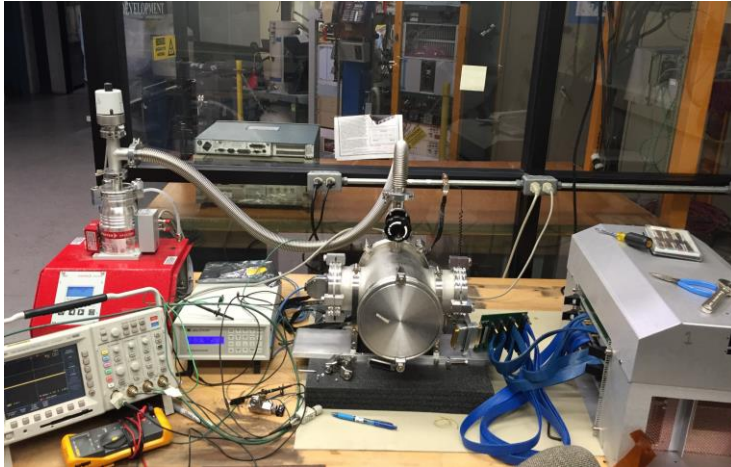
Upgrade de CONNIE

- Aumento do fluxo de neutrinos e redução do background ambiente
 - Instalar um protótipo com uma única CCD dentro da Usina
 - Posição idêntica à do experimento CONUS em Alemanha
 - Tratativas com a Eletronuclear previstas para Agosto/Setembro 2021 (após a parada da Usina e movimentação dos elementos combustíveis utilizados)

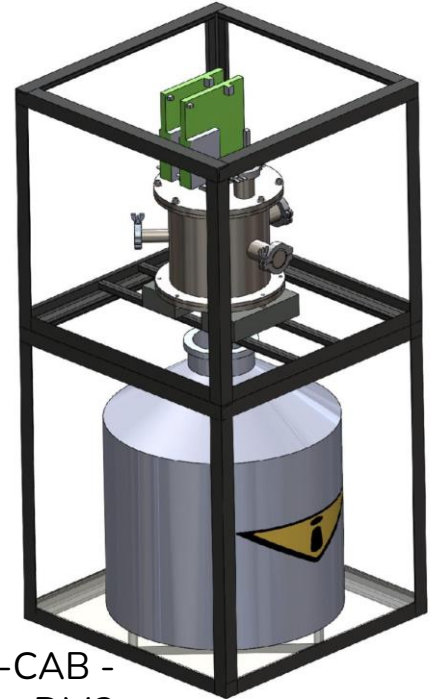


Montagem de uma bancada de CCDs @ Laboratório

- Laboratório de testes de CCDs sendo construído no Rio (LAPE - IF - UFRJ)
- Laboratório de integração e teste de eletrônica no Rio (CBPF)
- Contribuição à pesquisa e desenvolvimento desta tecnologia
- Formação de recursos humanos



Bancada de teste
@ Fermilab



Desenho IB-CAB -
Experimento DM2

Resumo e perspectivas futuras

- CONNIE é o experimento de neutrinos de reator atualmente com maior sensibilidade
- Estabeleceu limite superior no fluxo de neutrinos em baixas energias
- Obteve os limites mais restritivos em modelos além do Modelo Padrão em baixas energias (recorde mundial a partir de experimentos de neutrinos de reator)
- CONNIE é o primeiro experimento a instalar um Skipper-CCD perto de um reator nuclear
- CONNIE é o único experimento em operação que possui um sistema híbrido de CCDs e Skipper CCDs, o que permitirá a calibração cruzada entre os sensores, visando melhorar a análise dos dados de 2016-2020.
- Além de baixar o limiar de detecção com skipper CCD, para detectar CEvNS e testar nova física é crucial:
 - Aumentar o fluxo de neutrinos e/ou
 - Diminuir significativamente o background
- Plano de instalar um experimento mais próximo do reator, aumentando o fluxo. Também sujeito a uma blindagem maior da radiação cósmica

AGRADECIMENTO especial à  pelo apoio ao experimento CONNIE
e a nosso grande parceiro no Laboratório Neutrinos-Angra 

Obrigado !

- Título do projeto: Upgrade do experimento CONNIE
- Instituições/grupos envolvidos no projeto no Brasil:
 - CBPF (Herman P. Lima Jr., Martín Makler, João C. dos Anjos)
 - CEFET (Aldo R. Fernandes Neto)
 - IF-UFRJ (Irina Nasteva, Carla Bonifazi)
 - Eletronuclear (Gustavo Coelho e Livia Werneck)

Novos membros: estamos procurando por pesquisadores interessados no assunto para ampliar o número de pessoas e instituições envolvidas
- Cronograma aproximado:
 - 2021 - Instalação skipper-CCD @ CONNIE (Junho) - Operação experimento (Junho-Dez)
 - Determinação do espectro de background
 - 2022 - Construção de um protótipo compacto com skipper CCD para colocar dentro do reator nuclear
 - Desenho do Upgrade de CONNIE com massa > 100g para colocar em Angra 2
 - 2023 - Construção e instalação do novo experimento em Angra 2
 - Operação do experimento por 2-3 anos

- **Título do projeto:** Upgrade do experimento CONNIE
- **Estimativa de custos (se houver) e possíveis fontes de recursos (se houver)**
Em elaboração
(Contribuição Brasileira até o momento: ~ R\$ 450k)
Recursos ainda disponíveis para 2021: ~ R\$ 100k (bancada / operação e manutenção)
Protótipo para instalar dentro da Usina Angra 2: ~ US\$ 100k
Upgrade de CONNIE com skipper-CCDs (depende do desenho): ~US\$ 250k
Upgrade do sistema de processamento e armazenamento do cluster CHE (CBPF): ~US\$ 40k
- **Possíveis sinergias com atividades experimentais de outros grupos/experimentos**
Skipper-CCDs são de grande interesse nas áreas de Astronomia (telescópios), Informação Quântica (discussões com grupo de IQ do IF-UFRJ), sensores para física nuclear (nêutrons), ...
- **Possíveis spin-off (aplicações) do projeto**
Grande interesse em experimento de salvaguarda-nuclear e monitoramento de reatores

Extras

Experimentos de CEvNS no mundo

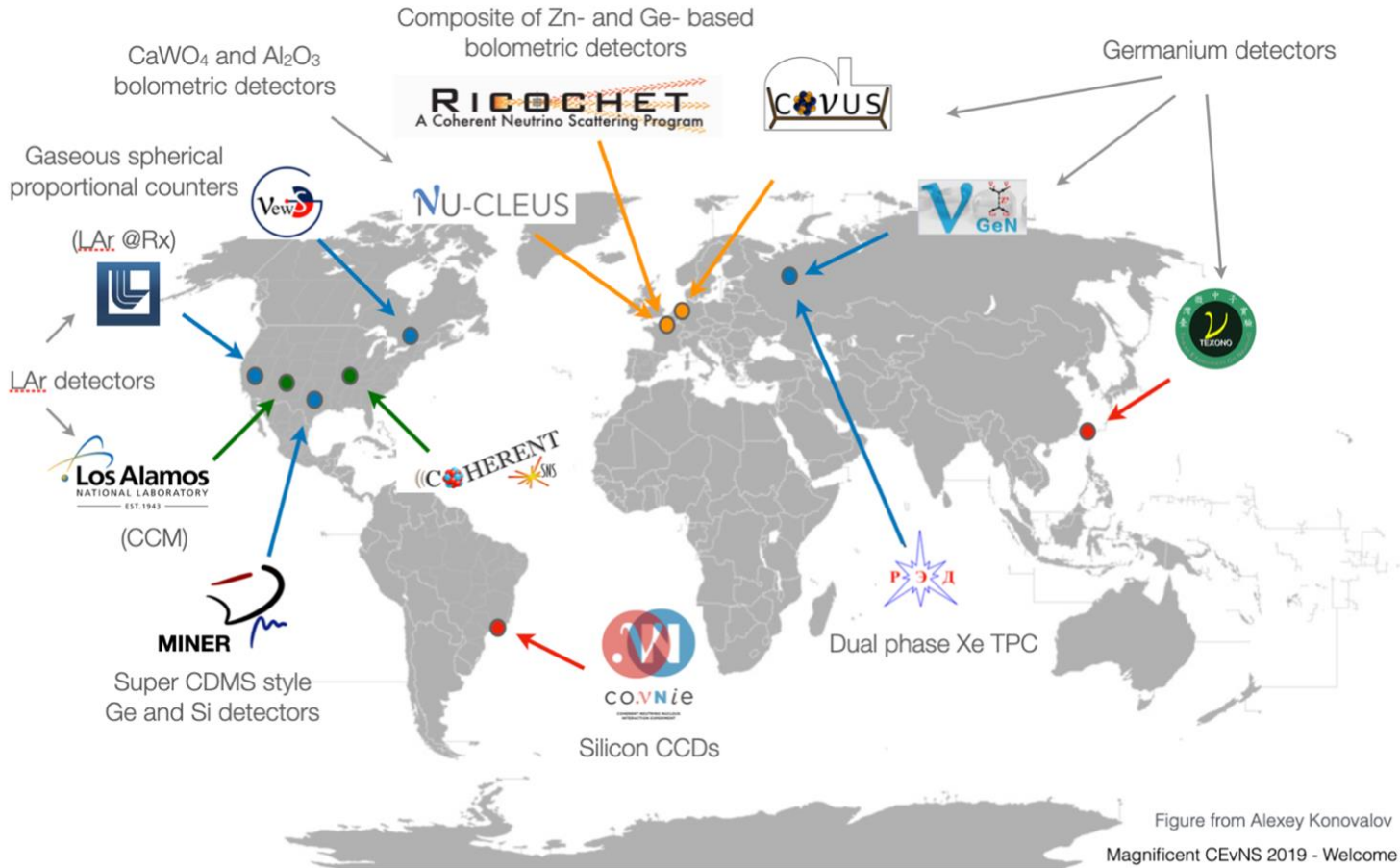


Figure from Alexey Kononov
Magnificent CEvNS 2019 - Welcome

Experimentos de CEvNS no mundo

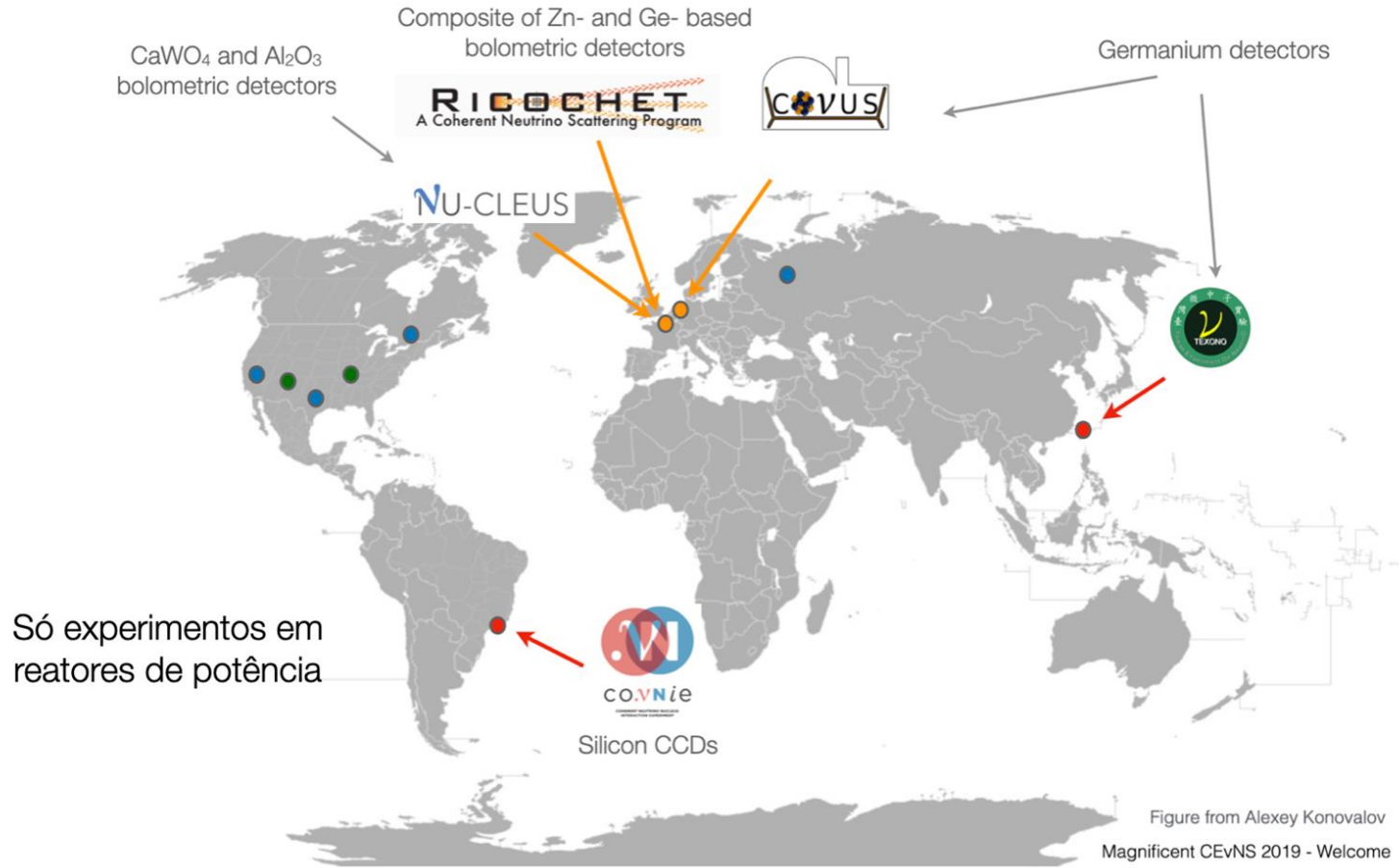
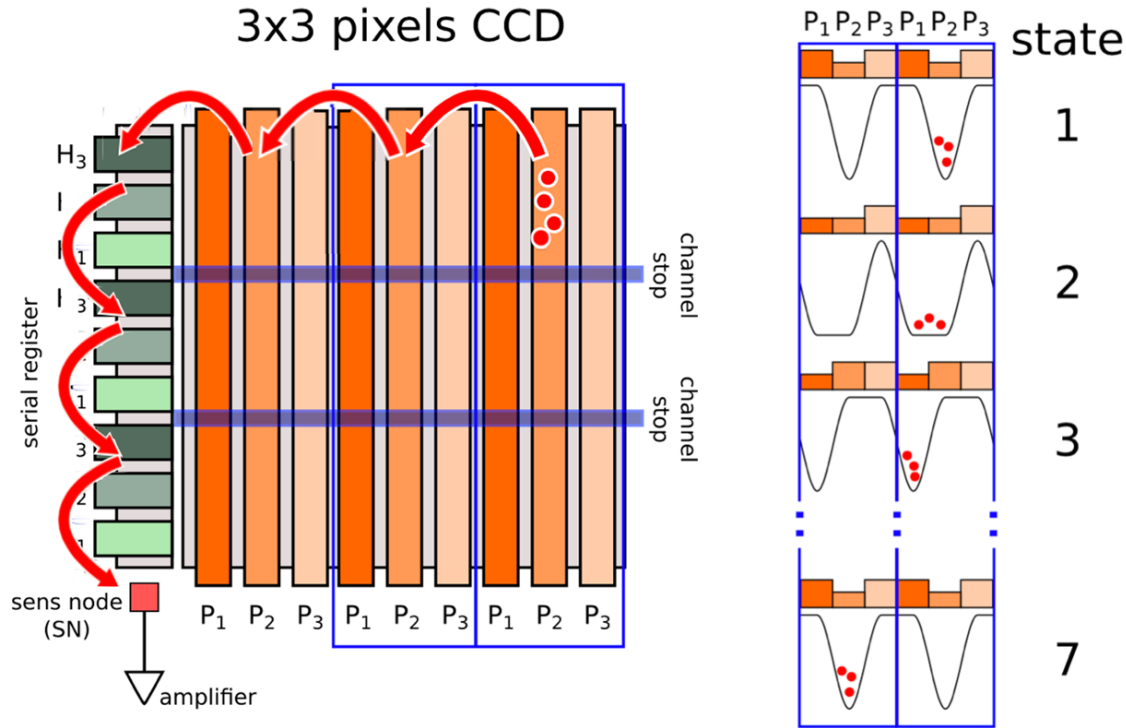


Figure from Alexey Konovalov
Magnificent CEvNS 2019 - Welcome

Lectura de la CCD



Leitura em seqüência, pixel por pixel.

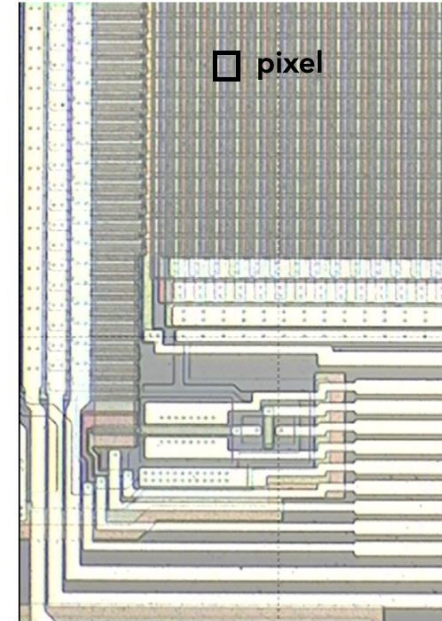
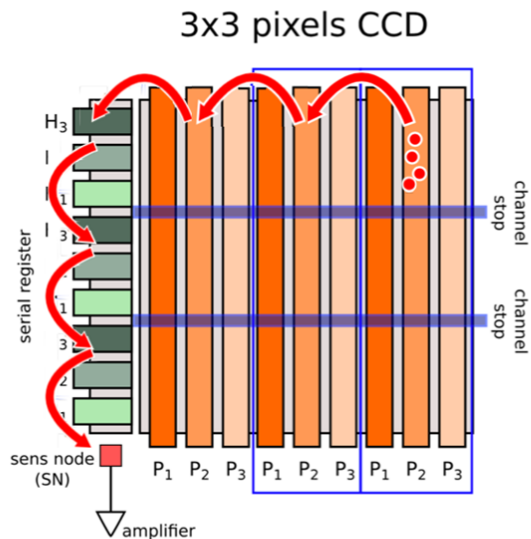


Imagem microscópica de uma porção de CCD

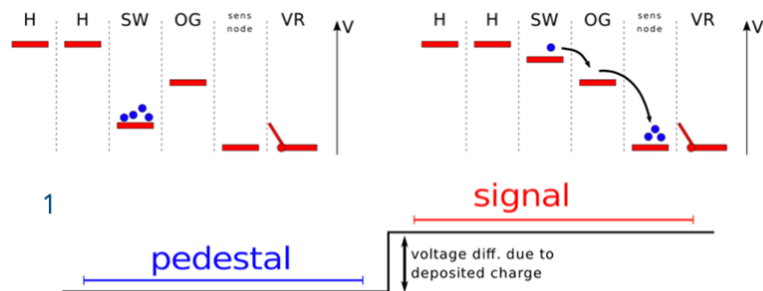
Nova tecnologia: Skipper-CCDs



- Permite alcançar ruídos sub-eletrônicos
- Como? Lendo muitas vezes (N leituras) a carga do mesmo pixel

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_1^2}{N} \quad \sigma_1 = \text{ruído de uma só leitura}$$

▶ CCD normal



▶ CCD Skipper

idea proposta em 1990 por Janesick et al. (doi:10.1117/12.19452)

