

Como e por quê detectar neutrinos produzidos em reatores nucleares?

Carla Bonifazi

IF-UFRJ & ICAS-ICIFI-UNSAM/CONICET

e-mail: carla.bonifazi@me.com

Como e por quê detectar neutrinos produzidos em reatores nucleares?

Carla Bonifazi

IF-UFRJ & ICAS-ICIFI-UNSAM/CONICET

e-mail: carla.bonifazi@me.com

**Com um viés no experimento
CONNIE @ Angra 2**

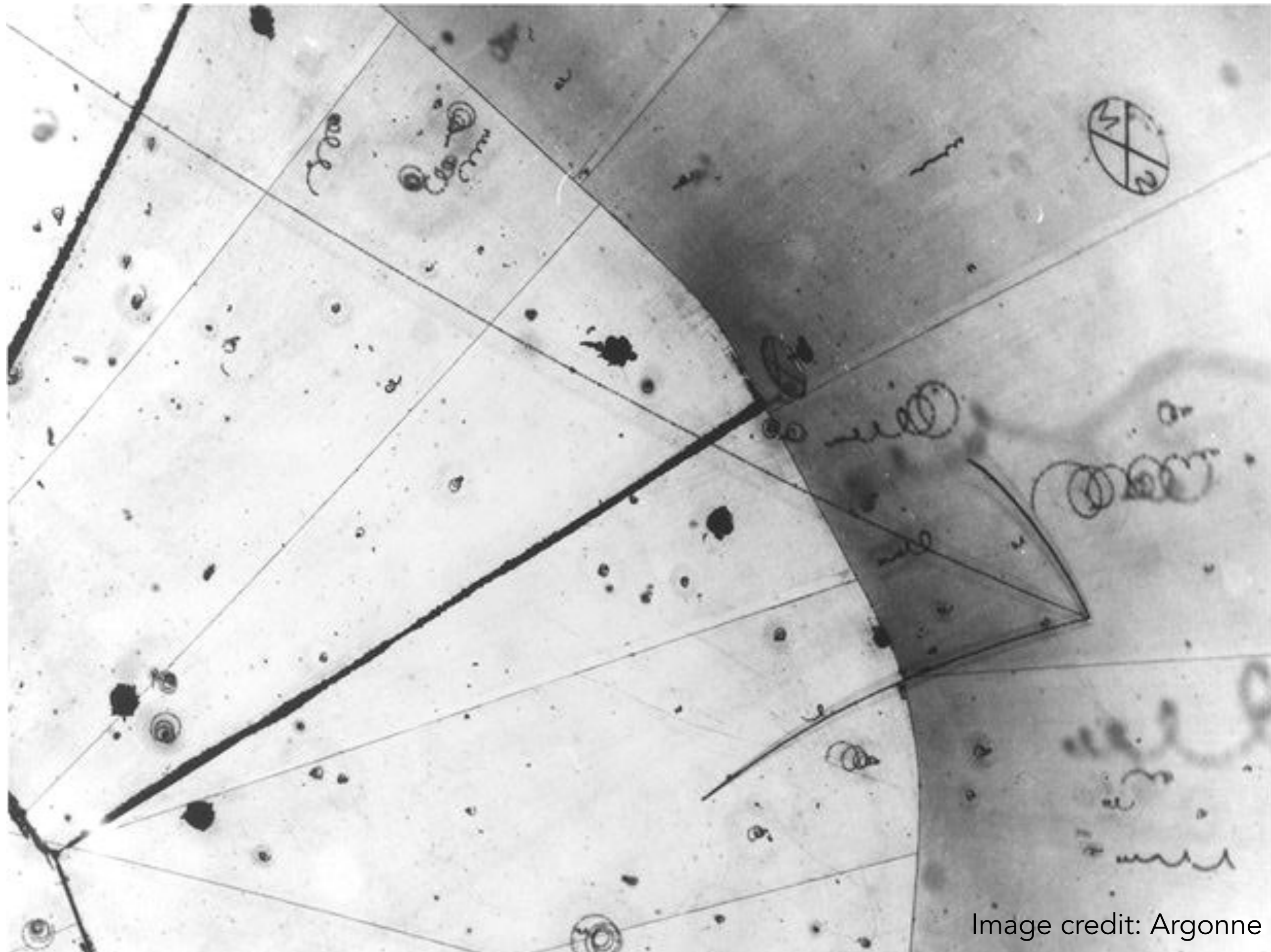


Image credit: Argonne

Primeira interação de neutrino – Câmera de bolhas

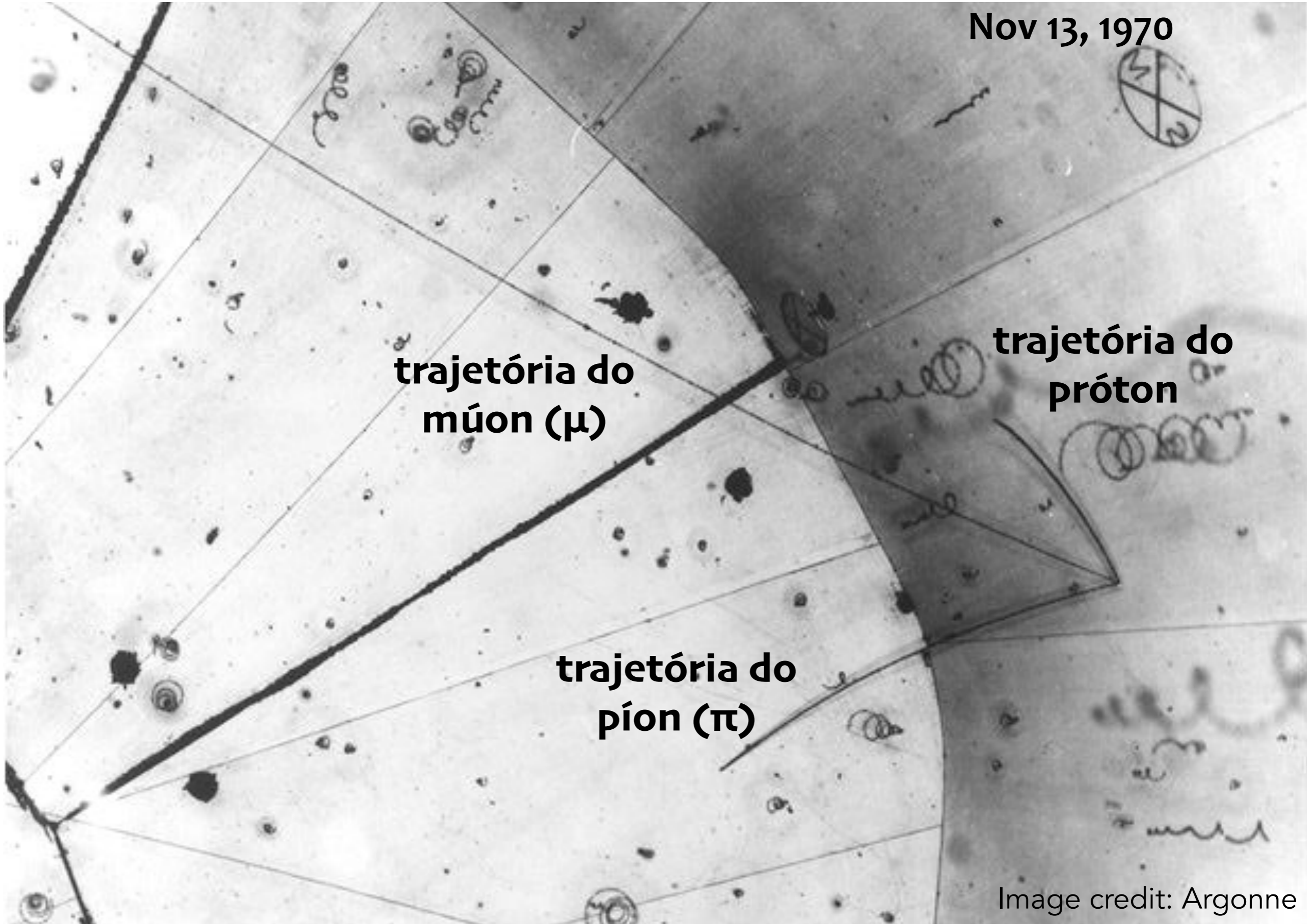
Nov 13, 1970

trajetória do
múon (μ)

trajetória do
próton

trajetória do
píon (π)

Image credit: Argonne



Neutrinos: as misteriosas partículas

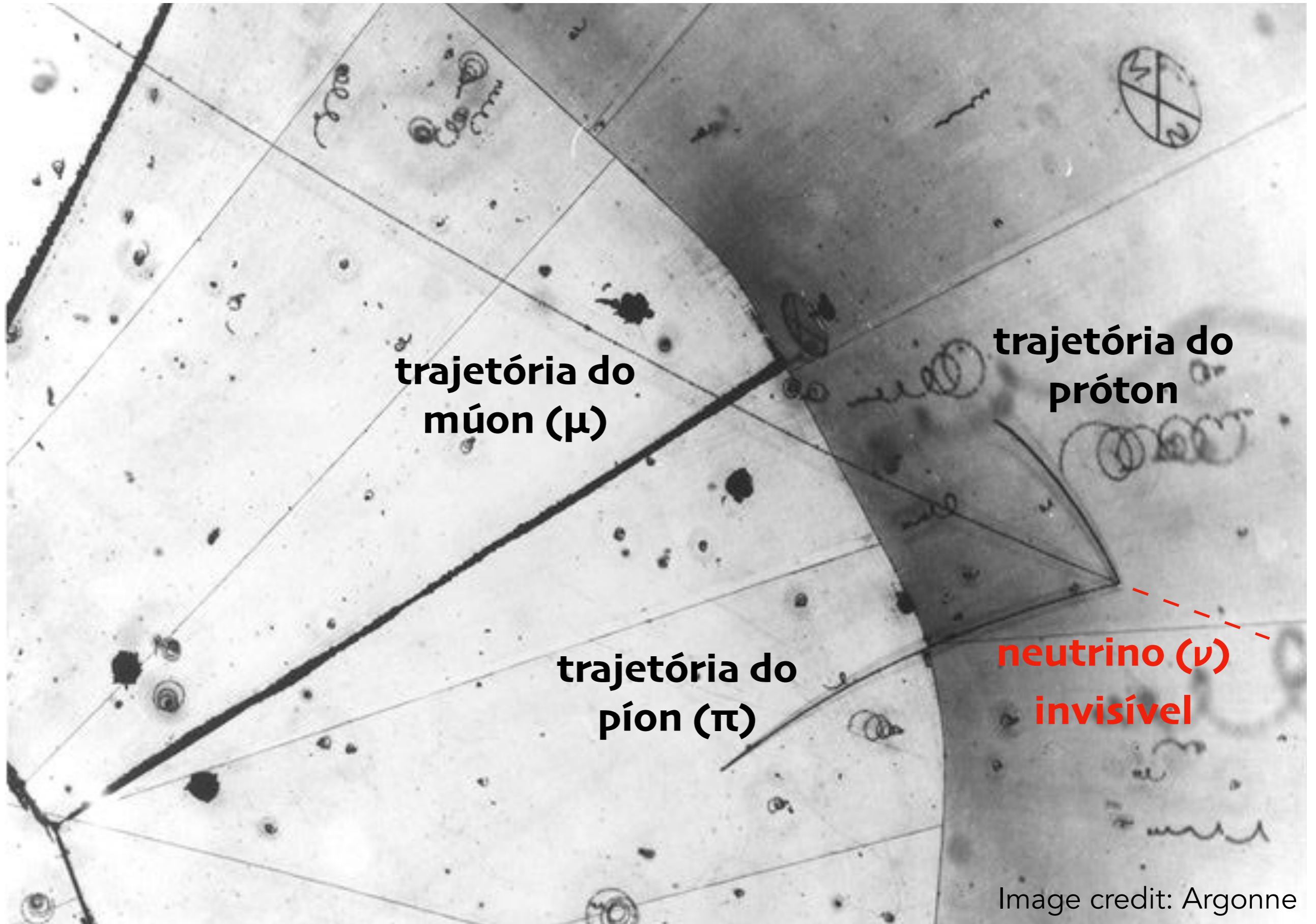
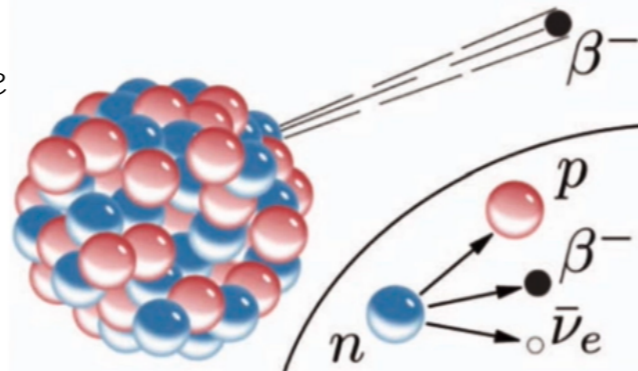
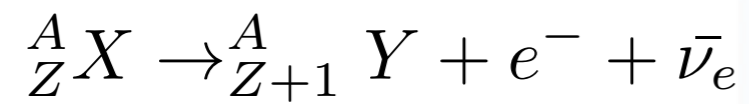


Image credit: Argonne

Neutrinos

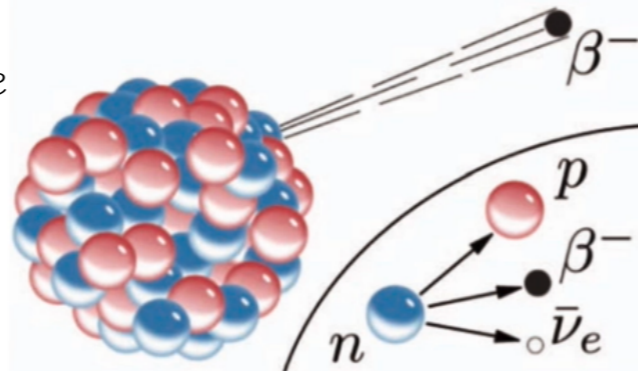
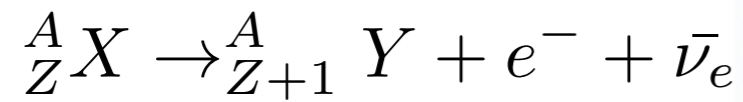
Postulados por Pauli em 1930
para explicar o decaimento beta
(chamado no começo de “nêutron”,
pois não tinha carga)



Neutrinos

Postulados por Pauli em 1930
para explicar o decaimento beta
(chamado no começo de “nêutron”,
pois não tinha carga)

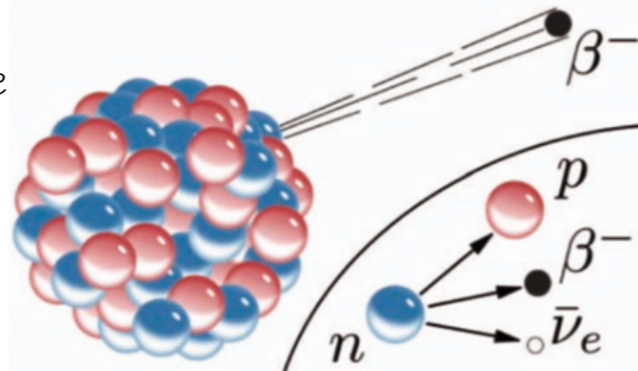
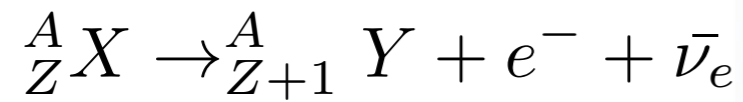
Batizado com o nome de “neutrino”
por Fermi em 1934 quem considerou
seriamente a ideia de Pauli e realizou a
Teoria do decaimento Beta



Neutrinos

Postulados por Pauli em 1930
para explicar o decaimento beta
(chamado no começo de “nêutron”,
pois não tinha carga)

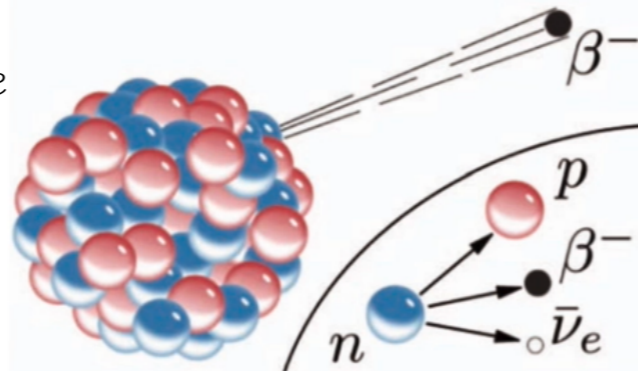
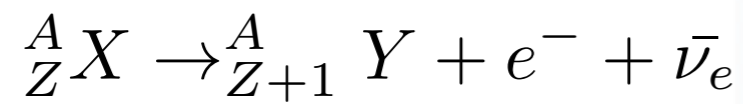
Batizado com o nome de "neutrino"
por Fermi em 1934 quem considerou
seriamente a ideia de Pauli e realizou a
Teoria do decaimento Beta



Prêmio Nobel
1938

Neutrinos

Postulados por Pauli em 1930
para explicar o decaimento beta
(chamado no começo de “nêutron”,
pois não tinha carga)



Batizado com o nome de "neutrino"
por Fermi em 1934 quem considerou
seriamente a ideia de Pauli e realizou a
Teoria do decaimento Beta



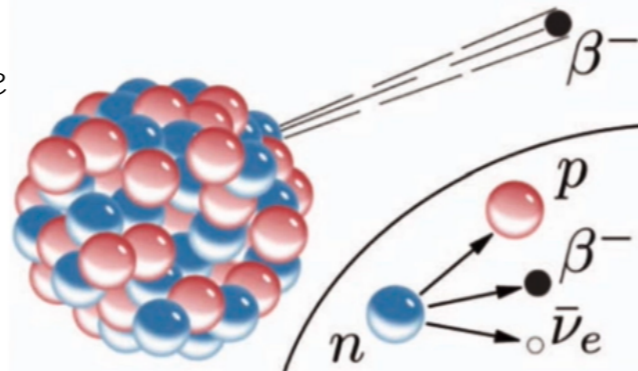
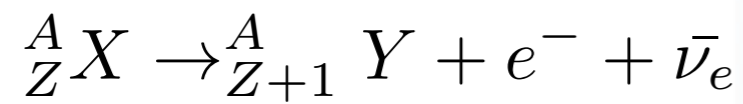
Muito difícil de
serem detectados !!



Prêmio Nobel
1938

Neutrinos

Postulados por Pauli em 1930
para explicar o decaimento beta
(chamado no começo de “nêutron”,
pois não tinha carga)



Batizado com o nome de "neutrino"
por Fermi em 1934 quem considerou
seriamente a ideia de Pauli e realizou a
Teoria do decaimento Beta



Muito difícil de
serem detectados !!

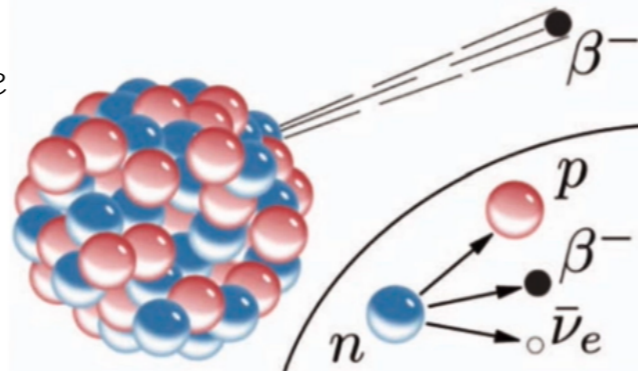
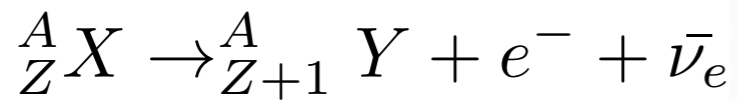


Prêmio Nobel
1938

Neutrinos

Várias tentativas...

Postulados por Pauli em 1930 para explicar o decaimento beta (chamado no começo de “nêutron”, pois não tinha carga)



Batizado com o nome de "neutrino" por Fermi em 1934 quem considerou seriamente a ideia de Pauli e realizou a Teoria do decaimento Beta



Muito difícil de serem detectados !!

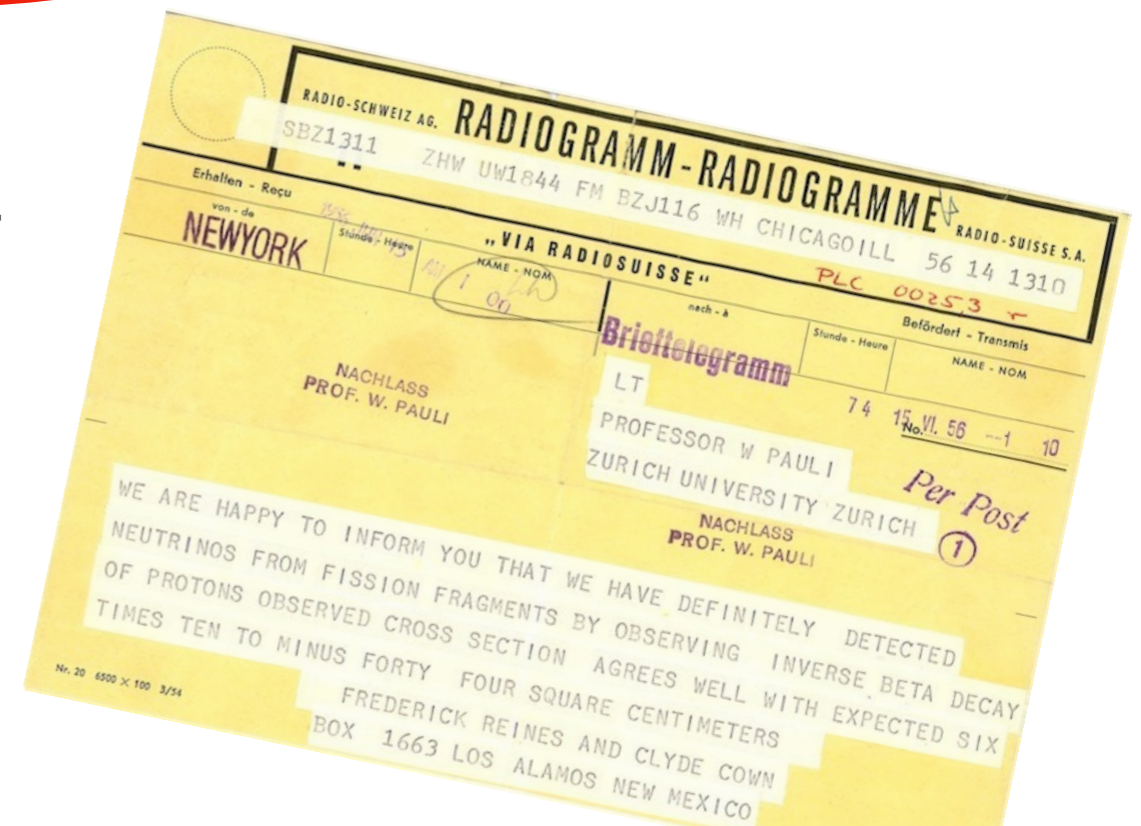


Prêmio Nobel 1938

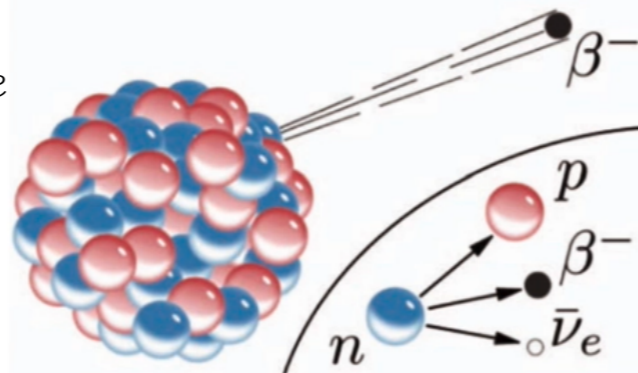
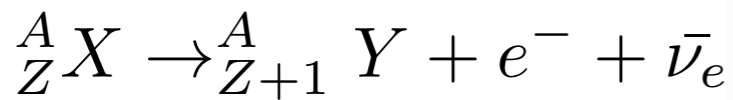
Neutrinos

Várias tentativas...

Detectados pela primeira vez por Cowan & Reines em 1956 com um experimento colocado no reator nuclear de Savannah River em South Carolina



Postulados por Pauli em 1930 para explicar o decaimento beta (chamado no começo de “nêutron”, pois não tinha carga)



Batizado com o nome de "neutrino" por Fermi em 1934 quem considerou seriamente a ideia de Pauli e realizou a Teoria do decaimento Beta



Muito difícil de serem detectados !!

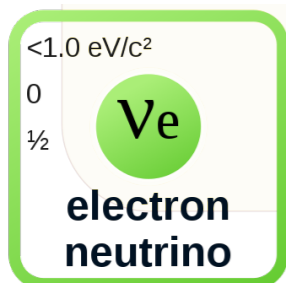


Prêmio Nobel 1938

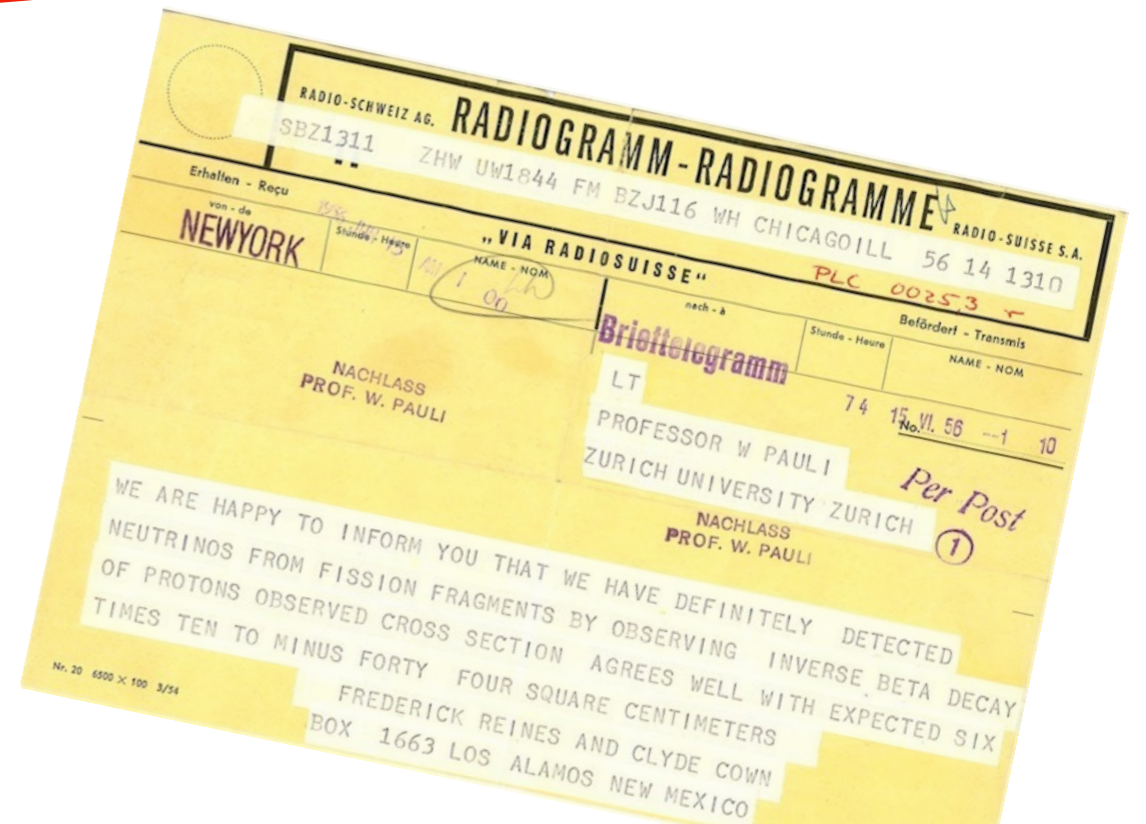
Neutrinos

Várias tentativas...

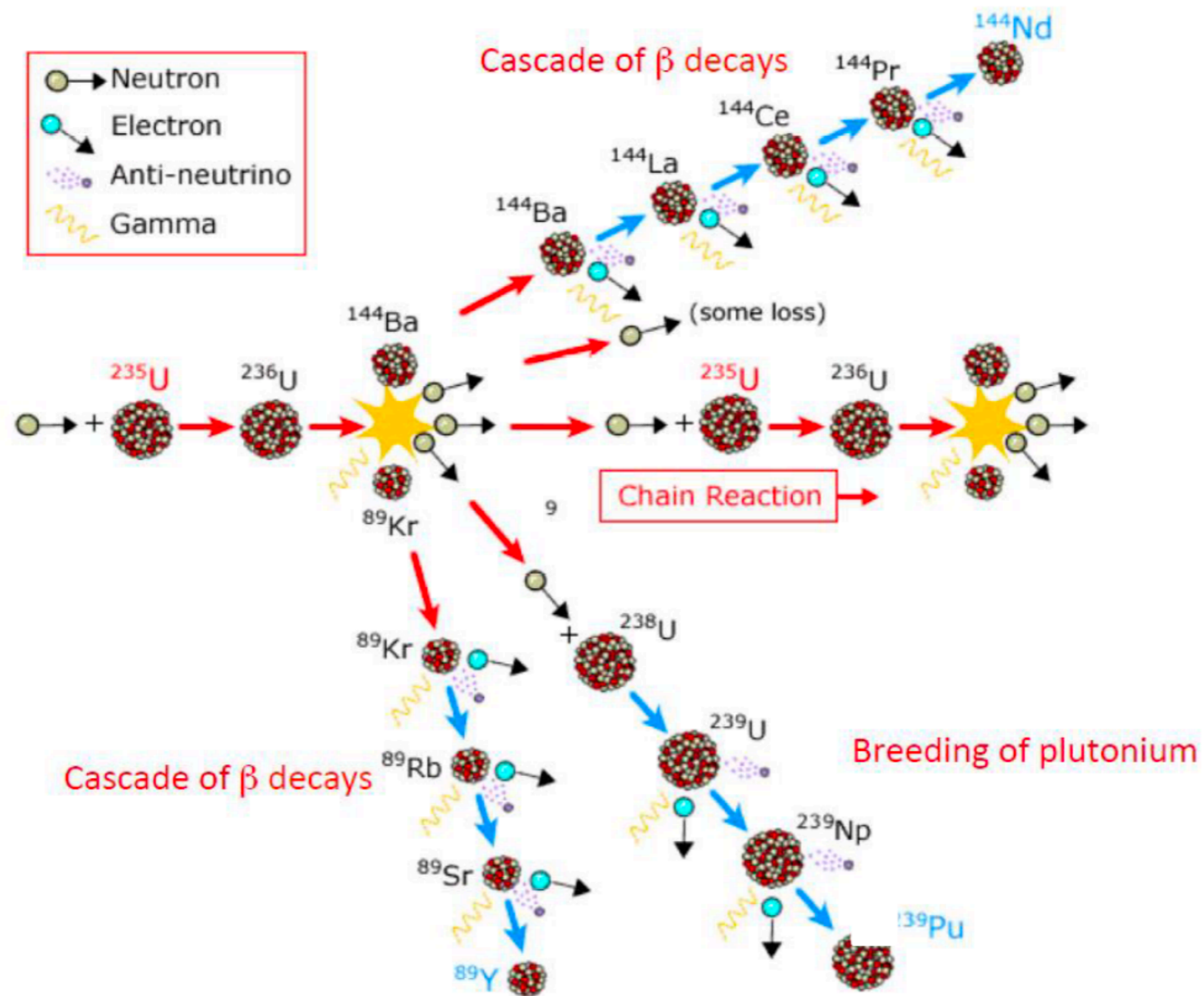
Detectados pela primeira vez por Cowan & Reines em 1956 com um experimento colocado no reator nuclear de Savannah River em South Carolina



~ 6 ν / fissão
~ 2 x 10²⁰ ν /s/GW



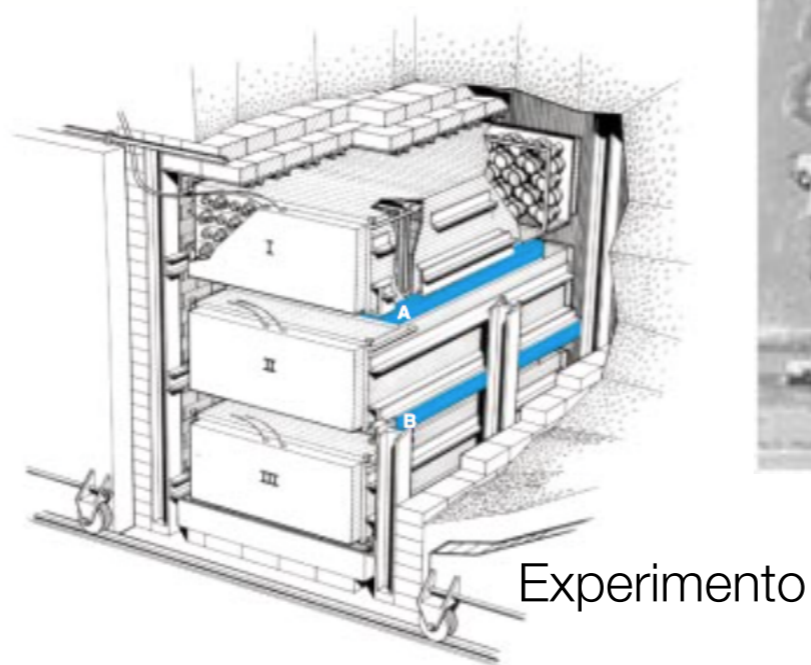
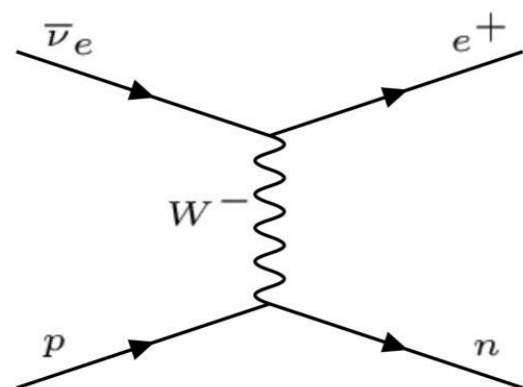
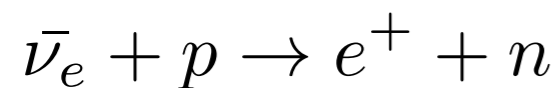
Reactores nucleares como fonte de neutrinos



<https://indico.cern.ch/event/825708/contributions/3550278/attachments/1929543/3195464/dyb-neutrino-geoscience-prague.pdf>

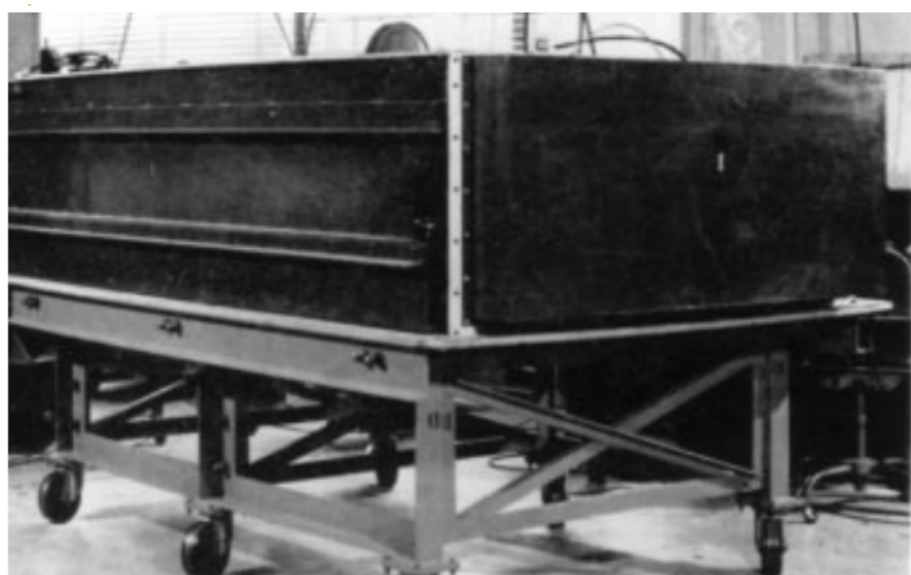
Experimento de Savannah River

Detecção de neutrinos pelo Decaimento Beta Inverso



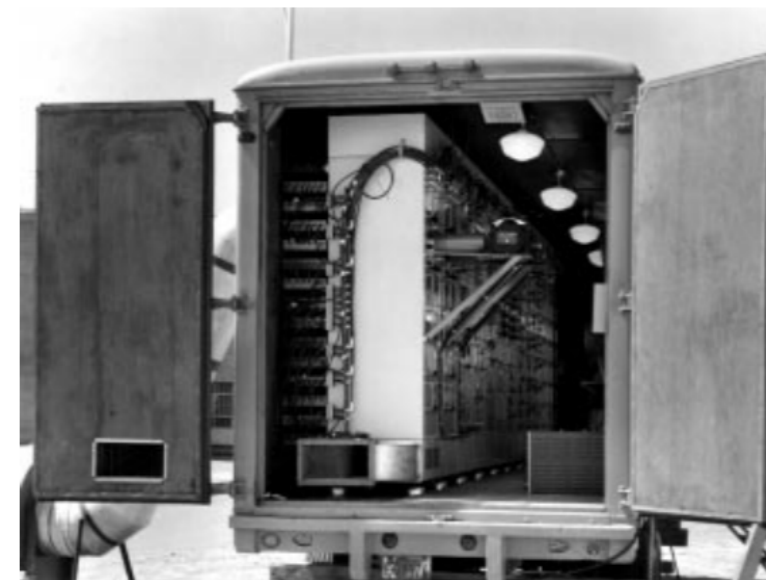
P Reactor – Savannah River

Experimento



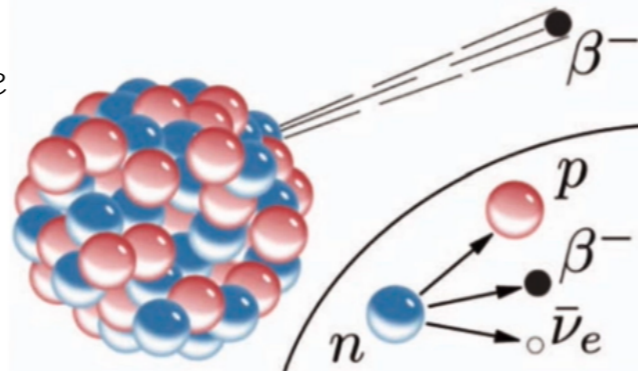
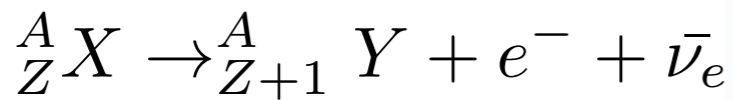
Um dos módulos do Experimento

Blindagem do experimento



Camião com o sistema de aquisição de dados

Postulados por Pauli em 1930 para explicar o decaimento beta (chamado no começo de “nêutron”, pois não tinha carga)



Batizado com o nome de "neutrino" por Fermi em 1934 quem considerou seriamente a ideia de Pauli e realizou a Teoria do decaimento Beta



Muito difícil de serem detectados !!

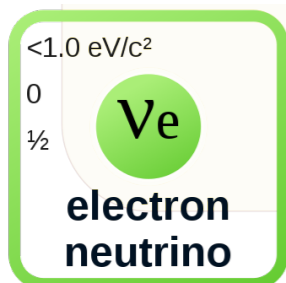


Prêmio Nobel 1938

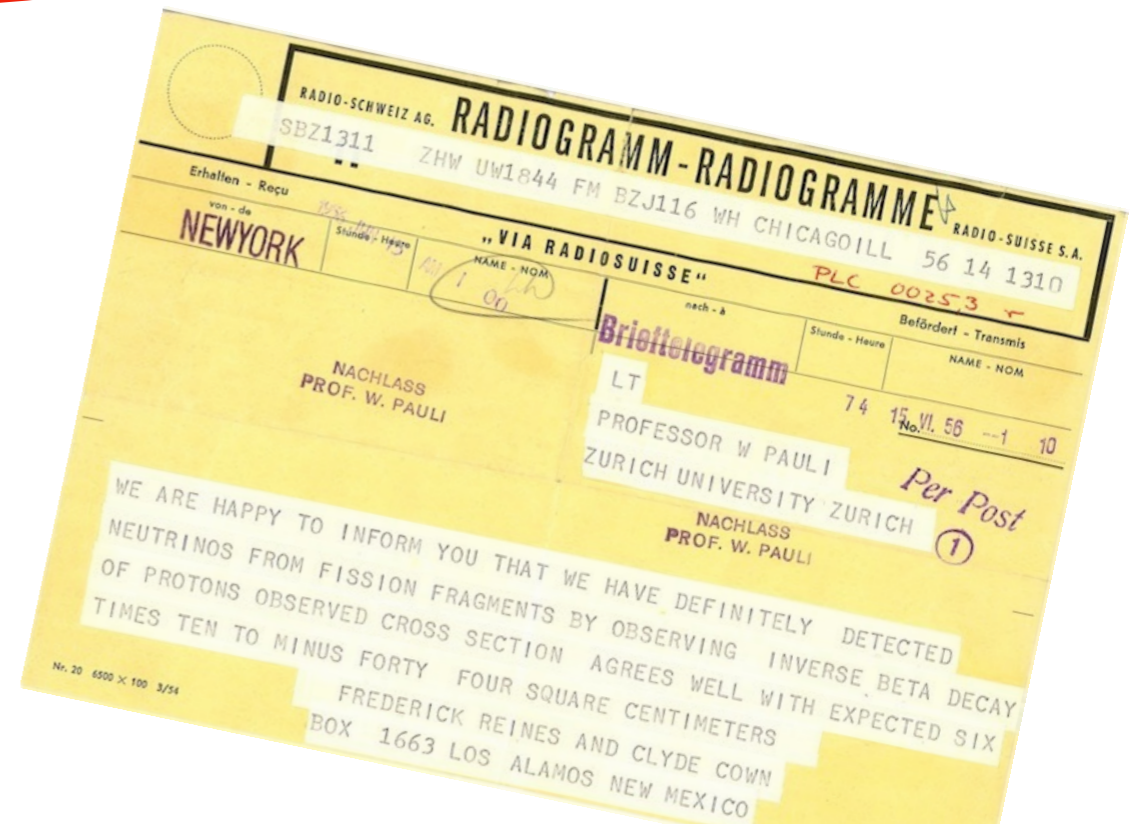
Neutrinos

Várias tentativas...

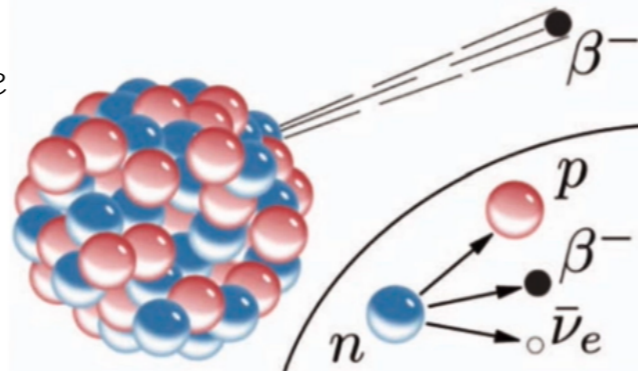
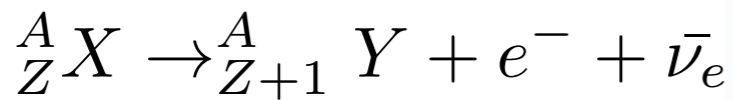
Detectados pela primeira vez por Cowan & Reines em 1956 com um experimento colocado no reator nuclear de Savannah River em South Carolina



~ 6 v / fissão
~ 2 x 10²⁰ v /s/GW



Postulados por Pauli em 1930 para explicar o decaimento beta (chamado no começo de “nêutron”, pois não tinha carga)



Batizado com o nome de "neutrino" por Fermi em 1934 quem considerou seriamente a ideia de Pauli e realizou a Teoria do decaimento Beta



Muito difícil de serem detectados !!

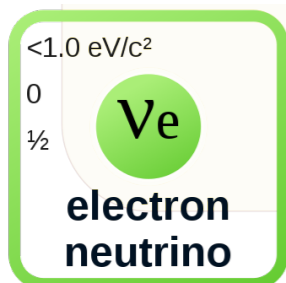


Prêmio Nobel 1938

Neutrinos

Várias tentativas...

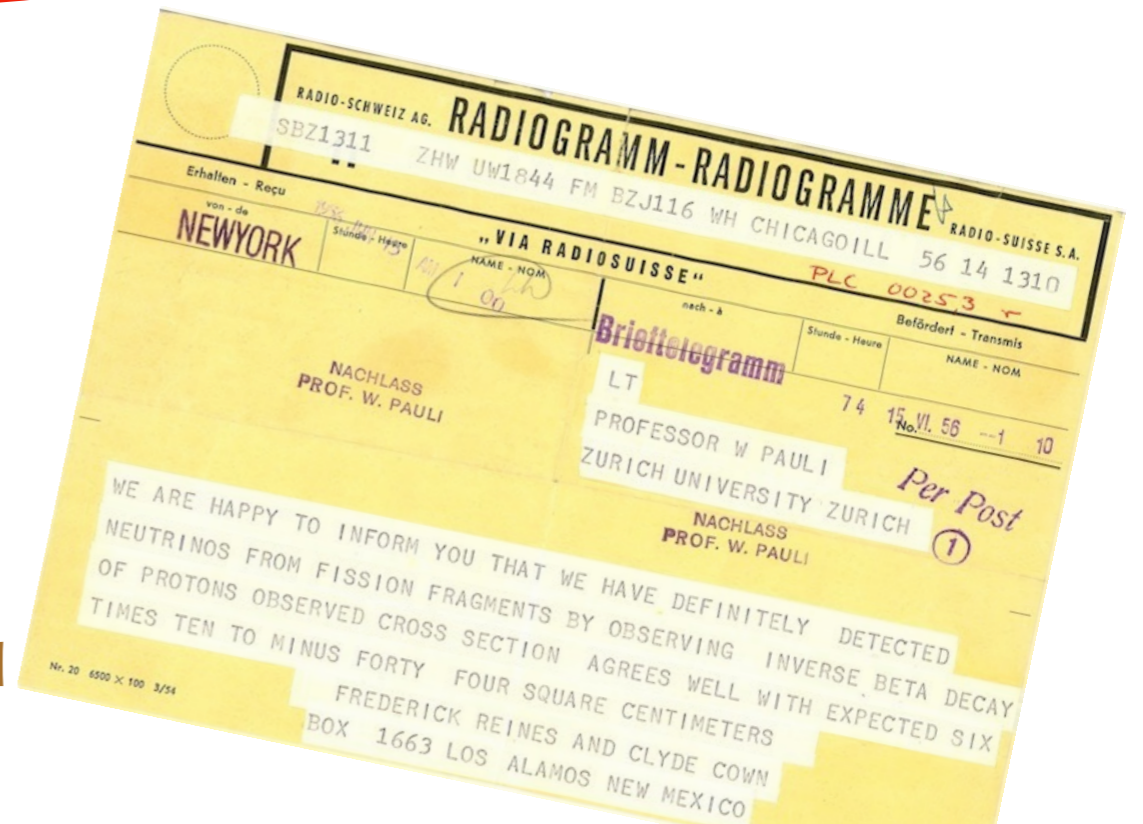
Detectados pela primeira vez por Cowan & Reines em 1956 com um experimento colocado no reator nuclear de Savannah River em South Carolina



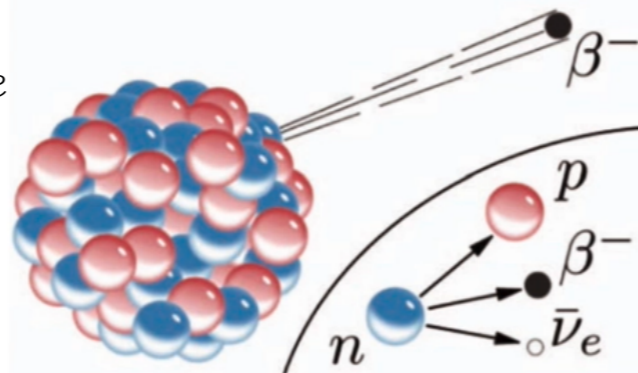
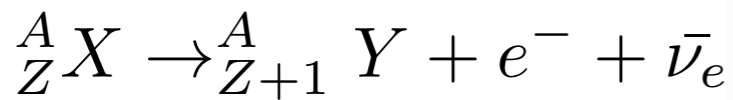
~ 6 ν / fissão
~ 2 x 10²⁰ ν /s/GW



Prêmio Nobel 1995



Postulados por Pauli em 1930 para explicar o decaimento beta (chamado no começo de “nêutron”, pois não tinha carga)



Batizado com o nome de "neutrino" por Fermi em 1934 quem considerou seriamente a ideia de Pauli e realizou a Teoria do decaimento Beta



Muito difícil de serem detectados !!

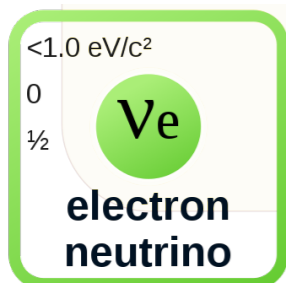


Prêmio Nobel 1938

Neutrinos existem e podem ser detectados !!!

Várias tentativas...

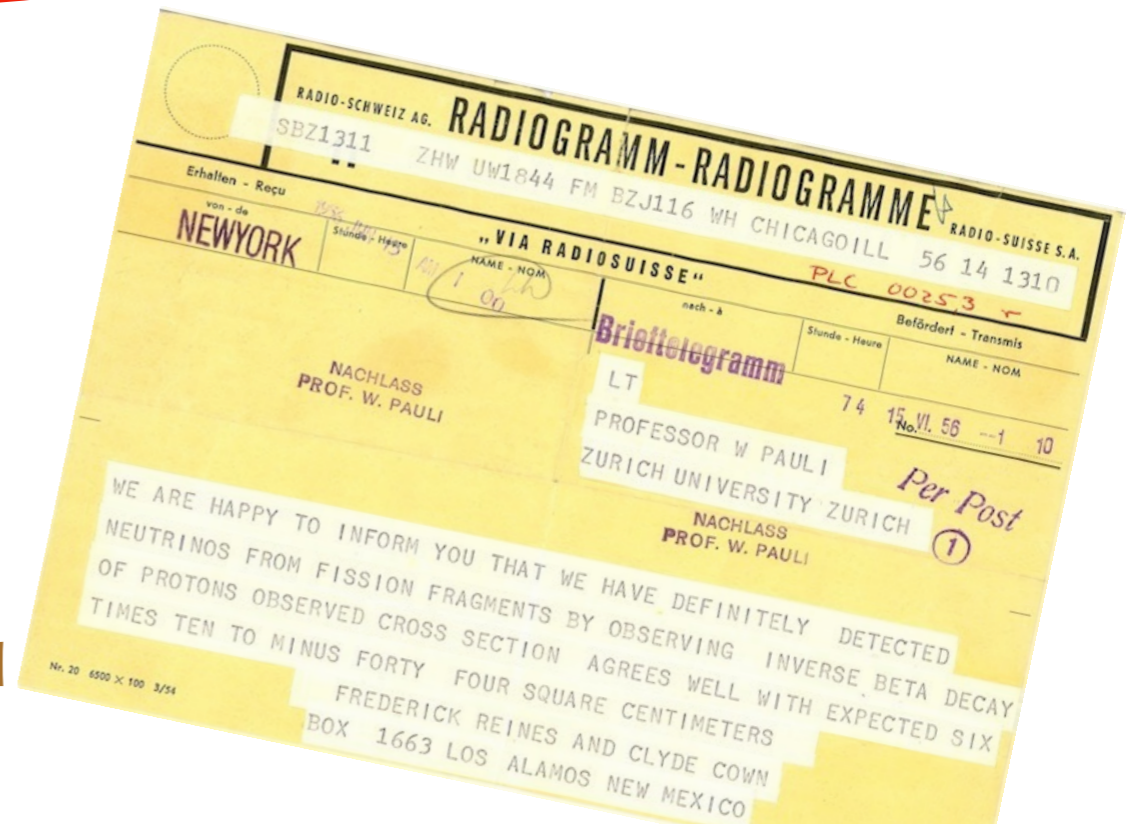
Detectados pela primeira vez por Cowan & Reines em 1956 com um experimento colocado no reator nuclear de Savannah River em South Carolina



~ 6 ν / fissão
~ 2 x 10²⁰ ν /s/GW



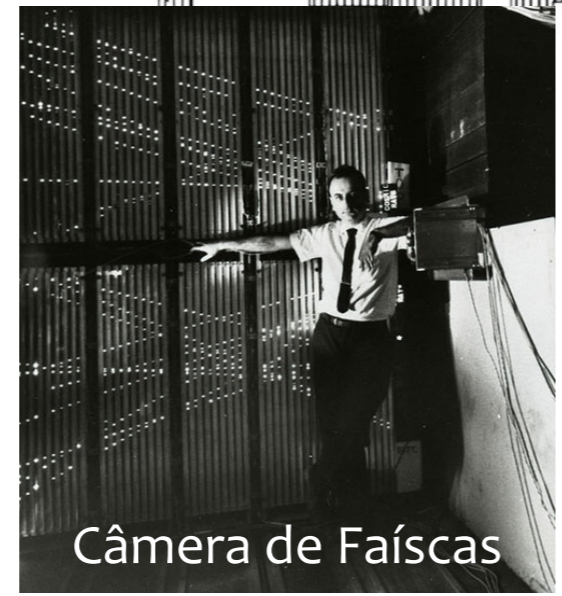
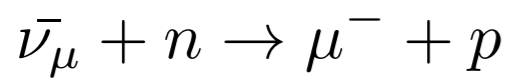
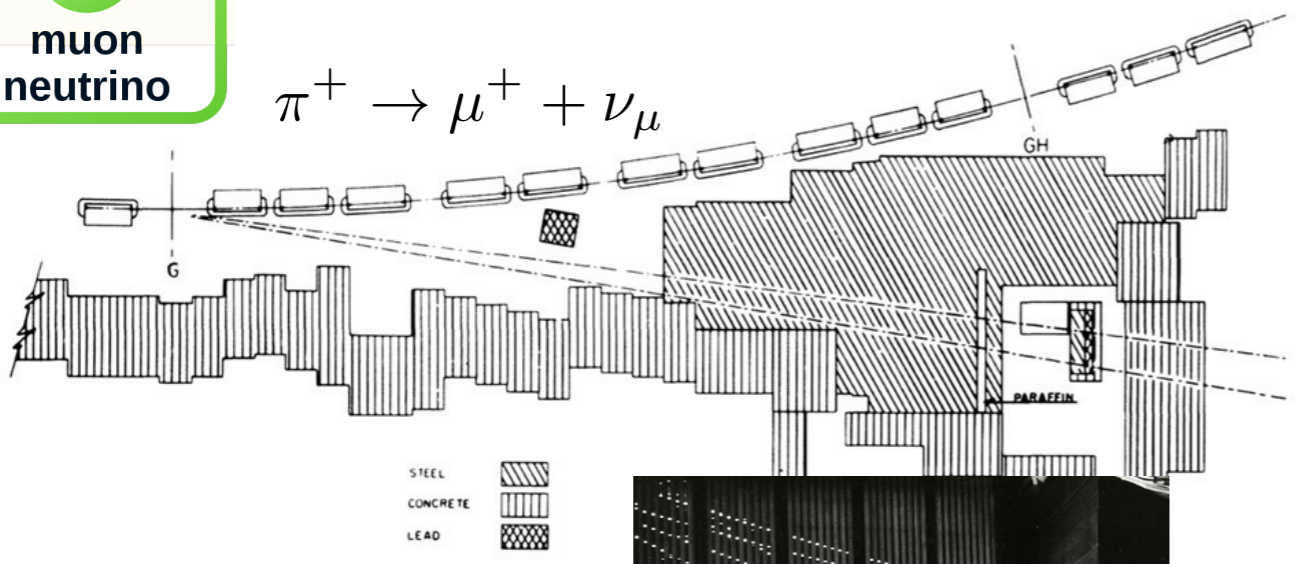
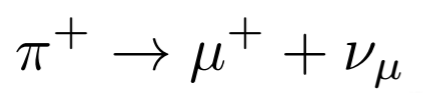
Prêmio Nobel 1995



Neutrinos podem ser detectados !!!

1962

$<0.17 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_μ
muon
neutrino



Neutrinos podem ser detectados !!!

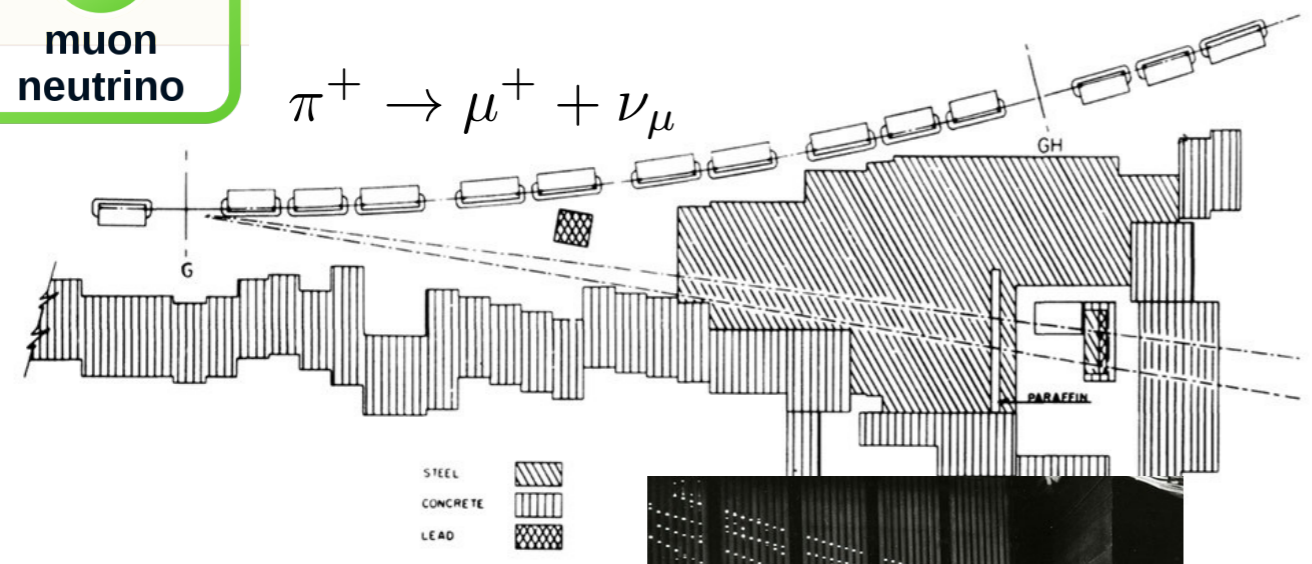
1962

$<0.17 \text{ MeV}/c^2$

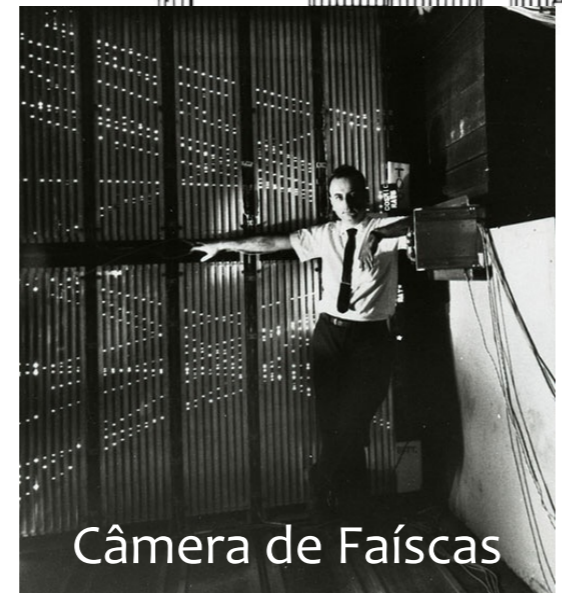
0
 $\frac{1}{2}$

ν_{μ}

muon
neutrino



$$\bar{\nu}_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p$$

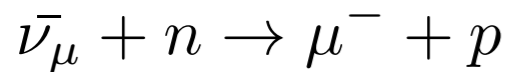
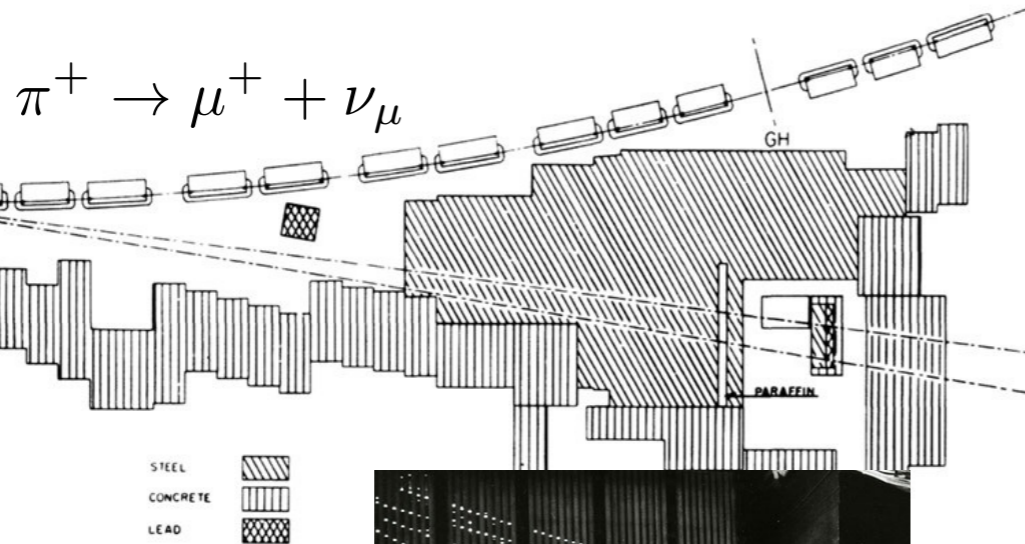


Prêmio Nobel
1988

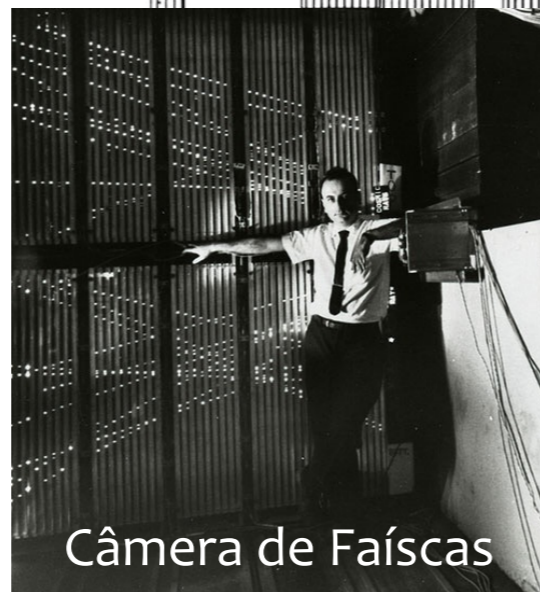
Neutrinos podem ser detectados !!!

1962

<math><0.17 \text{ MeV}/c^2</math>
 0
 $\frac{1}{2}$
 ν_μ
 muon
 neutrino



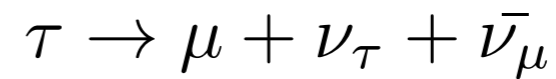
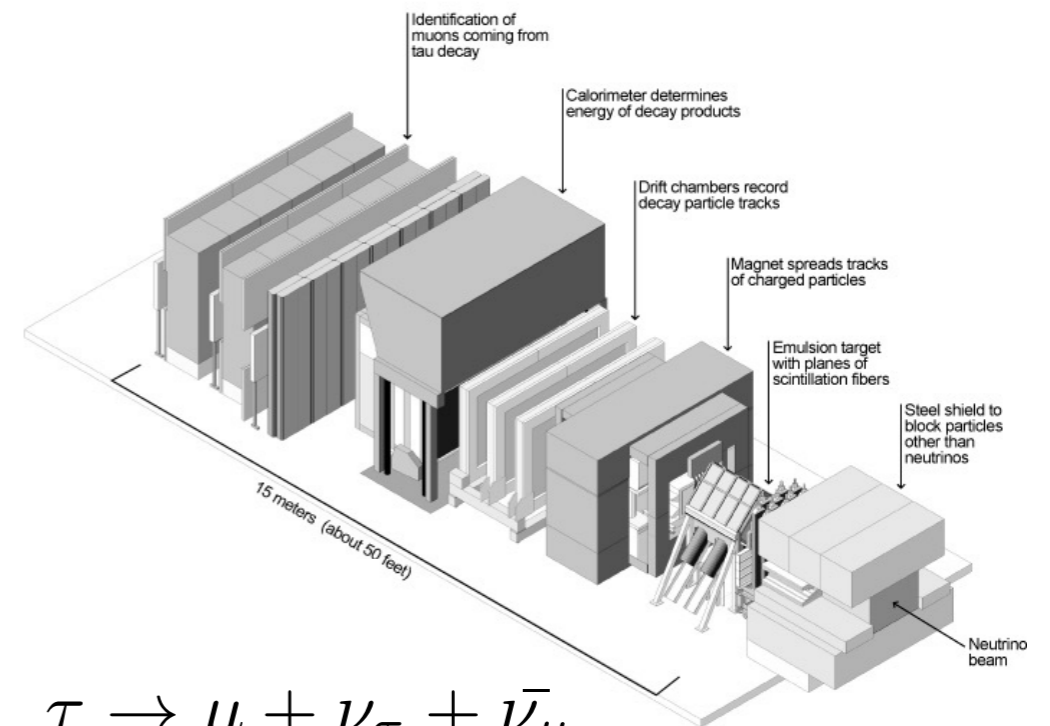
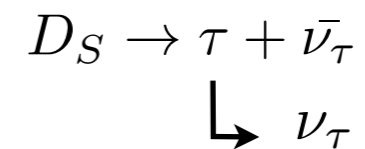
Prêmio Nobel
 1988



2000

<math><18.2 \text{ MeV}/c^2</math>
 0
 $\frac{1}{2}$
 ν_τ
 tau
 neutrino

Feixe de prótons de 800 GeV

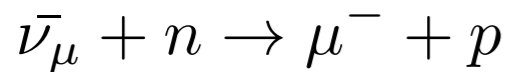
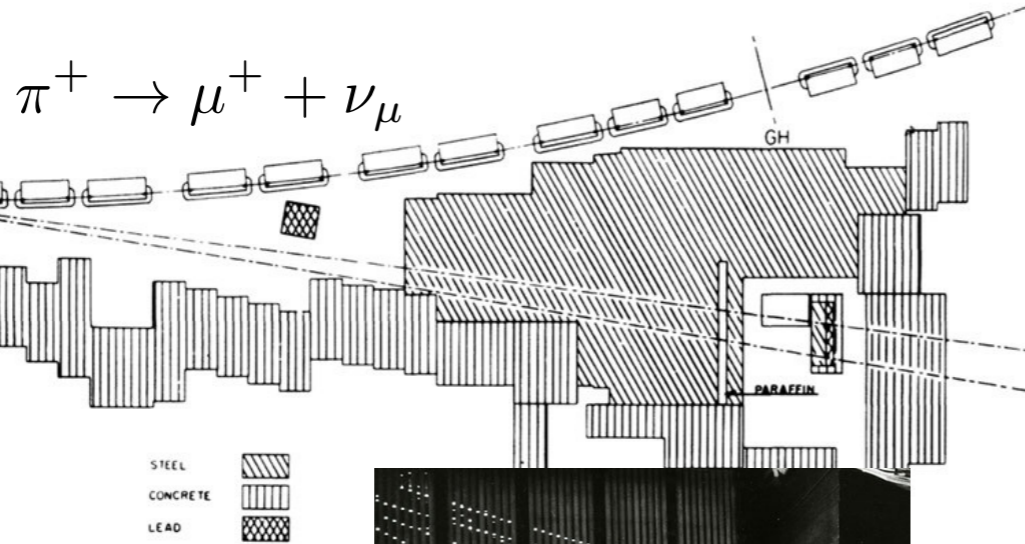


4 eventos detectados

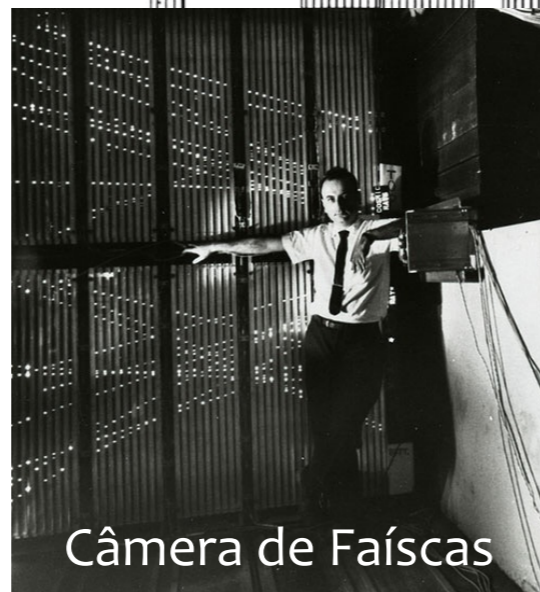
Neutrinos podem ser detectados !!!

1962

<0.17 MeV/c²
0
1/2
 ν_μ
muon
neutrino



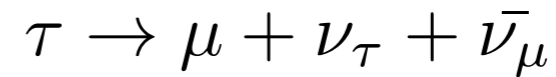
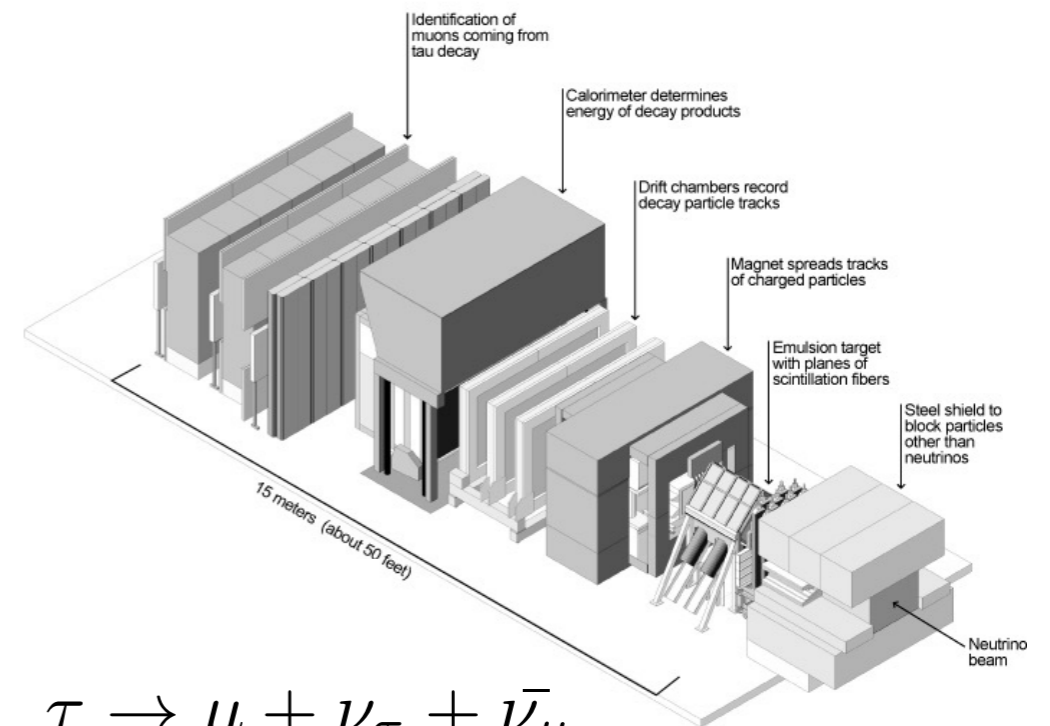
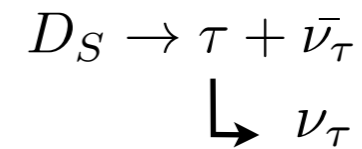
Prêmio Nobel
1988



2000

<18.2 MeV/c²
0
1/2
 ν_τ
tau
neutrino

Feixe de prótons de 800 GeV



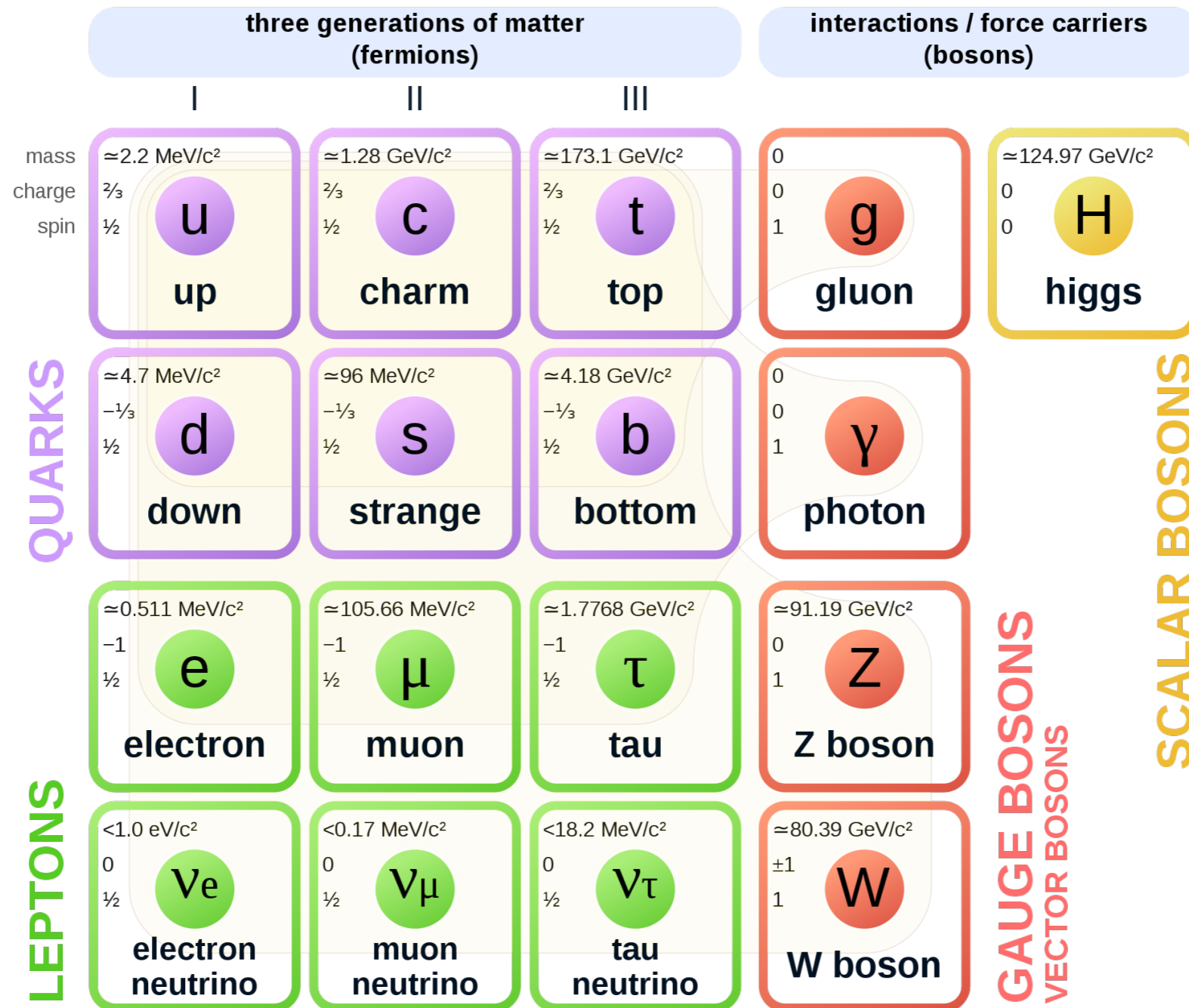
4 eventos detectados

... e vêm em vários sabores !

O que sabemos (e não) dos neutrinos?

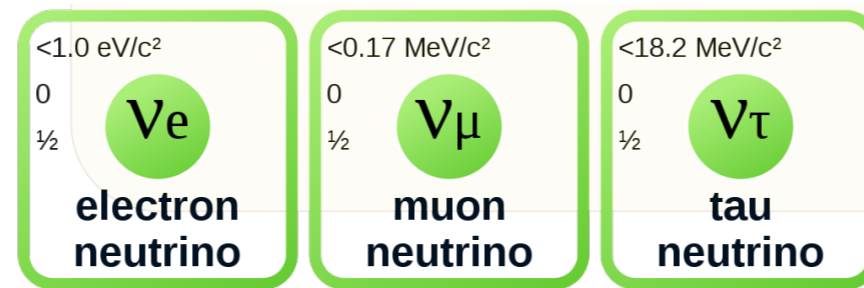
O que sabemos (e não) dos neutrinos?

- Partícula elementar (não possui estrutura interna) do Modelo Padrão



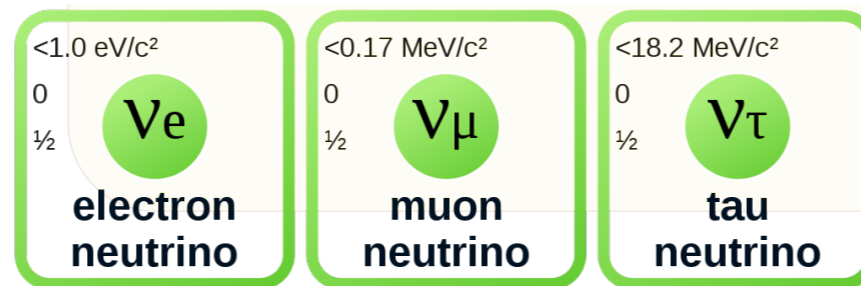
O que sabemos (e não) dos neutrinos?

- Partícula elementar (não possui estrutura interna) do Modelo Padrão



O que sabemos (e não) dos neutrinos?

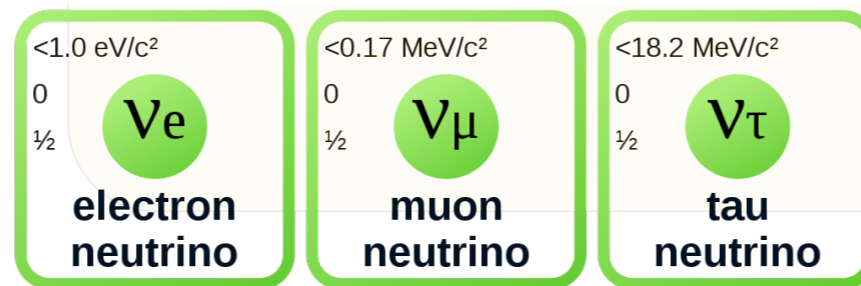
- Partícula elementar (não possui estrutura interna) do Modelo Padrão



- ▶ Vêm em 3 sabores, cada um associado a um lépton de cada família
- ▶ Não possuem carga
- ▶ Têm uma massa muito pequena, ainda não foi possível determiná-las

O que sabemos (e não) dos neutrinos?

- Partícula elementar (não possui estrutura interna) do Modelo Padrão



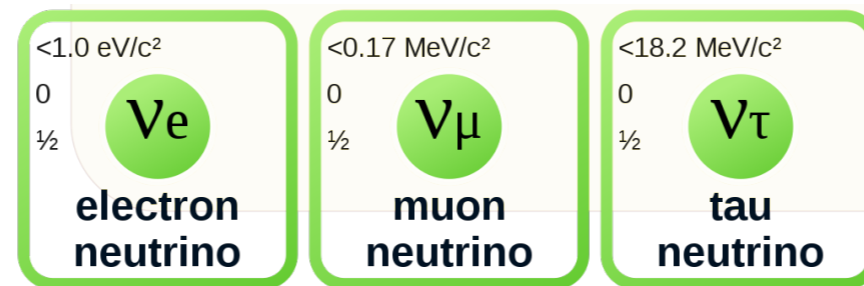
- ▶ Vêm em 3 sabores, cada um associado a um lépton de cada família
- ▶ Não possuem carga
- ▶ Têm uma massa muito pequena, ainda não foi possível determiná-las

Na verdade os neutrinos no Modelo Padrão **não possuem massa!**

Evidência de física nova além do Modelo Padrão

O que sabemos (e não) dos neutrinos?

- Partícula elementar (não possui estrutura interna) do Modelo Padrão

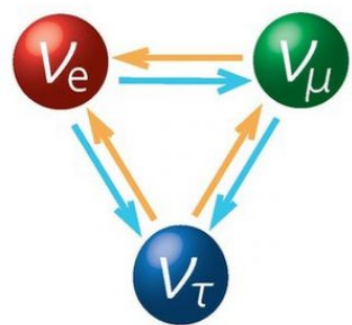


- ▶ Vêm em 3 sabores, cada um associado a um lépton de cada família
- ▶ Não possuem carga
- ▶ Têm uma massa muito pequena, ainda não foi possível determiná-las

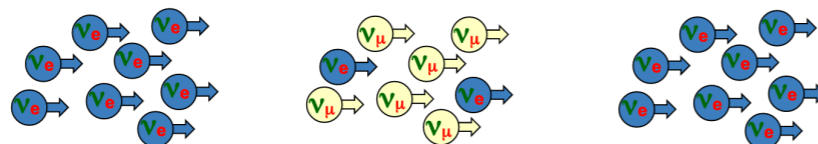
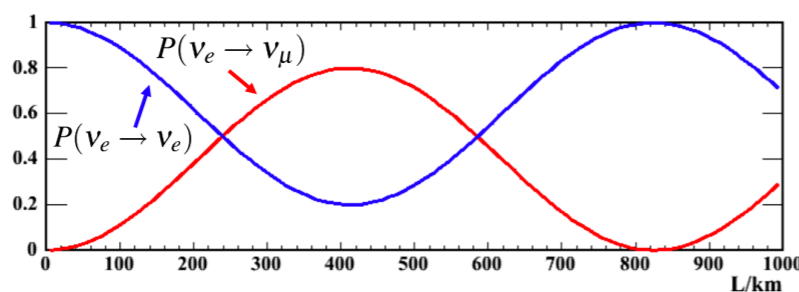
Na verdade os neutrinos no Modelo Padrão **não possuem massa!**

Evidência de nova física além do Modelo Padrão

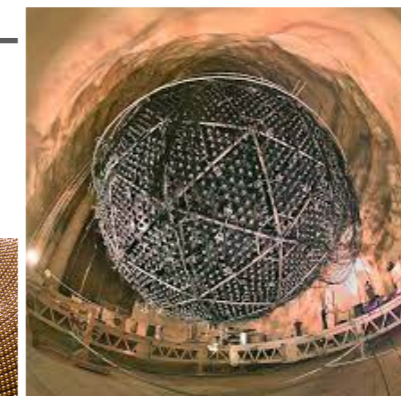
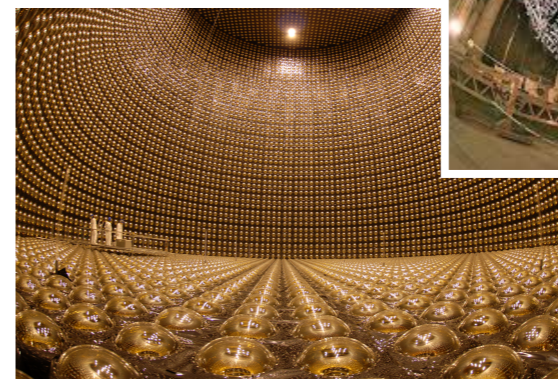
Oscilação de neutrinos



Credito: BBC



super-Kamiokande



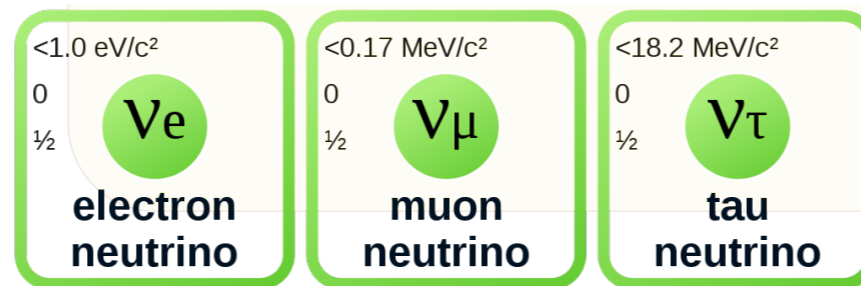
SNO



Prêmio Nobel
2015

O que sabemos (e não) dos neutrinos?

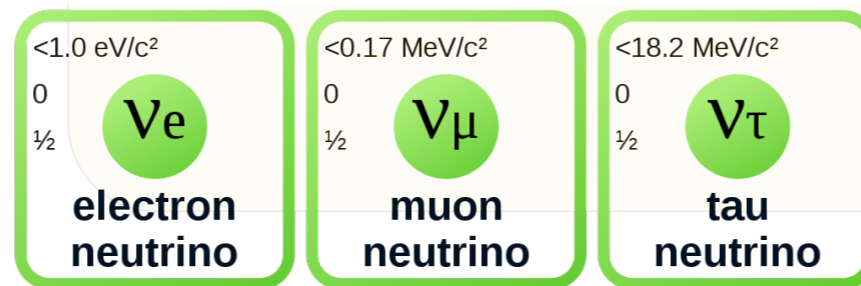
- Partícula elementar (não possui estrutura interna) do Modelo Padrão



- ▶ Vêm em 3 sabores, cada um associado a um lépton de cada família
- ▶ Não possuem carga
- ▶ Têm uma massa muito pequena, ainda não foi possível determiná-las
 - Não conhecemos a hierarquia das massas para ν_1, ν_2, ν_3

O que sabemos (e não) dos neutrinos?

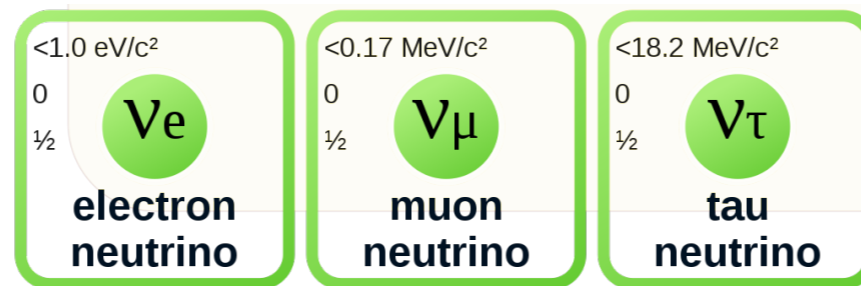
- Partícula elementar (não possui estrutura interna) do Modelo Padrão



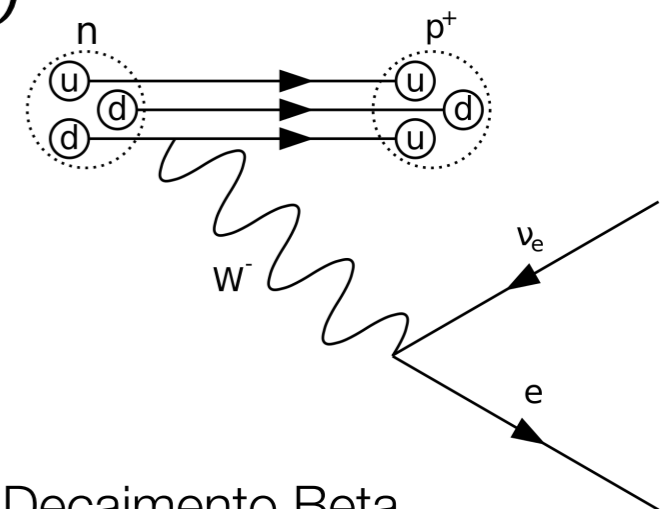
- ▶ Vêm em 3 sabores, cada um associado a um lépton de cada família
 - ▶ Não possuem carga
 - ▶ Têm uma massa muito pequena, ainda não foi possível determiná-las
 - Não conhecemos a hierarquia das massas para ν_1, ν_2, ν_3
- Interação muito, muito pouco, através da força fraca (W^\pm, Z)

O que sabemos (e não) dos neutrinos?

- Partícula elementar (não possui estrutura interna) do Modelo Padrão

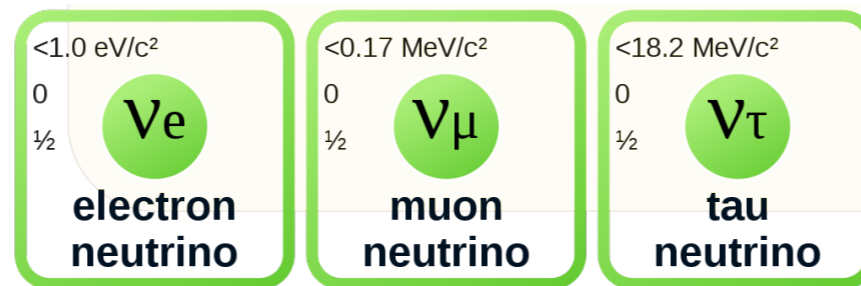


- ▶ Vêm em 3 sabores, cada um associado a um lépton de cada família
- ▶ Não possuem carga
- ▶ Têm uma massa muito pequena, ainda não foi possível determiná-las
 - Não conhecemos a hierarquia das massas para ν_1, ν_2, ν_3
- Interação muito, muito pouco, através da força fraca (W^\pm, Z)

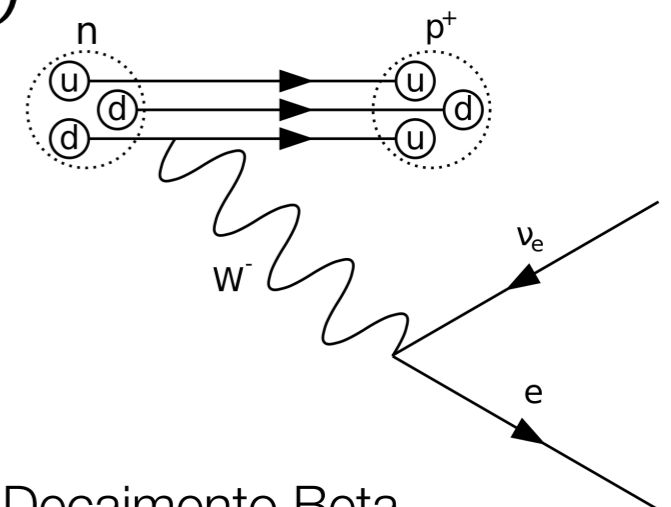


O que sabemos (e não) dos neutrinos?

- Partícula elementar (não possui estrutura interna) do Modelo Padrão

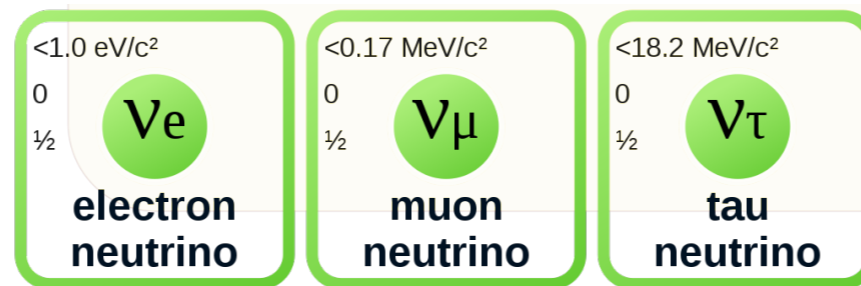


- ▶ Vêm em 3 sabores, cada um associado a um lépton de cada família
- ▶ Não possuem carga
- ▶ Têm uma massa muito pequena, ainda não foi possível determiná-las
 - Não conhecemos a hierarquia das massas para ν_1, ν_2, ν_3
- Interação muito, muito pouco, através da força fraca (W^\pm, Z)
- Existem em grandes quantidades
 - ▶ Partículas com massa mais abundantes



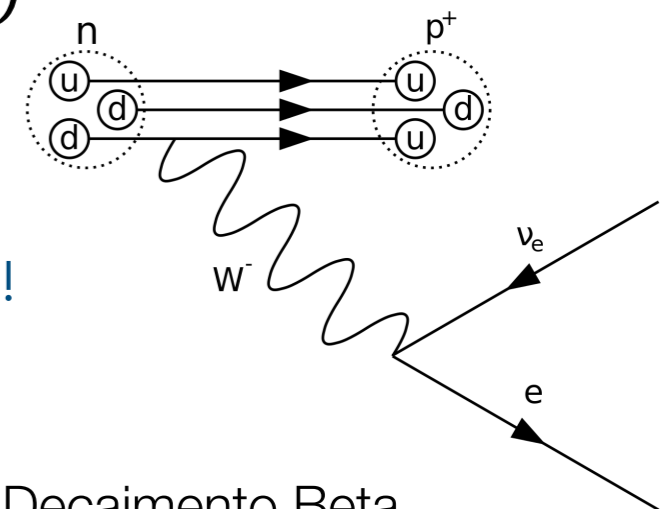
O que sabemos (e não) dos neutrinos?

- Partícula elementar (não possui estrutura interna) do Modelo Padrão



- ▶ Vêm em 3 sabores, cada um associado a um lépton de cada família
- ▶ Não possuem carga
- ▶ Têm uma massa muito pequena, ainda não foi possível determiná-las
 - Não conhecemos a hierarquia das massas para ν_1, ν_2, ν_3
- Interação muito, muito pouco, através da força fraca (W^\pm, Z)
- Existem em grandes quantidades
 - ▶ Partículas com massa mais abundantes

Por cada elétron e quark no Universo tem 10 000 000 000 neutrinos!
Em 1 cm^3 do Universo temos ~ 300 neutrinos relíquias do Big Bang
Nosso corpo produz centenas de milhões de neutrinos por dia



Neutrinos: as misteriosas partículas fantasmas

Onde encontramos aos neutrinos?

Na natureza:

- O Sol produz tantos neutrinos que cada segundo nos atravessam 100 000 000 000 000
- A Terra também emite neutrinos, uns 60 000 000 000 por segundo por metro quadrado
- Raios cósmicos que interagem na atmosfera geram ~ 120 neutrinos atravessam nossa mão a cada segundo
- Objetos astrofísicos, como supernovas, galáxias de núcleos activos, etc.

Neutrinos: as misteriosas partículas fantasmas

Onde encontramos aos neutrinos?

Na natureza:

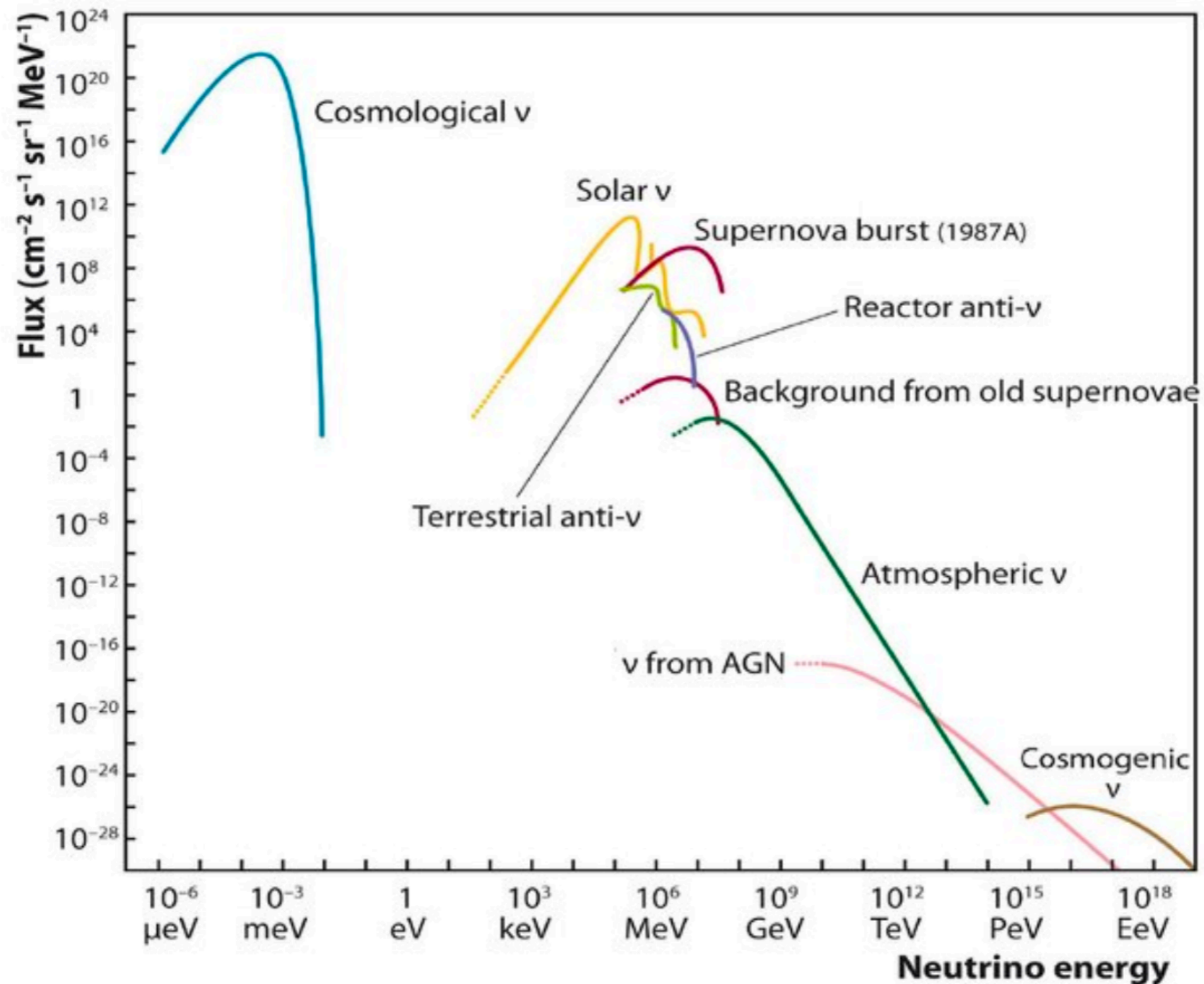
- O Sol produz tantos neutrinos que cada segundo nos atravessam 100 000 000 000 000
- A Terra também emite neutrinos, uns 60 000 000 000 por segundo por metro quadrado
- Raios cósmicos que interagem na atmosfera geram ~ 120 neutrinos atravessam nossa mão a cada segundo
- Objetos astrofísicos, como supernovas, galáxias de núcleos activos, etc.

Produzidos artificialmente:

- Reatores nucleares produzem $\sim 10^{20}$ neutrinos por segundo por GW de potência térmica
- Aceleradores produzem neutrinos mediante colisões de partículas em alvos com energias entre 0.3 - 30 GeV.

Neutrinos: as misteriosas partículas fantasmas

Onde encontramos aos neutrinos?



Neutrinos: as misteriosas partículas fantasmas

Onde encontramos aos neutrinos?

Na natureza:

- O Sol produz tantos neutrinos que cada segundo nos atravessam 100 000 000 000 000
- A Terra também emite neutrinos, uns 60 000 000 000 por segundo por metro quadrado
- Raios cósmicos que interagem na atmosfera geram ~ 120 neutrinos atravessam nossa mão a cada segundo
- Objetos astrofísicos, como supernovas, galáxias de núcleos activos, etc.

Produzidos artificialmente:

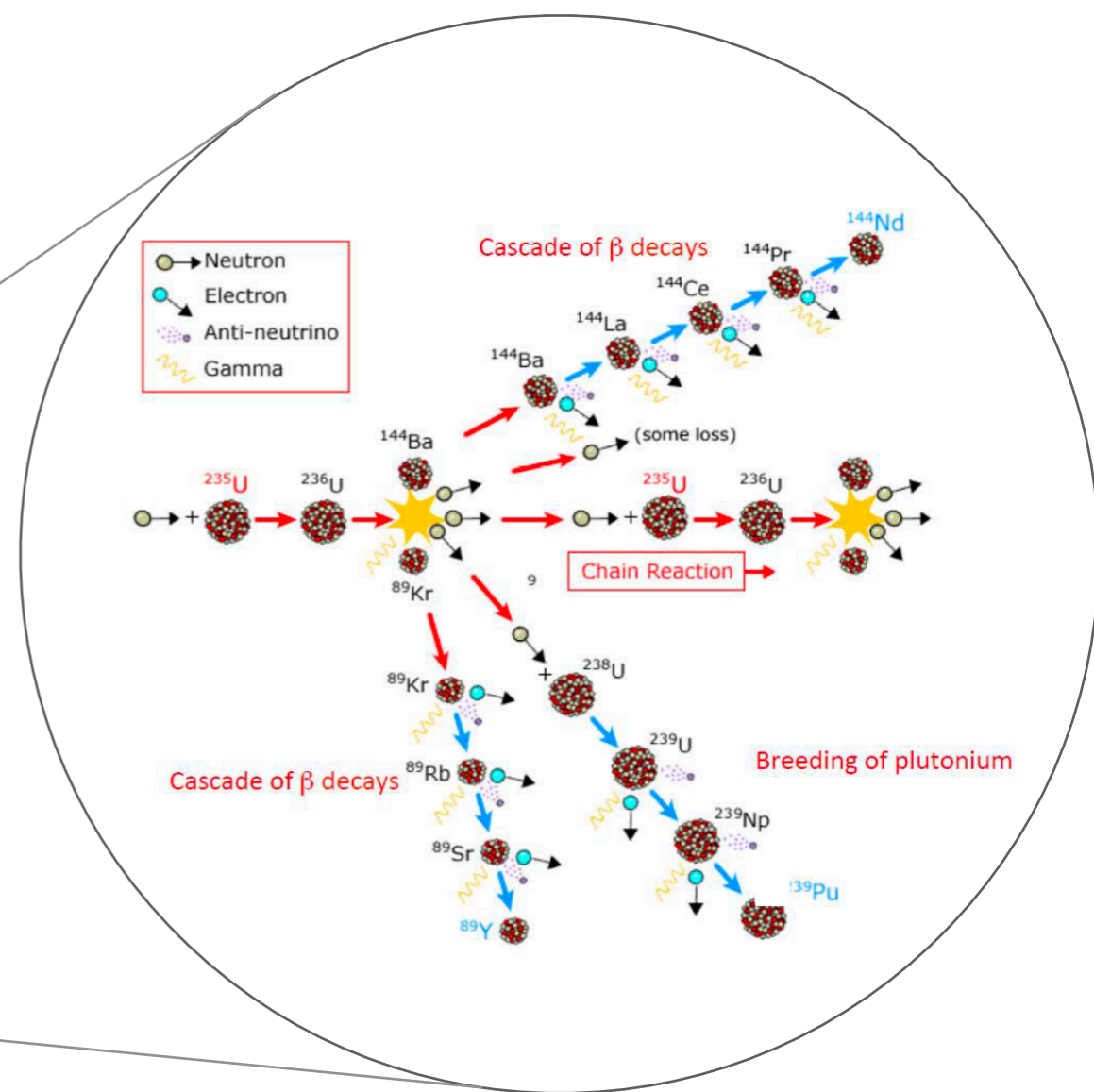
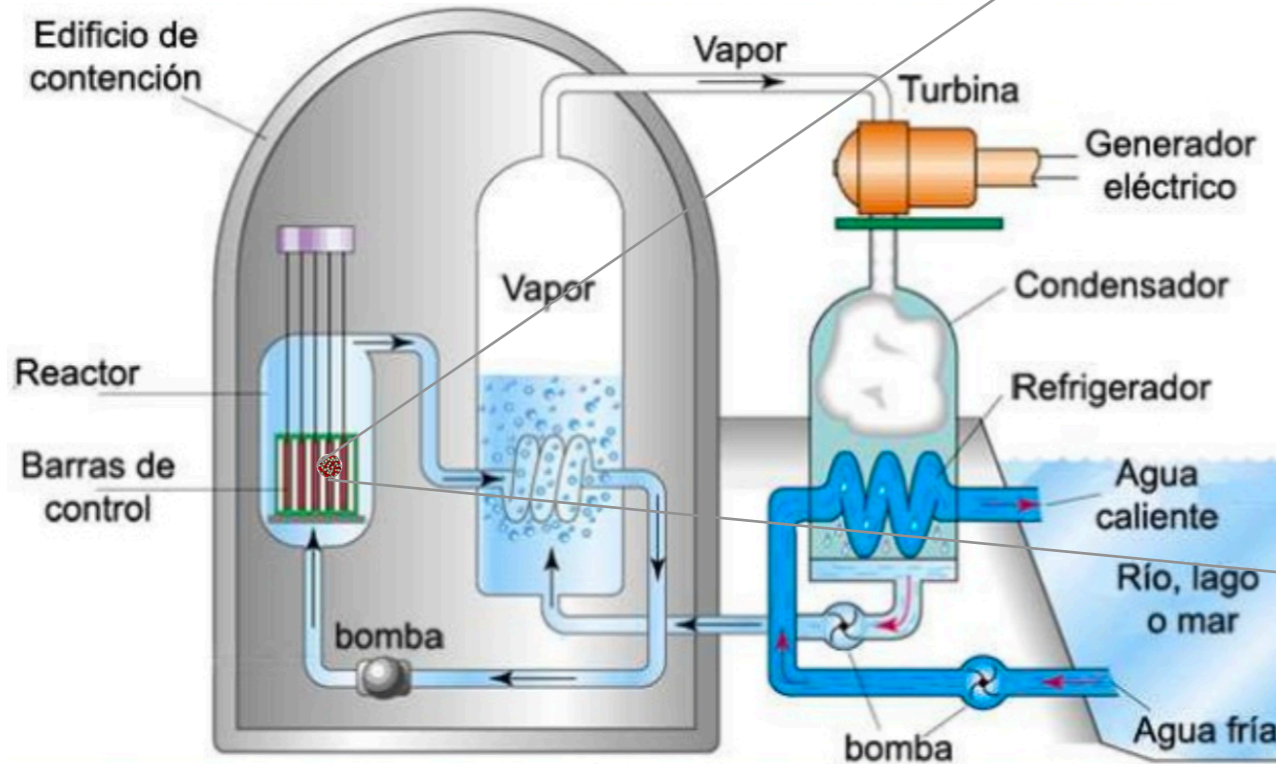
- Reactores nucleares produzem $\sim 10^{20}$ neutrinos por segundo por GW de potência térmica
- Aceleradores produzem neutrinos mediante colisões de partículas em alvos com energias entre 0.3 - 30 GeV.

Porque a gente não vê essas partículas, nem as sente?

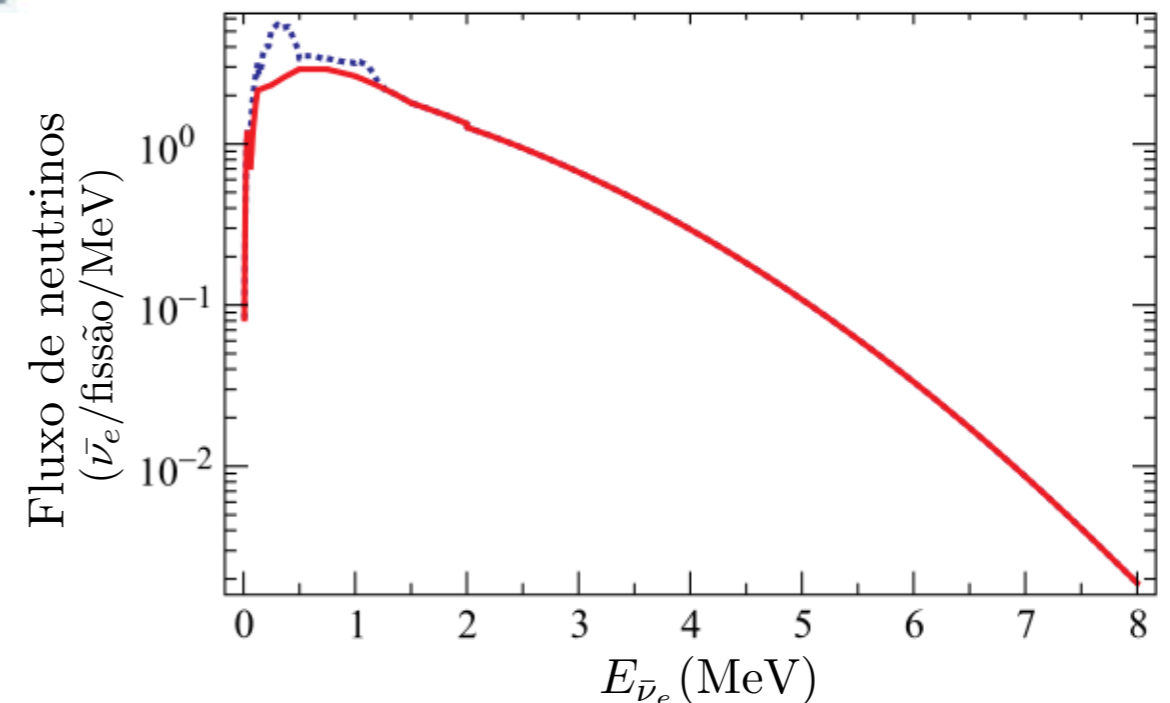
- Interação muito pouco
 - ▶ Dos neutrinos solares 1 de cada 10^{20} (100 000 000 000 000 000 000) dos que nos atravessam vão interagir na gente... Isto é vamos ter uma interação a cada ~ 9,5 meses

Neutrinos de reator

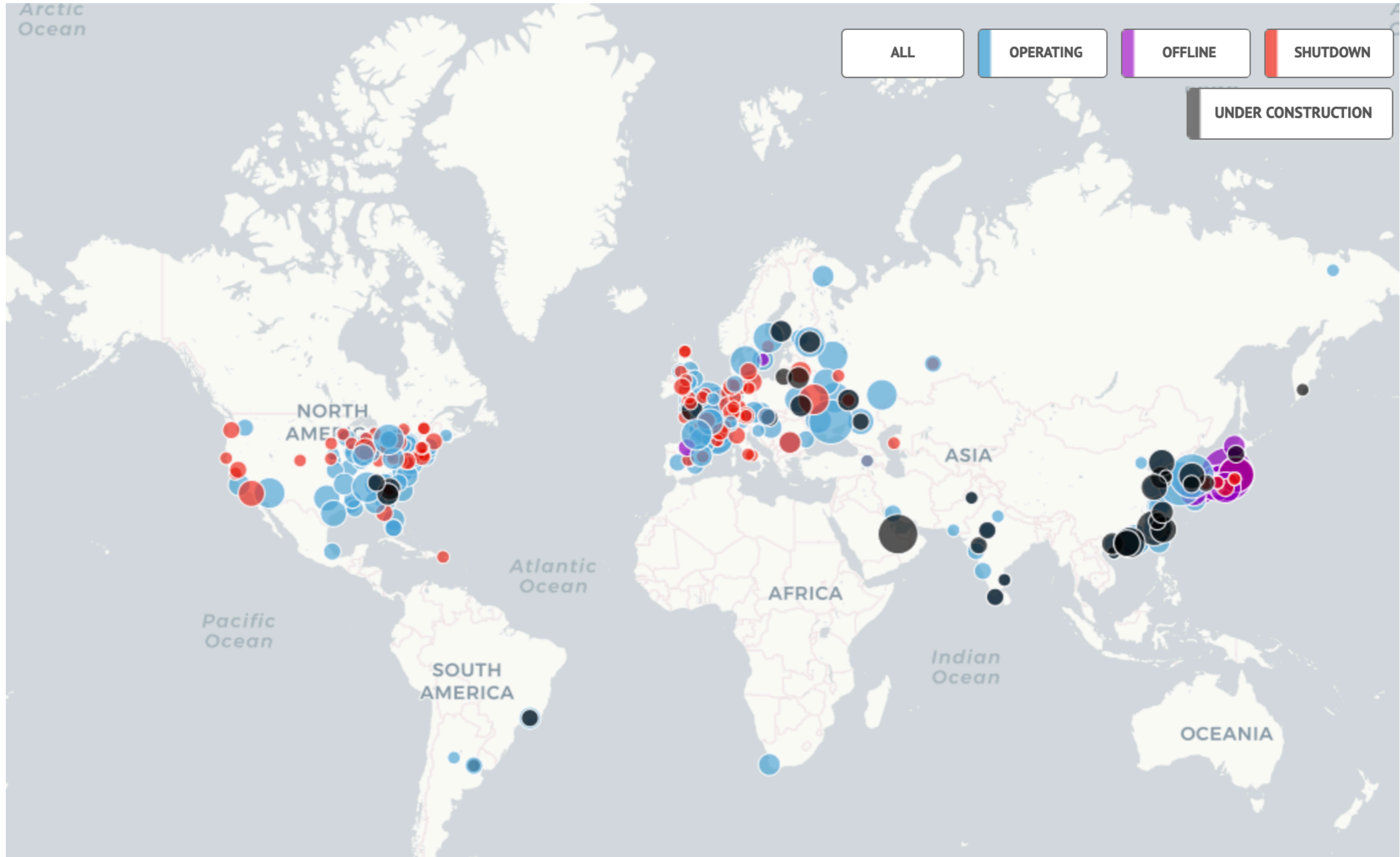
Fonte de neutrinos



- Reatores nucleares produzem anti-neutrinos puramente no sabor do $\bar{\nu}_e$ a partir de decaimentos beta de produtos de fissão
- Neutrinos de baixa energia < 10 MeV
- Fluxo de $\sim 6 \bar{\nu}_e$ por fissão
 $2 \times 10^{20} \bar{\nu}_e/\text{s}$ por $\text{GW}_{\text{térmicos}}$



Reatores no mundo



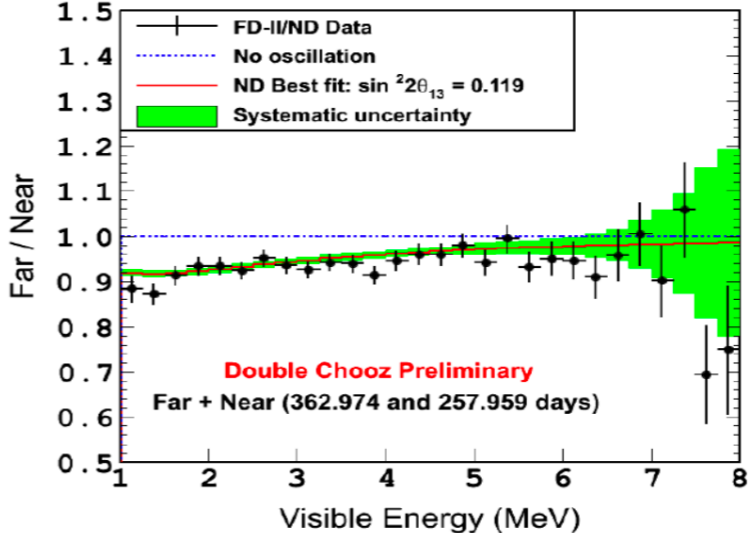
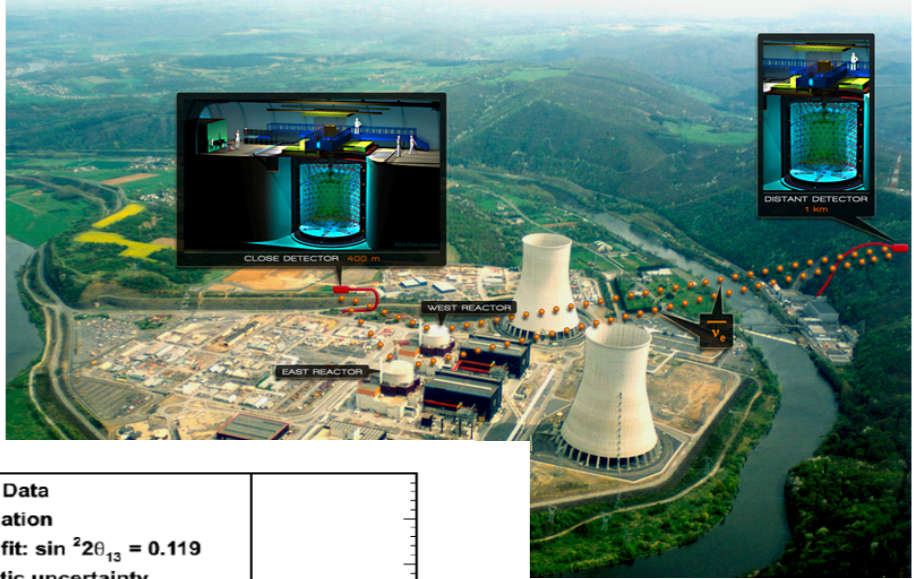
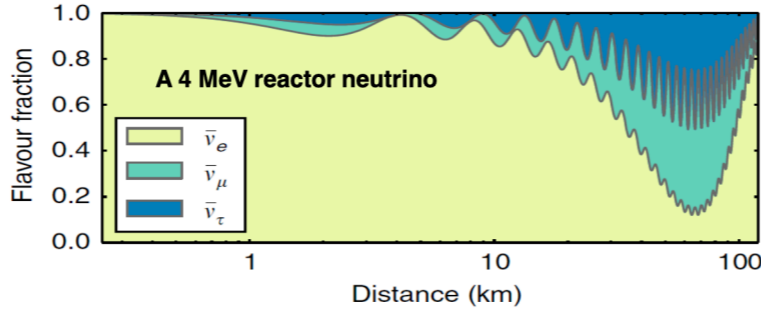
<https://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants>

Neutrinos de reator

Oscilação de neutrinos



Daya Bay



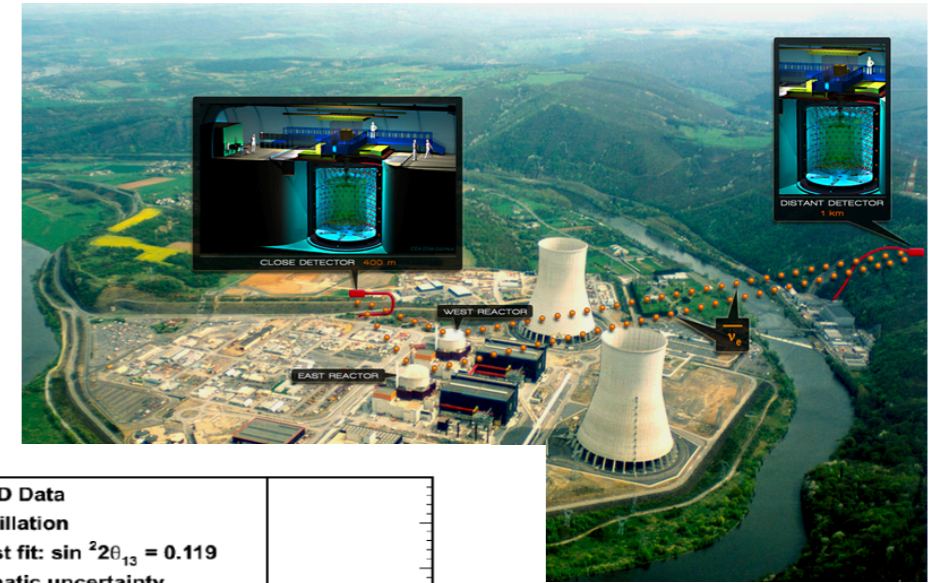
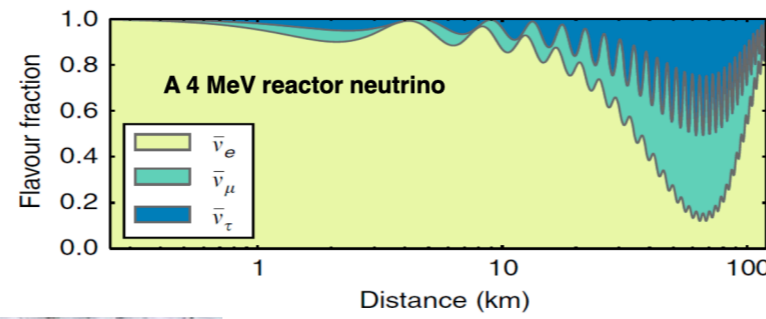
Double Chooz

Neutrinos de reator

Oscilação de neutrinos

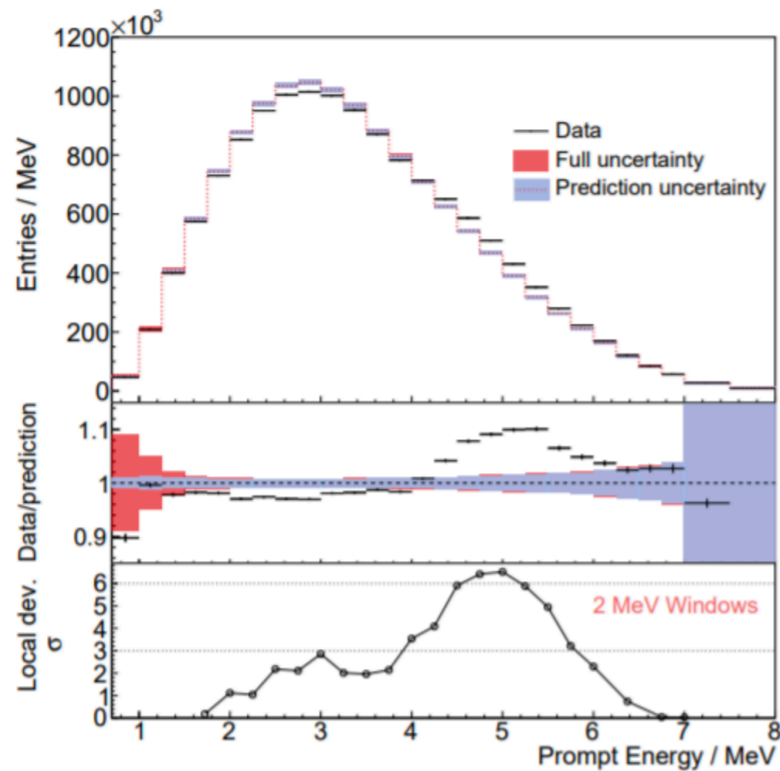


Daya Bay

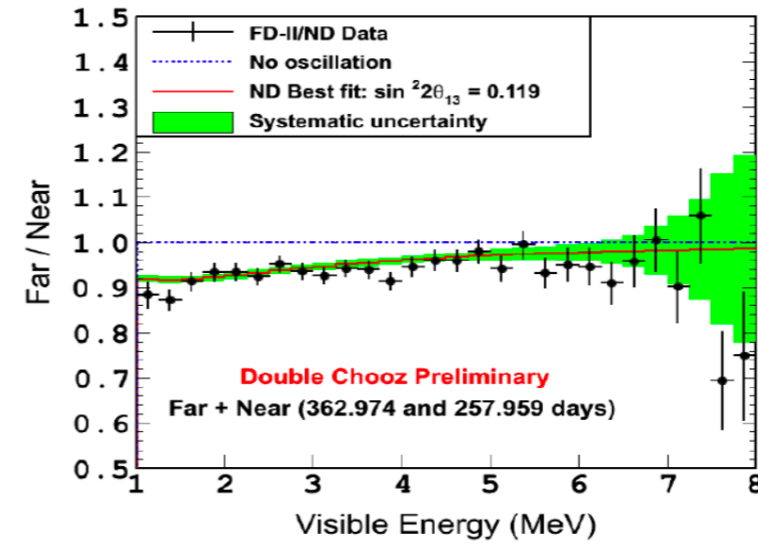


Espectro de anti-neutrino do elétron

Phys. Rev. Lett. 123, 111801 (2019)



Daya Bay



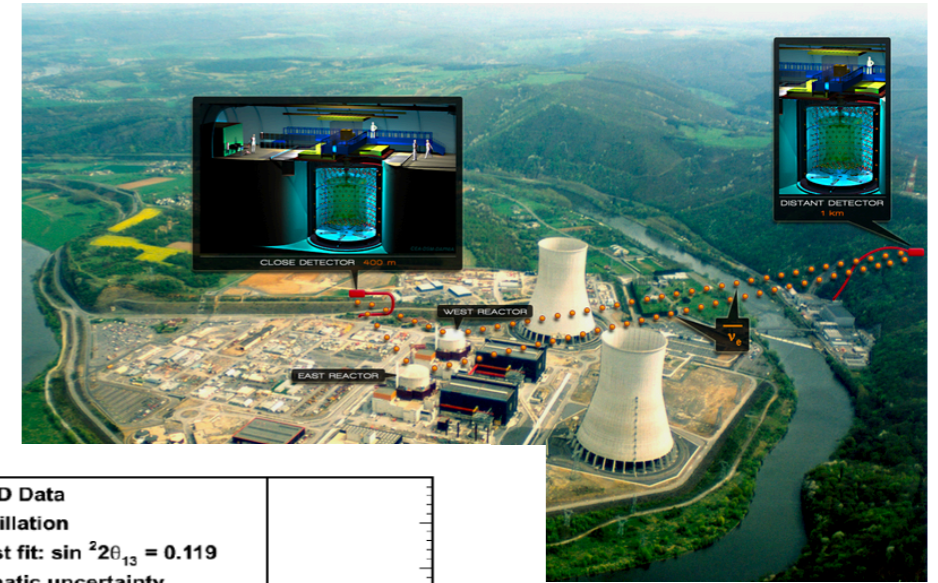
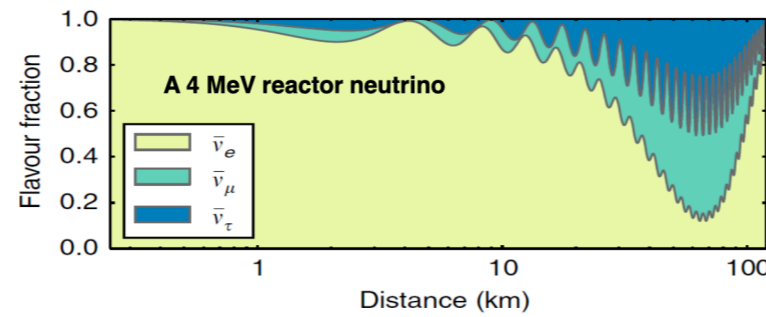
Double Chooz

Neutrinos de reator

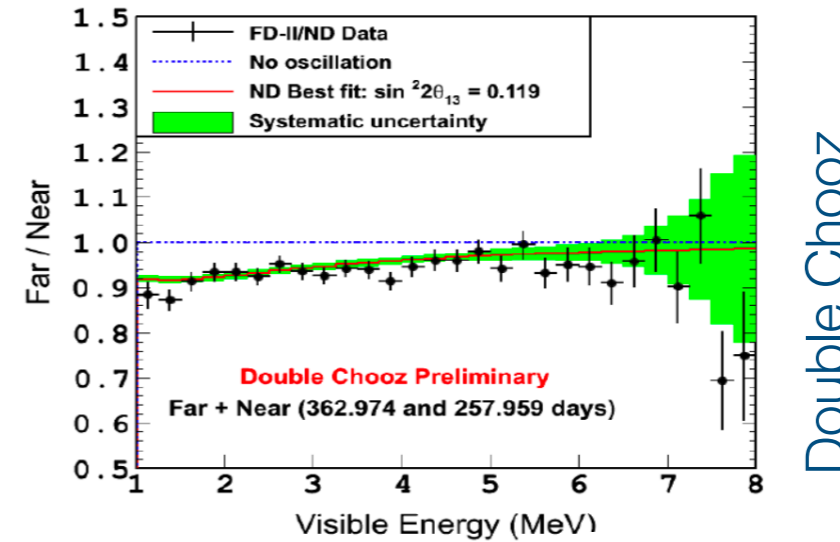
Oscilação de neutrinos



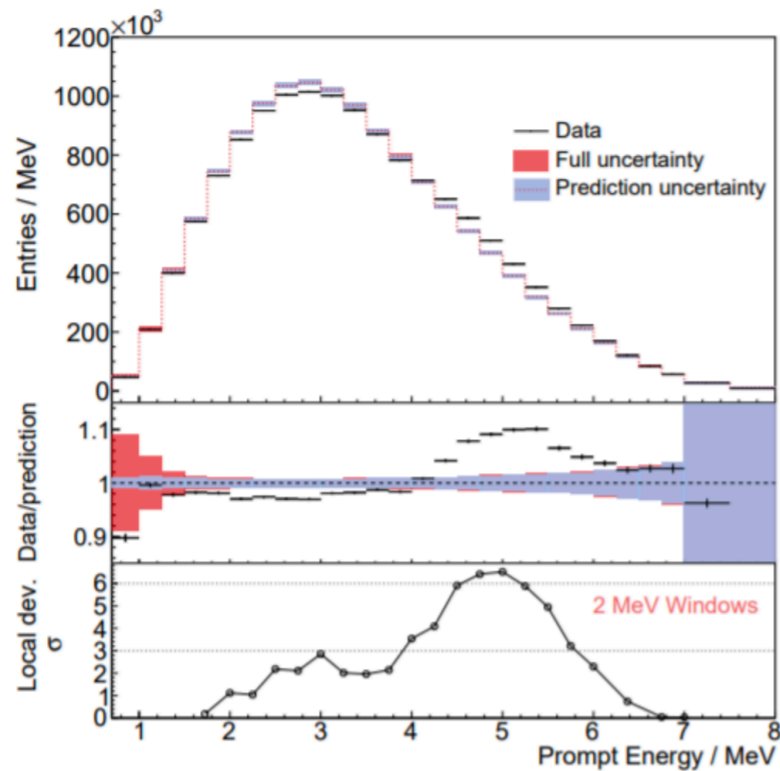
Daya Bay



Espectro de anti-neutrino do elétron

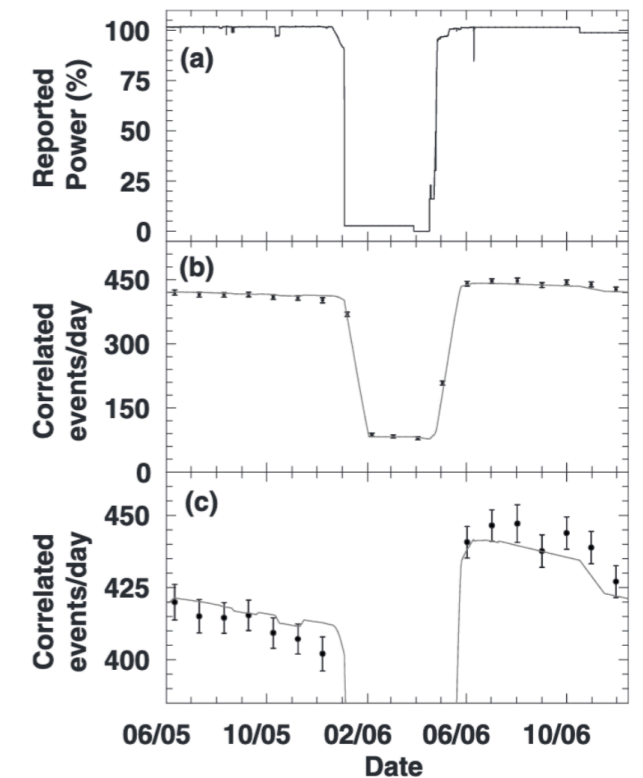
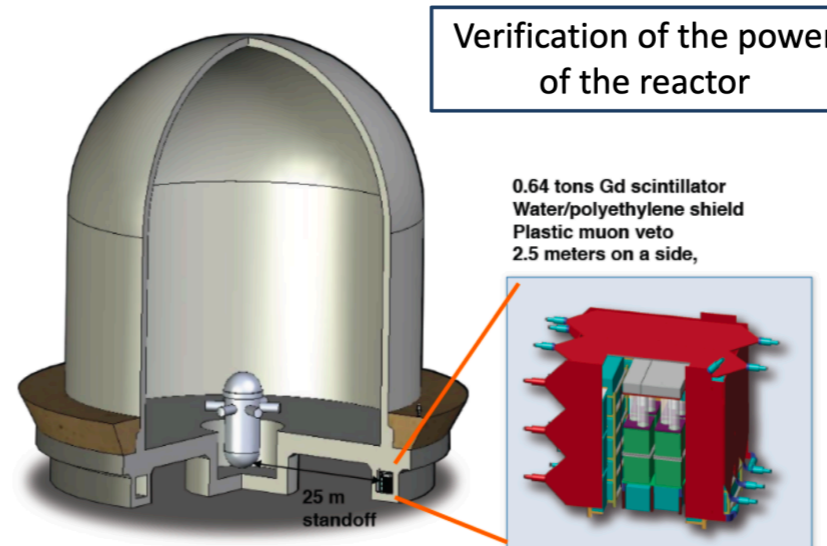


Phys. Rev. Lett. 123, 111801 (2019)



Daya Bay

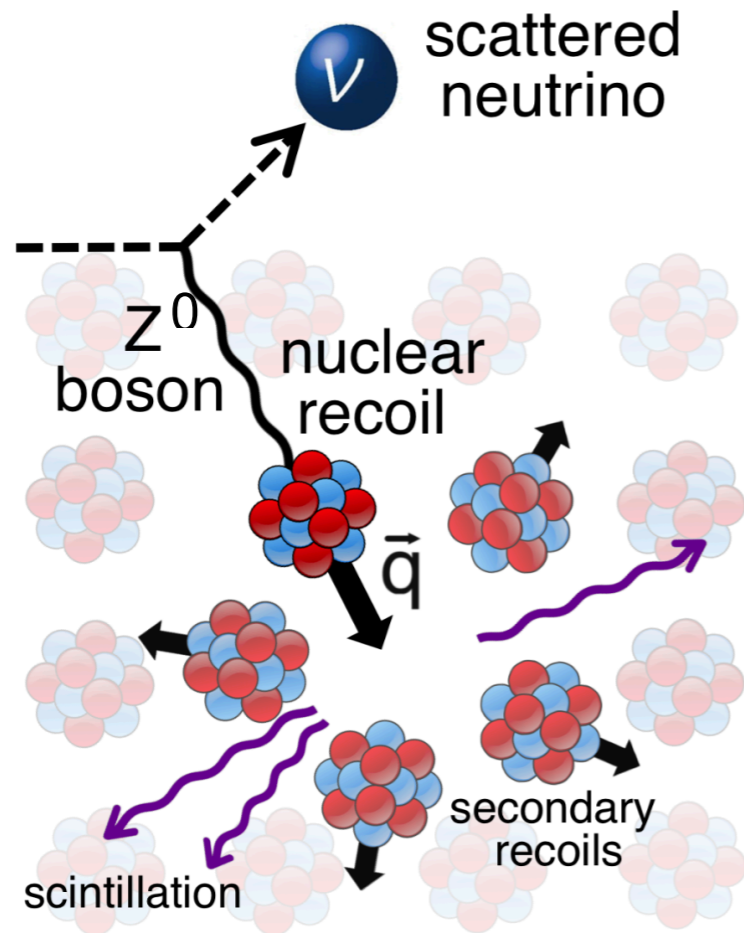
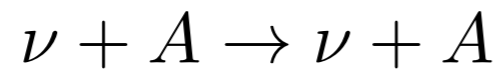
Não Proliferação



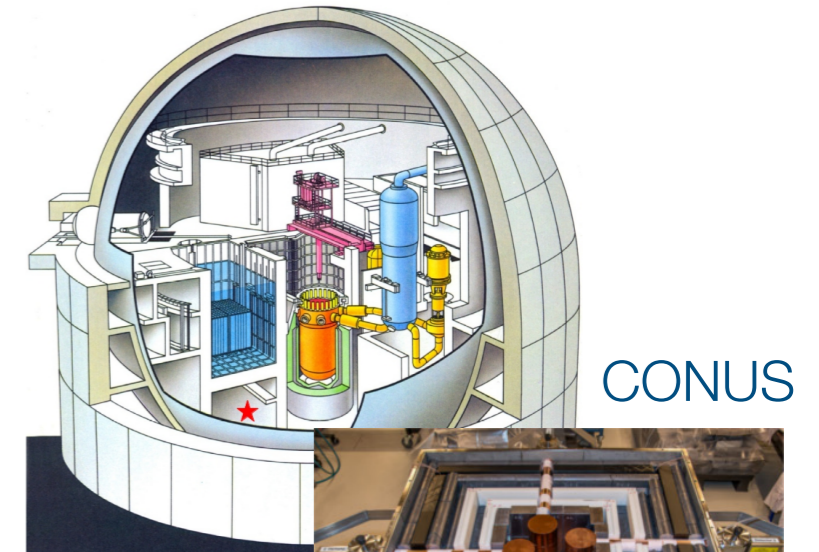
Neutrinos de reactor

Espalhamento elástico coerente neutrino-núcleo

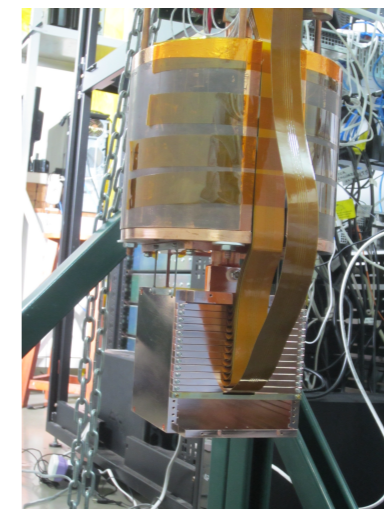
Uma "nova" forma de detectar neutrinos



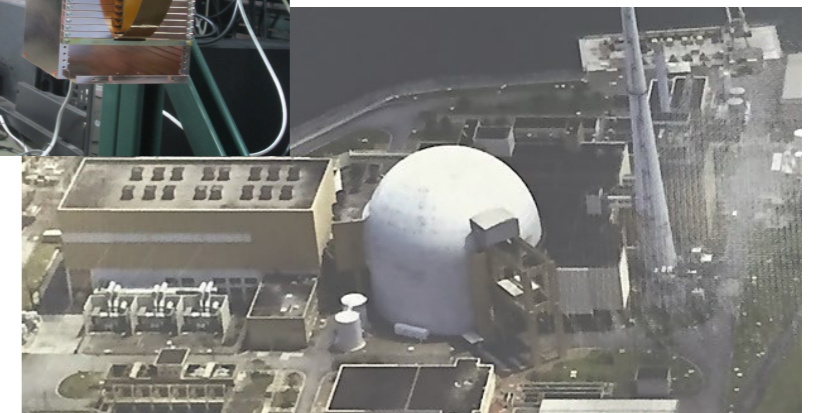
O neutrino atinge um núcleo por meio da troca de um mediador Z , e o núcleo recua como um todo.



CONUS



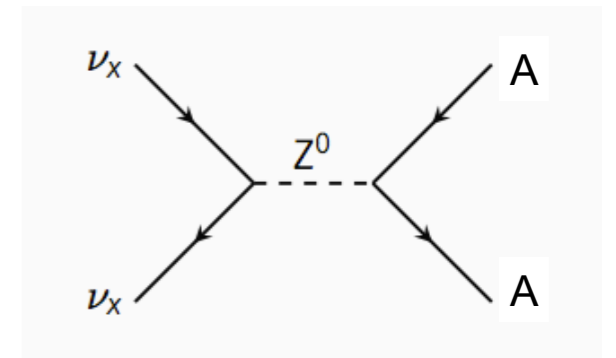
CONNIE



VIOLETA

Espalhamento coerente neutrino-núcleo (CEvNS)

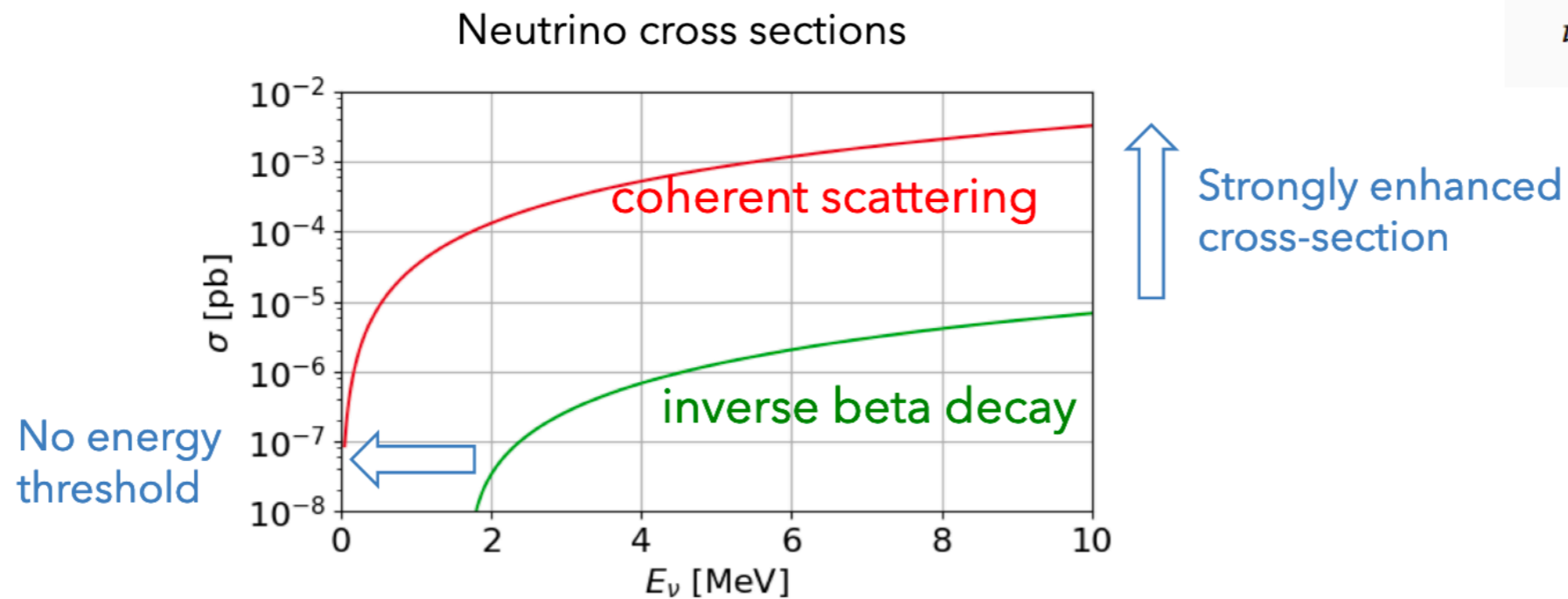
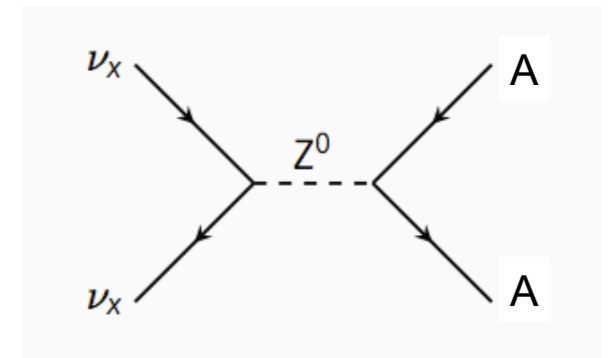
- Previsto pelo Modelo Padrão das partículas em 1974 D. Freedman, Phys.Rev. D 9 1389 (1974)
- Interação medida pela primeira vez em 2017 pela colaboração COHERENT D. Akimov et al, Science 357 (2017)
- Processo dominante para baixas energias $E_\nu \lesssim 50$ MeV
- Secção de choque (capacidade de interagir)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



Espalhamento coerente neutrino-núcleo (CEvNS)

- Previsto pelo Modelo Padrão das partículas em 1974 D. Freedman, Phys.Rev. D 9 1389 (1974)
- Interação 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 (capacidade de interagir) aumenta com o N^2 (número de nêutrons do núcleo)

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



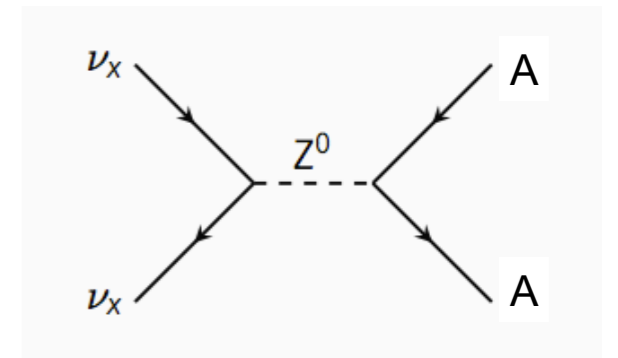
Magnificent CEvNS, Raimund Strauss

https://kicp-workshops.uchicago.edu/2018-CEvNS/depot/talk-strauss-raimund__2.pdf

Espalhamento coerente neutrino-núcleo (CEvNS)

- Previsto pelo Modelo Padrão das partículas em 1974 D. Freedman, Phys.Rev. D 9 1389 (1974)
- Interação 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 (capacidade de interagir) aumenta com o N^2 (número de nêutrons do núcleo)

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



Mas, muito difícil de observar !

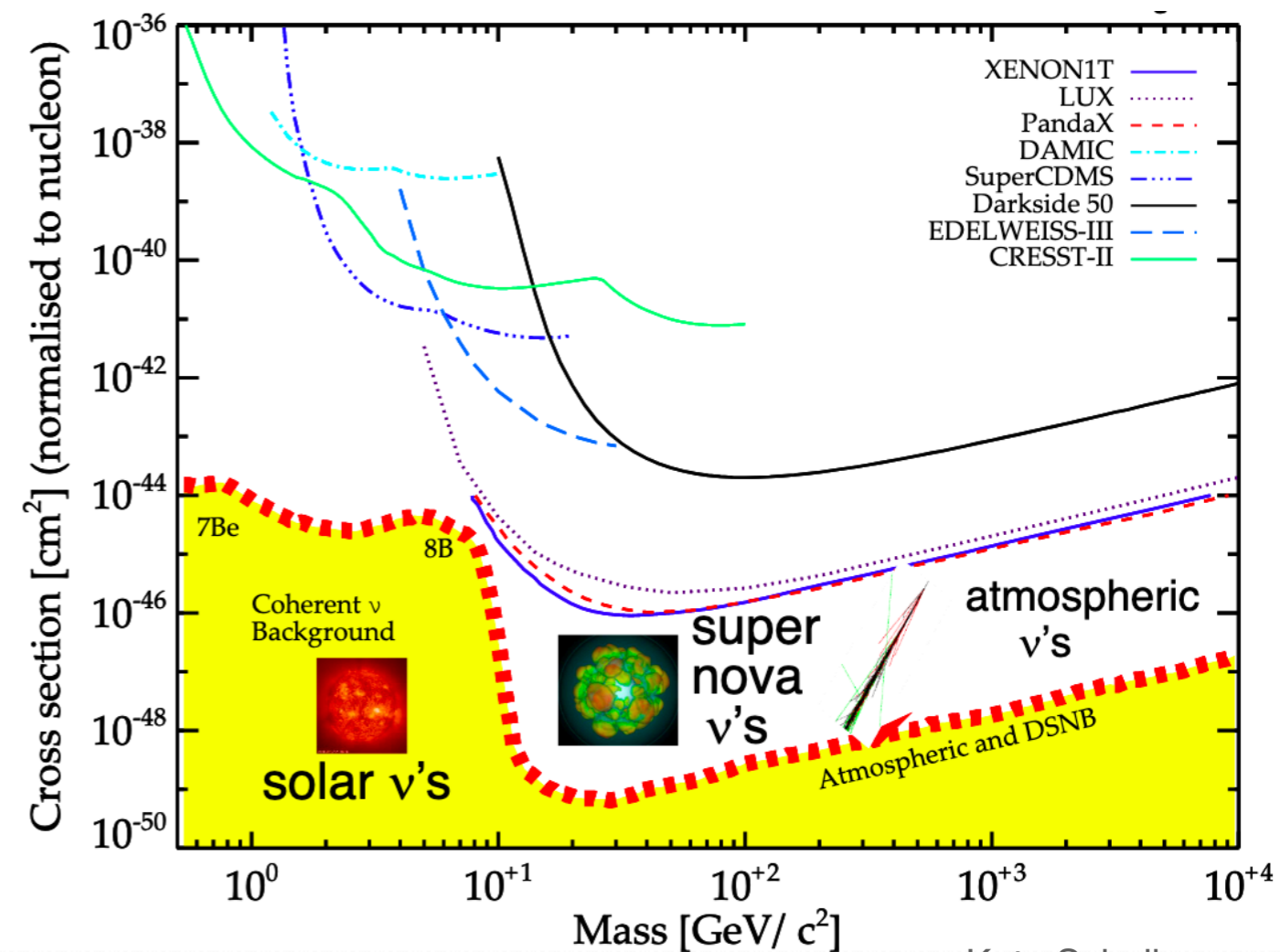
- Energia de recuo (do núcleo depois da interação) é pequena $E_r \sim$ keV (milhares de eV)
 - ▶ muito difícil de medir no passado
 - ▶ agora é possível graças ao desenvolvimento de detectores de baixo limiar de detecção para os esforços realizados na detecção de matéria escura

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

Por quê CEvNS?

Espalhamento elástico coerente do neutrino com o núcleo

- Para entender/verificar a “velha física” (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



Kate Scholberg

Experimentos de CEvNS no mundo

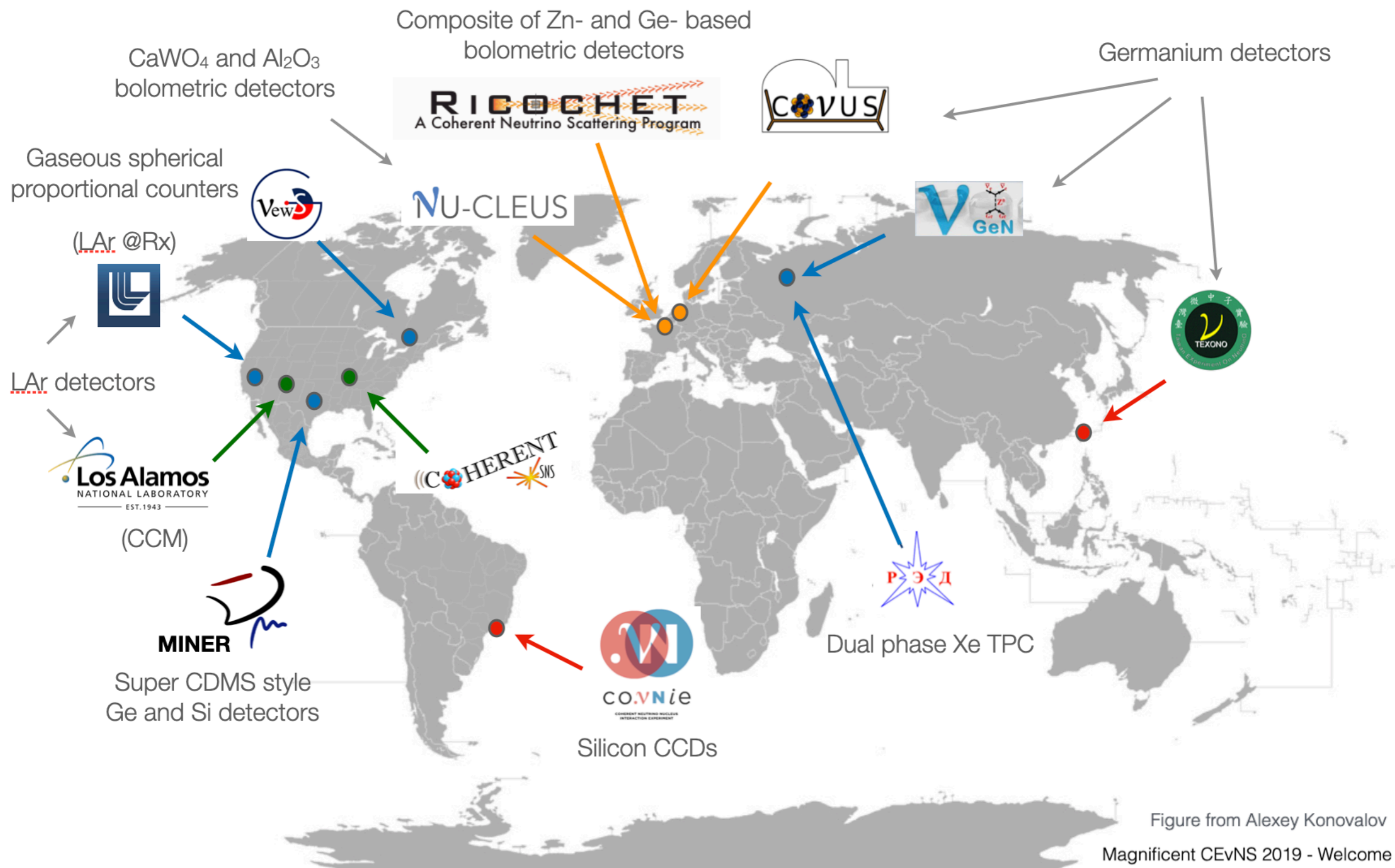
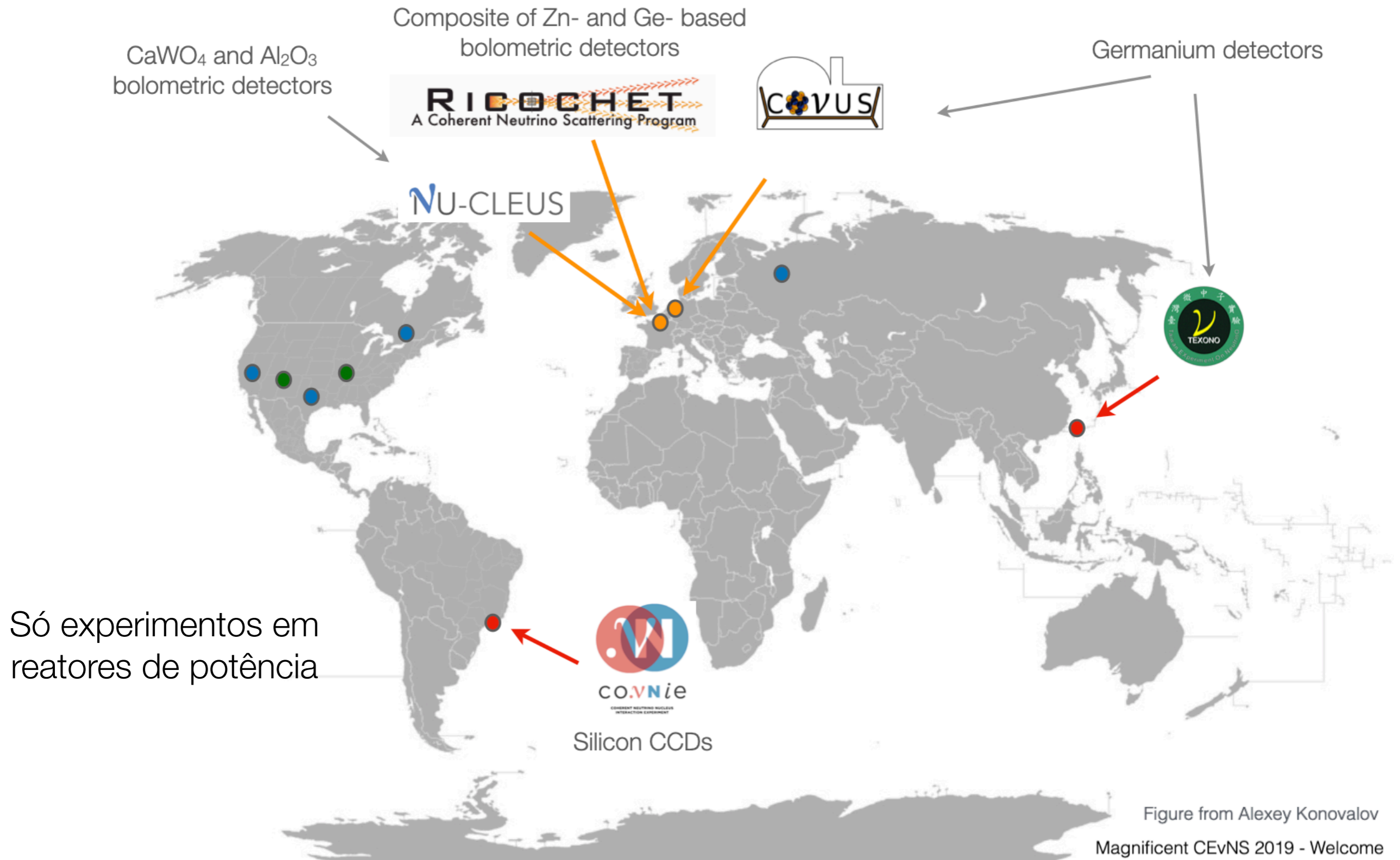


Figure from Alexey Konovalov
Magnificent CEvNS 2019 - Welcome

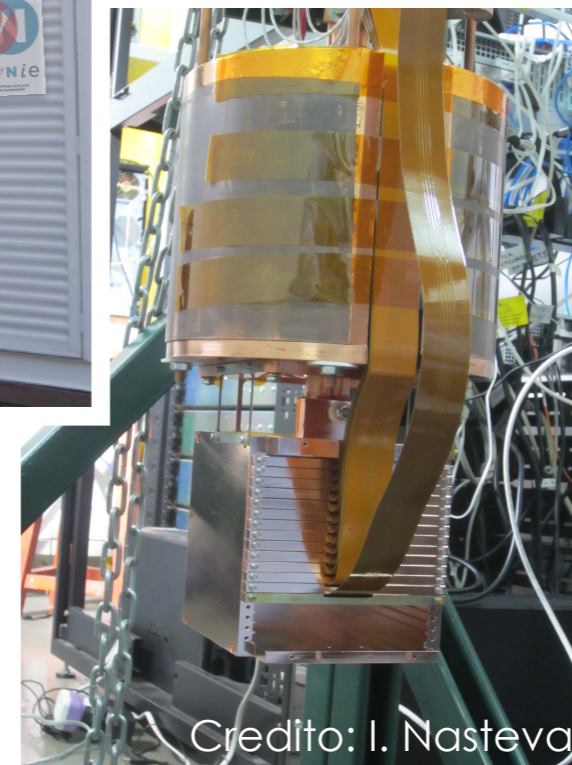
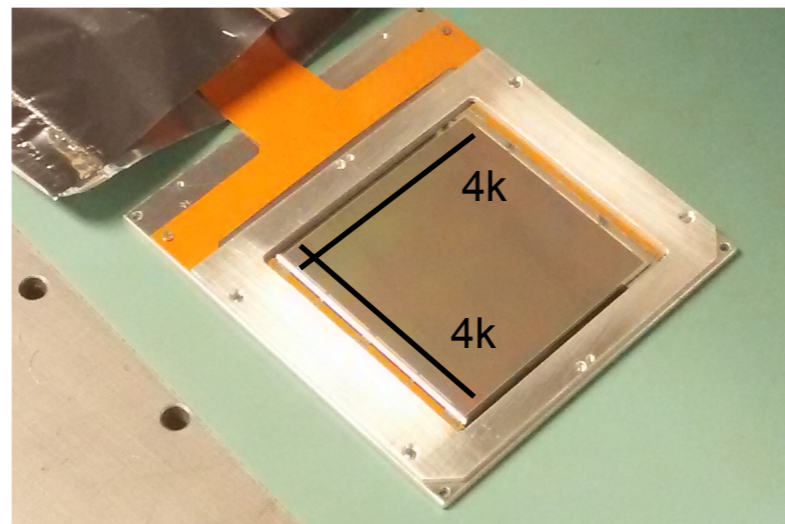
Experimentos de CEvNS no mundo



Experimento CONNIE



Coherent Neutrino-Nucleus Interaction Experiment



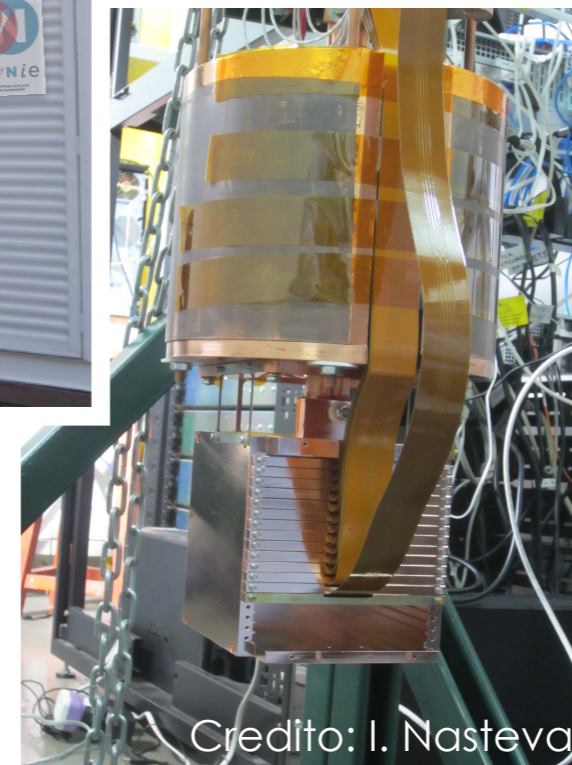
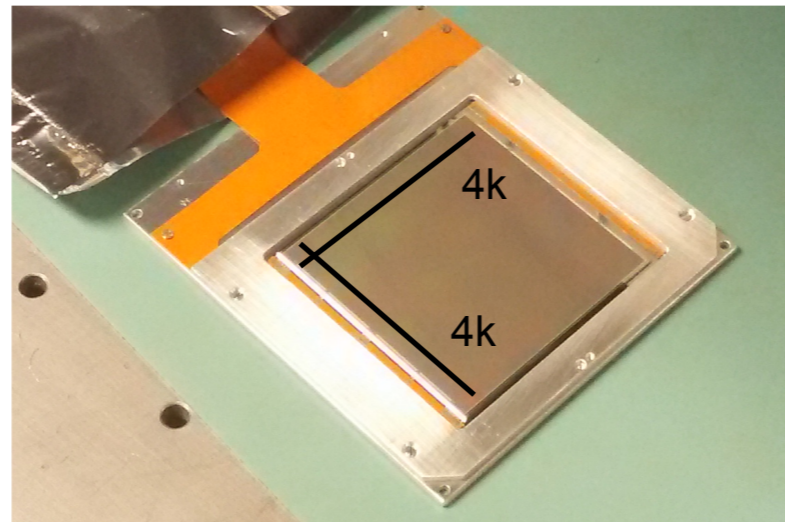
Colaboração Internacional



{ CBPF
CEFET/RJ - Angra dos Reis
IF - UFRJ

Experimento CONNIE

Coherent Neutrino-Nucleus Interaction Experiment



Colaboração Internacional



~ 30 membros

Medir CEvNS do anti-neutrino de reactor em CCDs e procurar por física além do Modelo Padrão

Detectores CCDs: Charge Coupled Devices

- Dispositivos dinâmicos que movimentam a carga ao longo de rotas predeterminadas baixo o controle dos pulsos de relógio
- Desenvolvidos em 1974 por Bagle & Smith em Bell Labs
Ideia inicial: memória semiconductora para computadores
- Podem ser utilizados para detectar fótons (imagens astronômicas) ou partículas

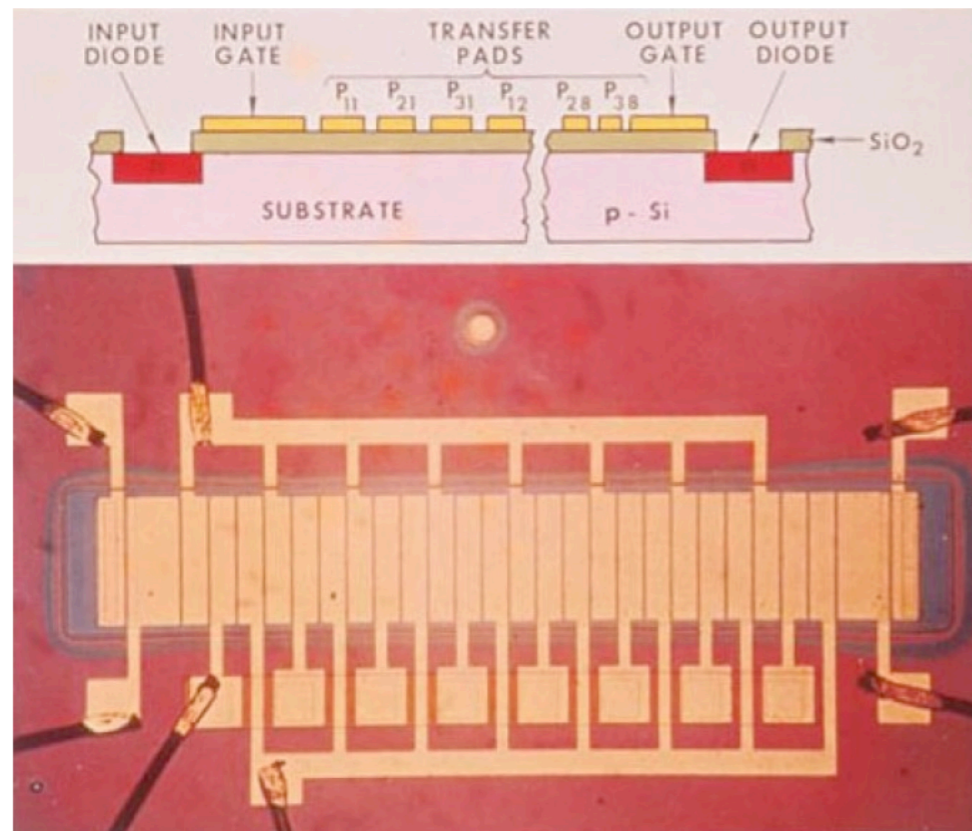
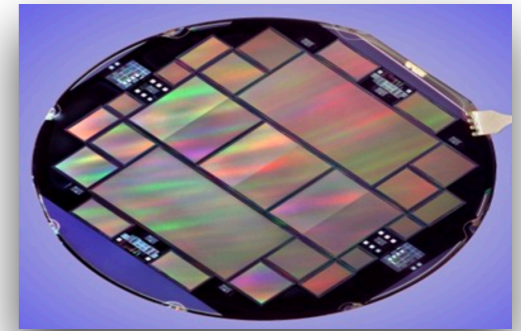
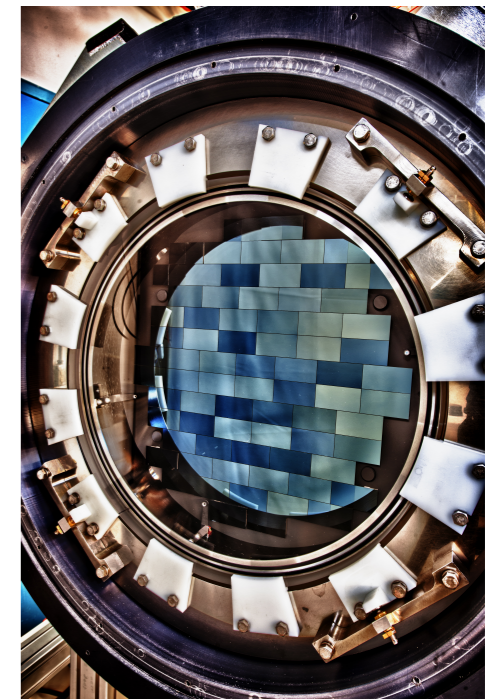
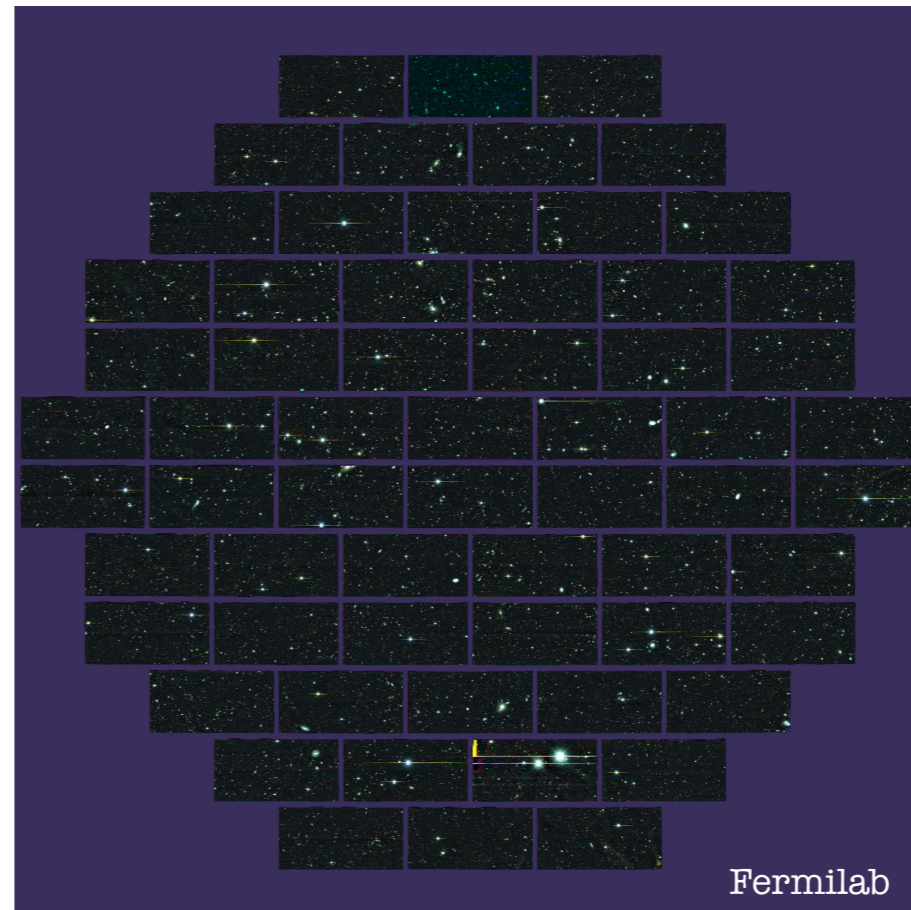


Imagem tomada por la Camara del DES



DECam

Detectores CCDs: Charge Coupled Devices

- Dispositivos dinâmicos que movimentam a carga ao longo de rotas predeterminadas baixo o controle dos pulsos de relógio
- Desenvolvidos em 1974 por Bagle & Smith em Bell Labs
Ideia inicial: memória semiconductora para computadores
- Podem ser utilizados para detectar fótons (imagens astronômicas) ou partículas

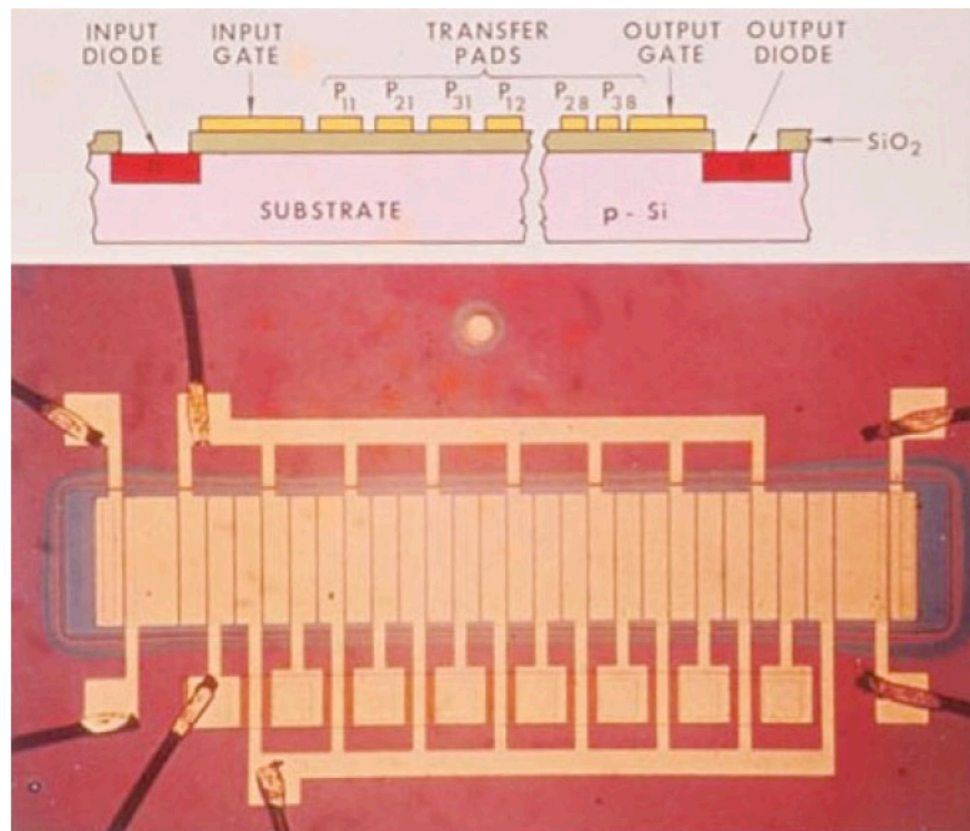
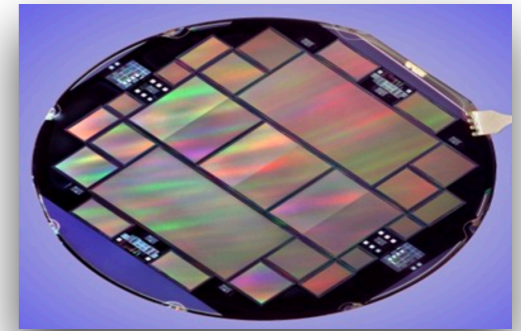
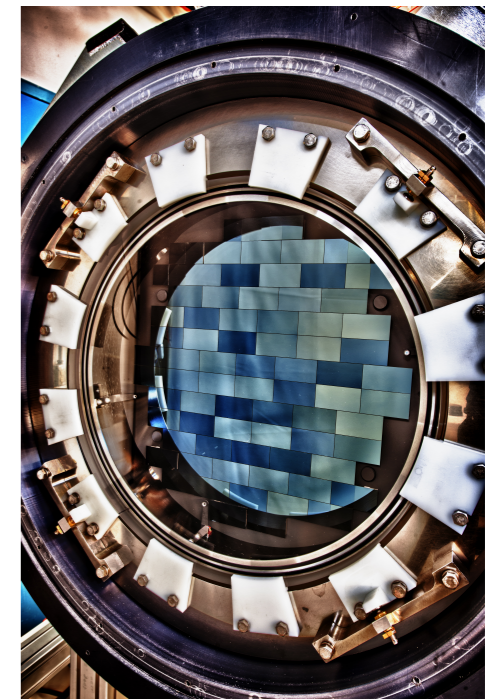
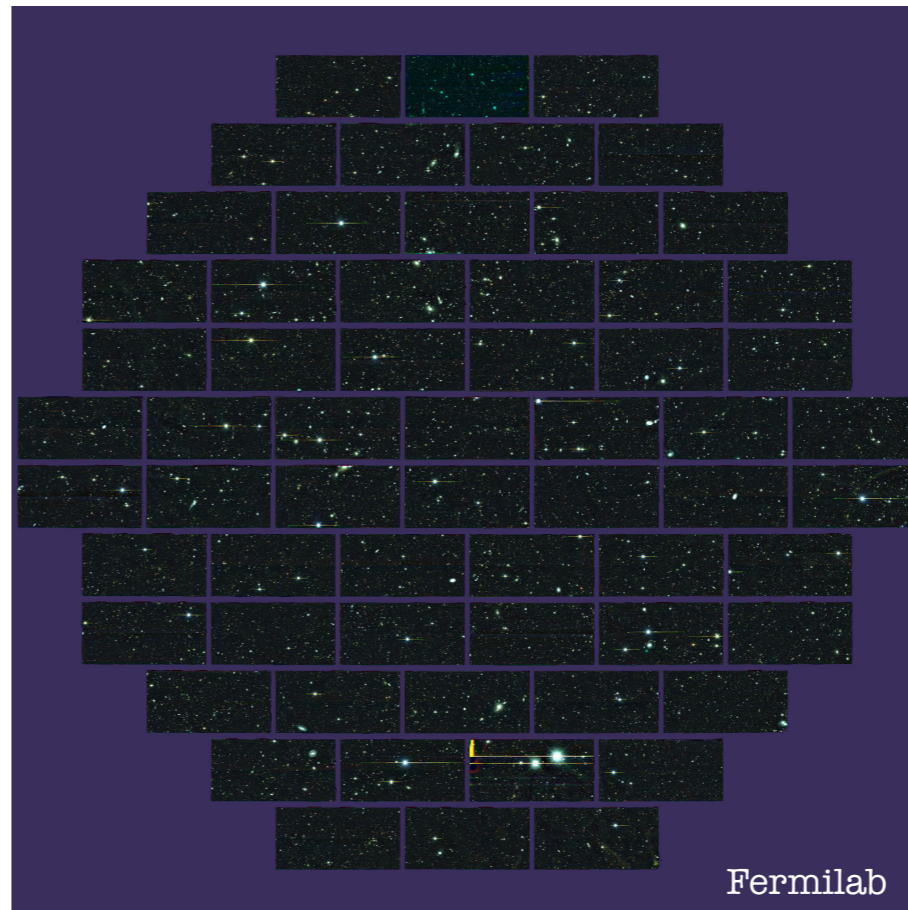


Imagem tomada por la Camara del DES



DECam

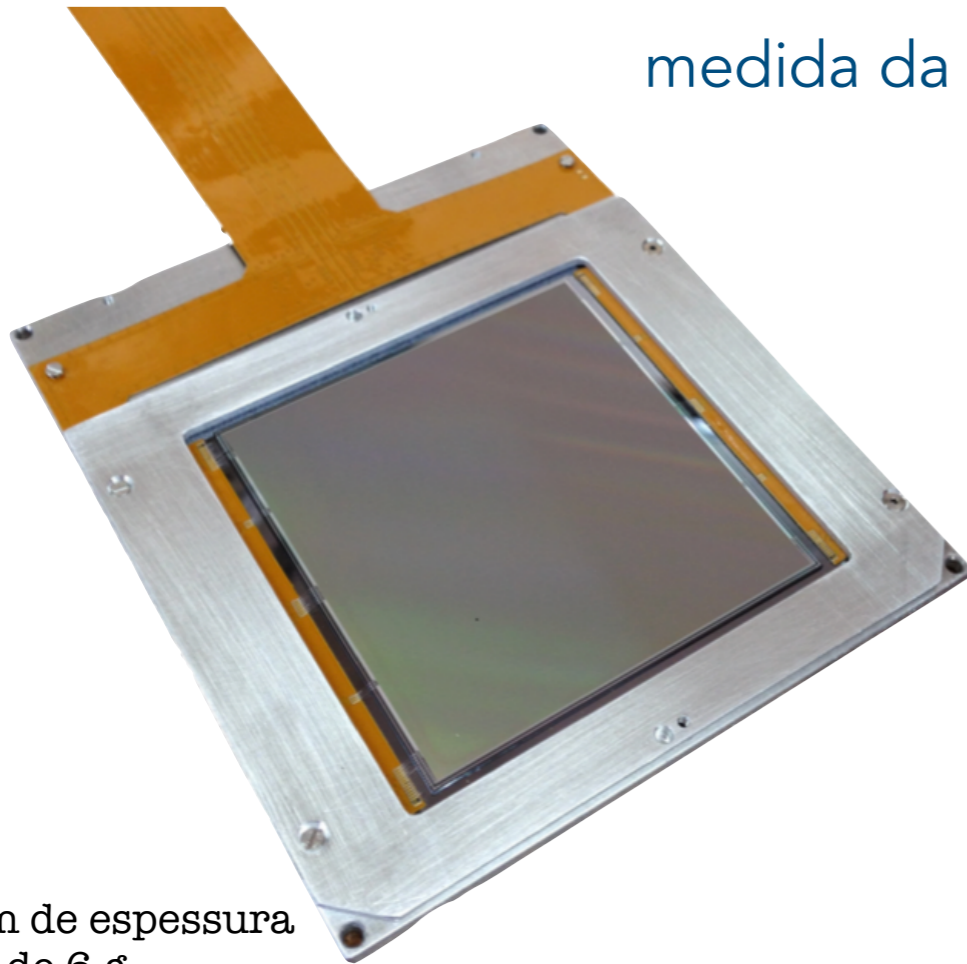


Prêmio Nobel
2009

Fermilab

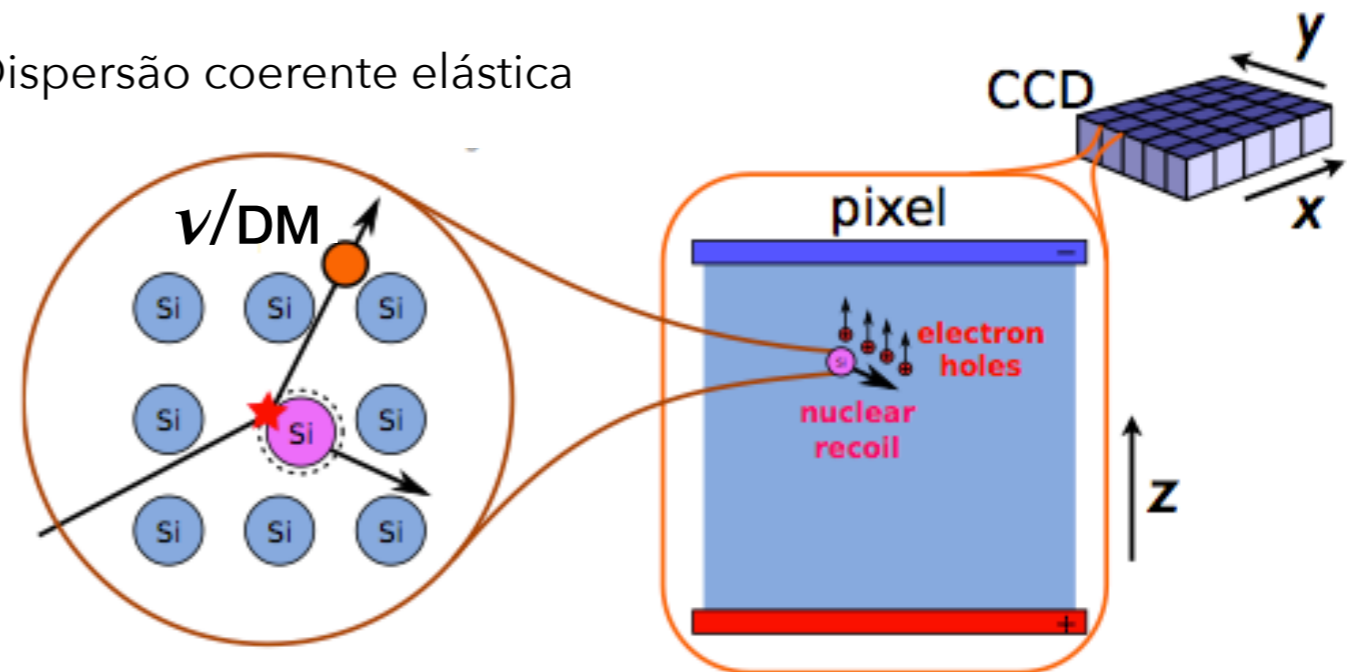
Objetivo: baixar o limiar de detecção

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



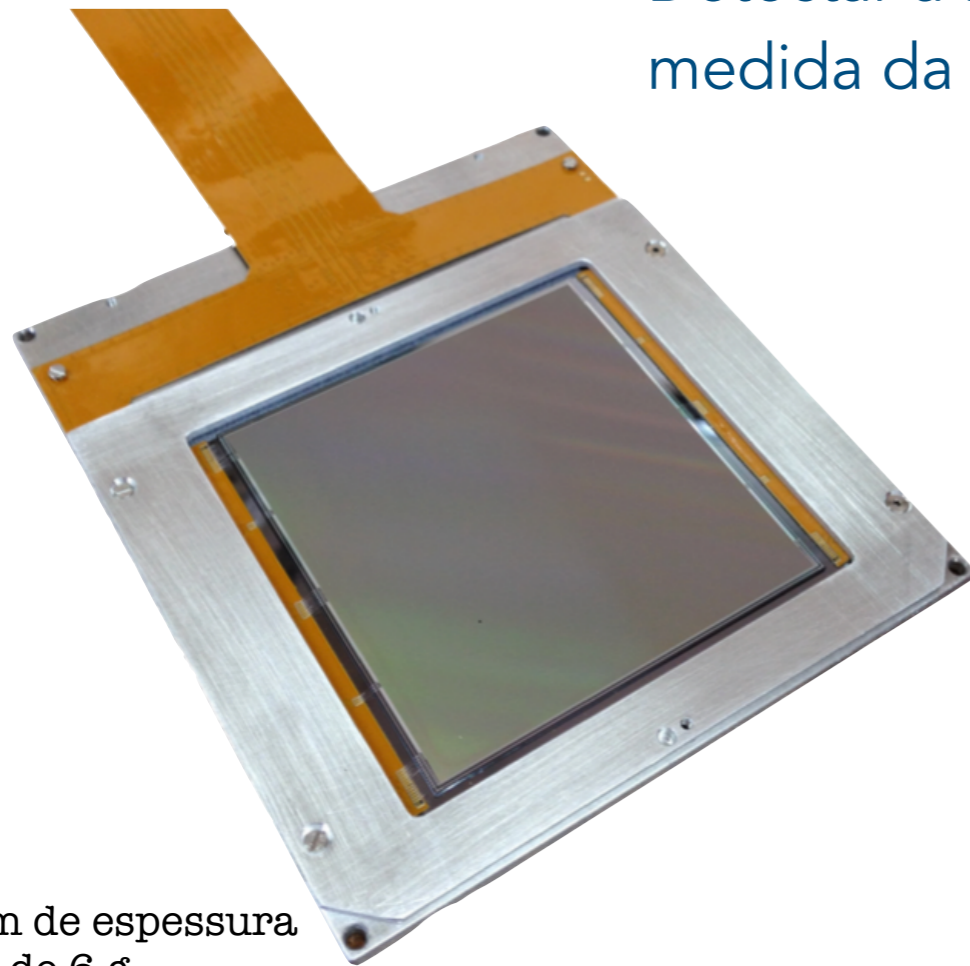
675 μm de espessura
massa de 6 g
16 Mpix de 15 μm x 15 μm
desenvolvidas no Lawrence Berkeley
National Laboratory MicroSystems Lab

Dispersão coerente elástica



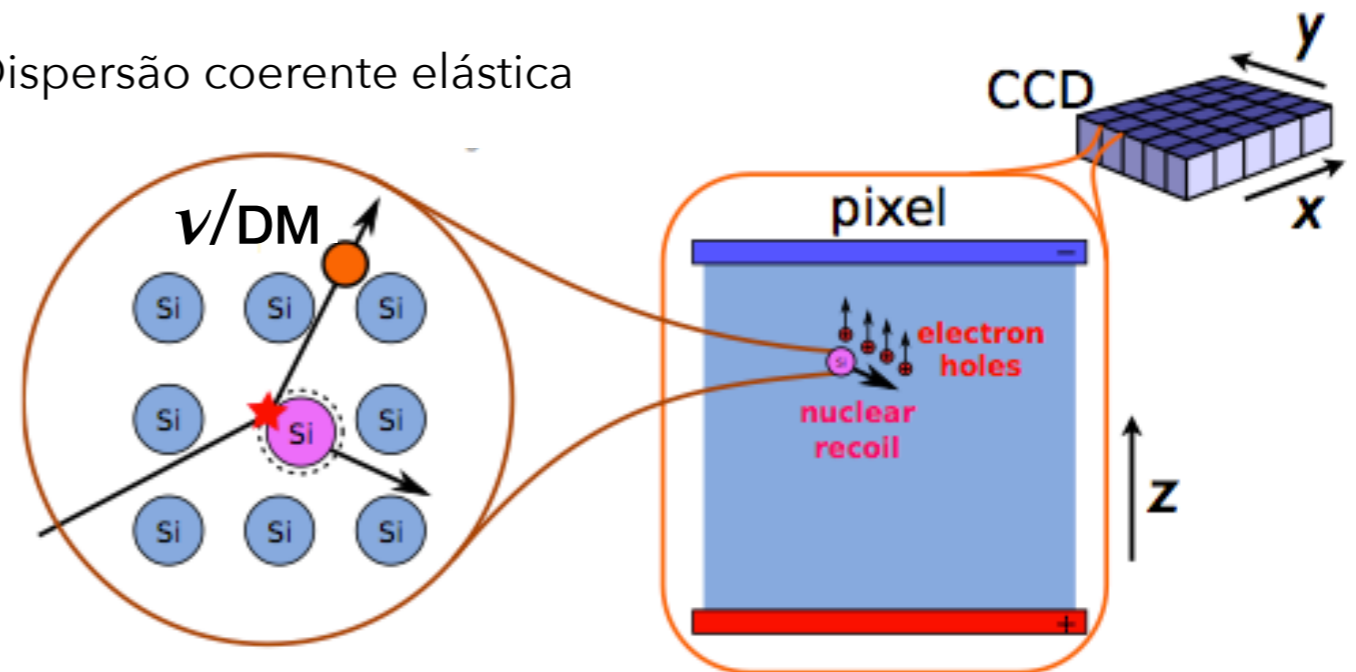
Objetivo: baixar o limiar de detecção

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



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

Dispersão coerente elástica



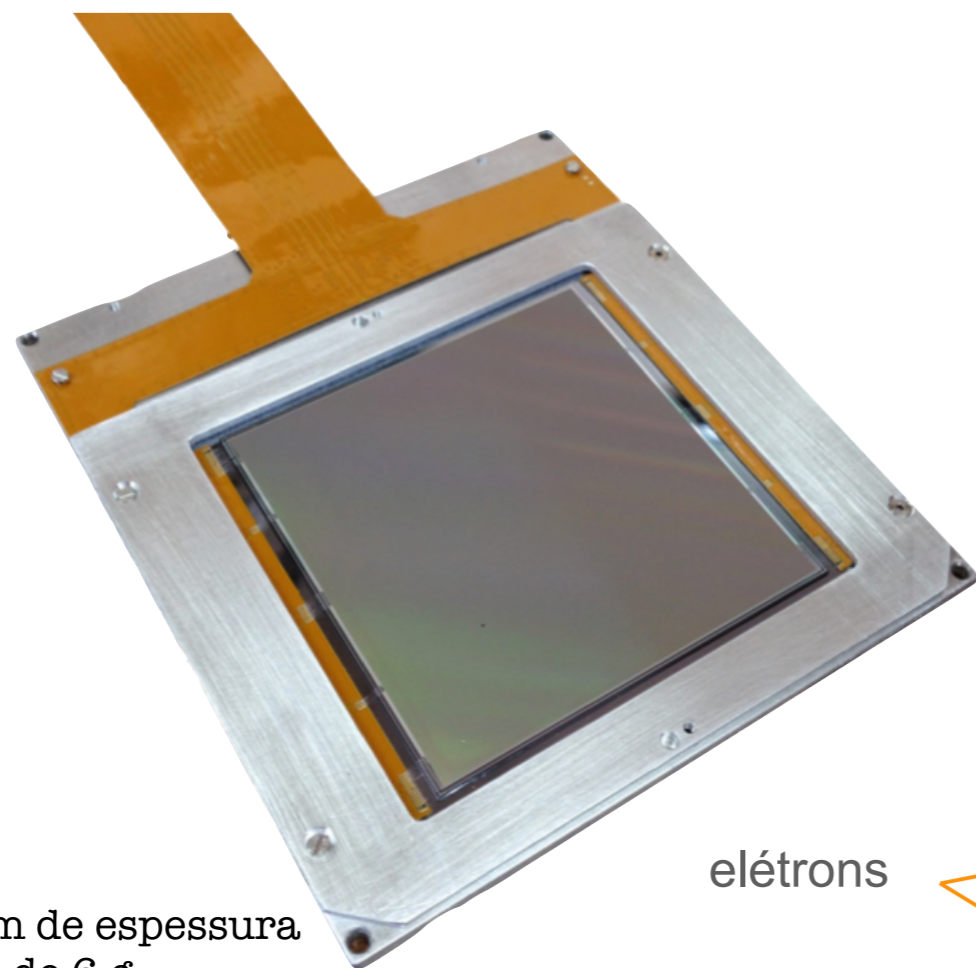
Vantagem:

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

Desafios:

- Pequenas energias de ionização
- Eficiência de ionização nunca medida (fator de extinção)

Geração de carga



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

Partícula Ionizante

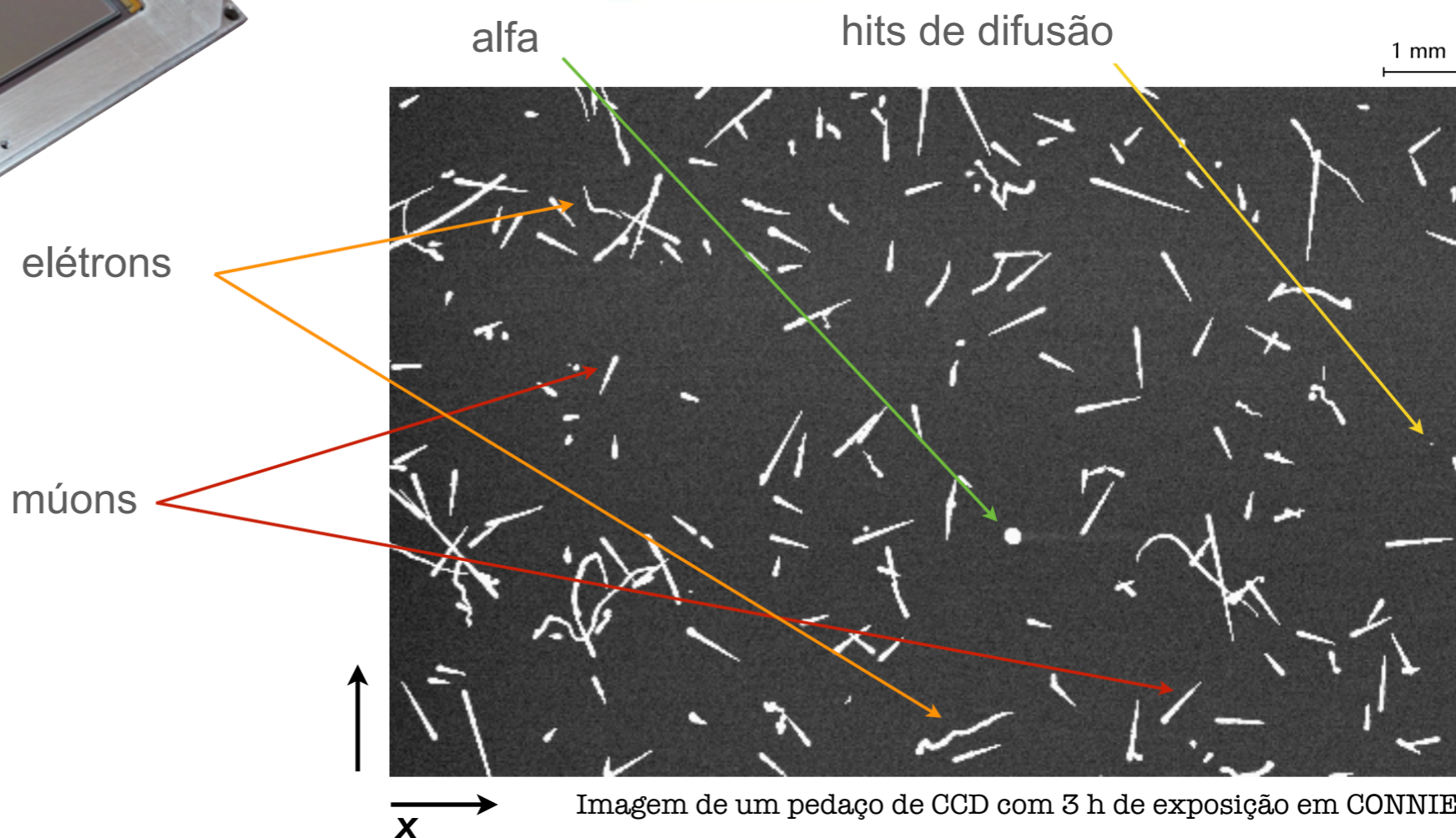
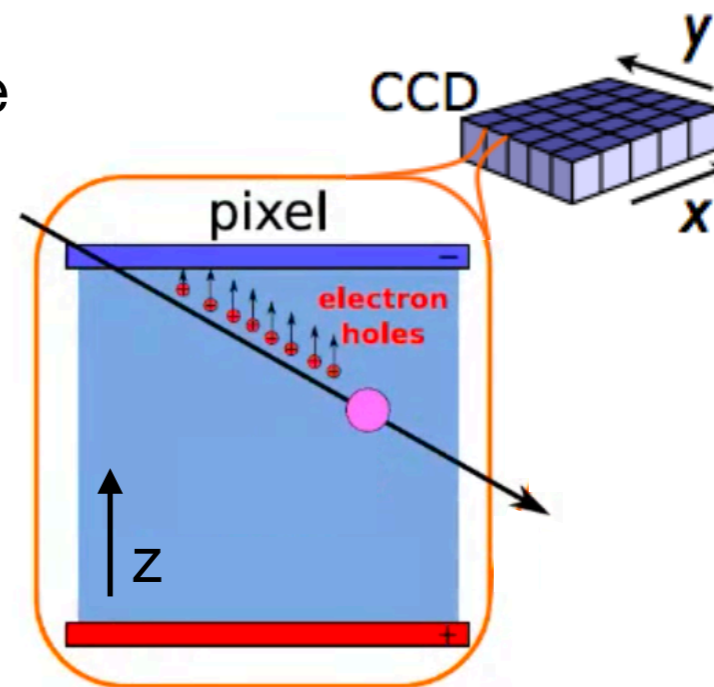


Imagem de um pedaço de CCD com 3 h de exposição em CONNIE

Leitura da CCD

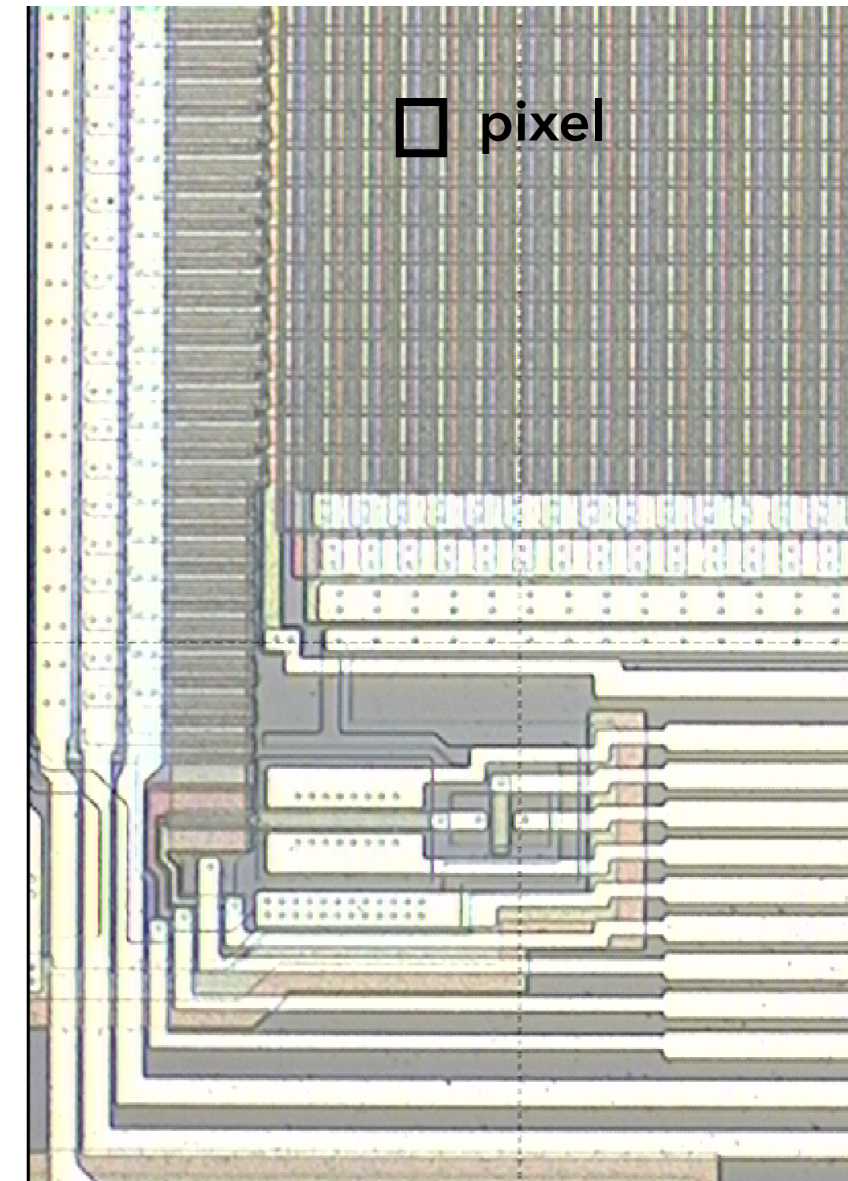
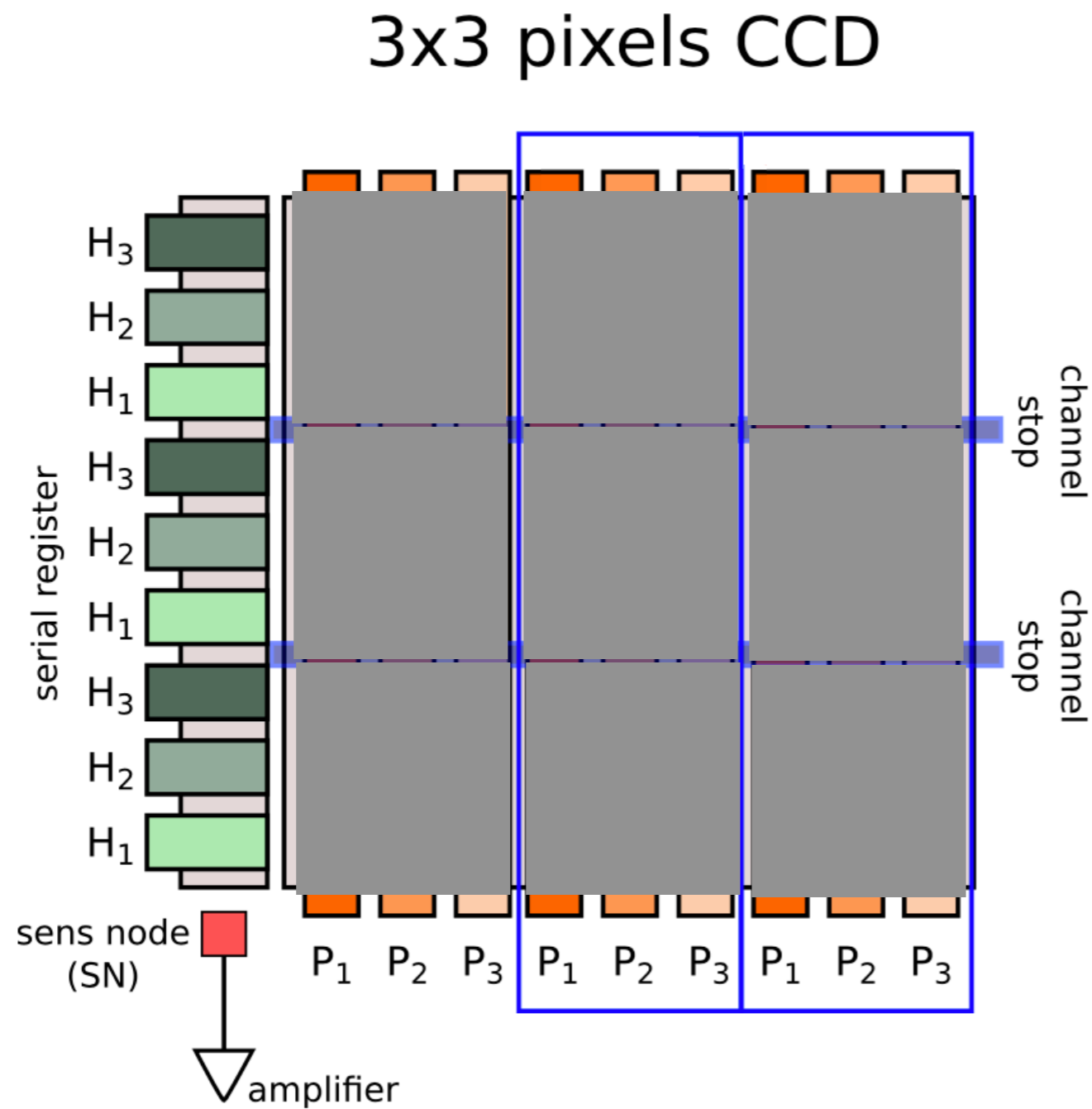


Imagem microscópica de uma porção de CCD

Leitura da CCD

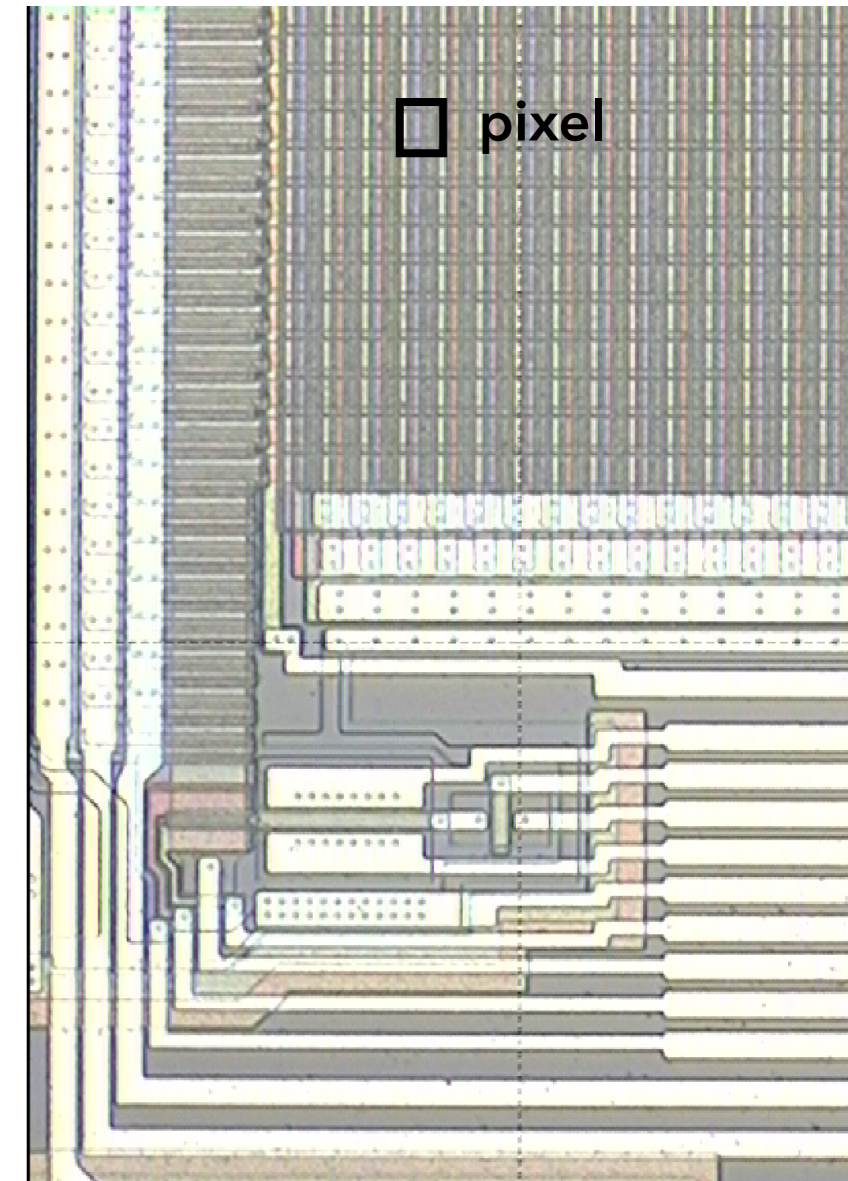
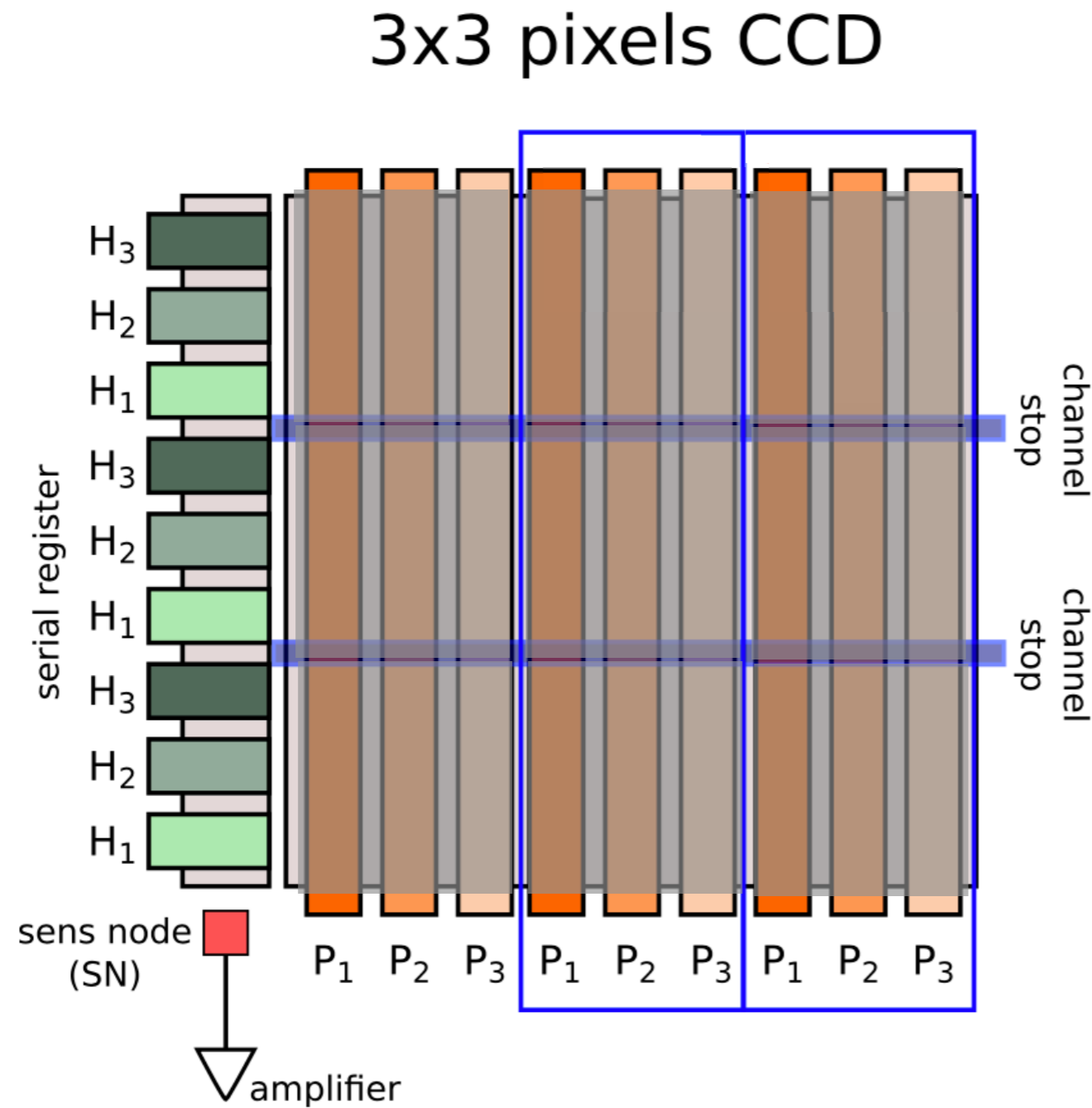


Imagem microscópica de uma porção de CCD

Leitura da CCD

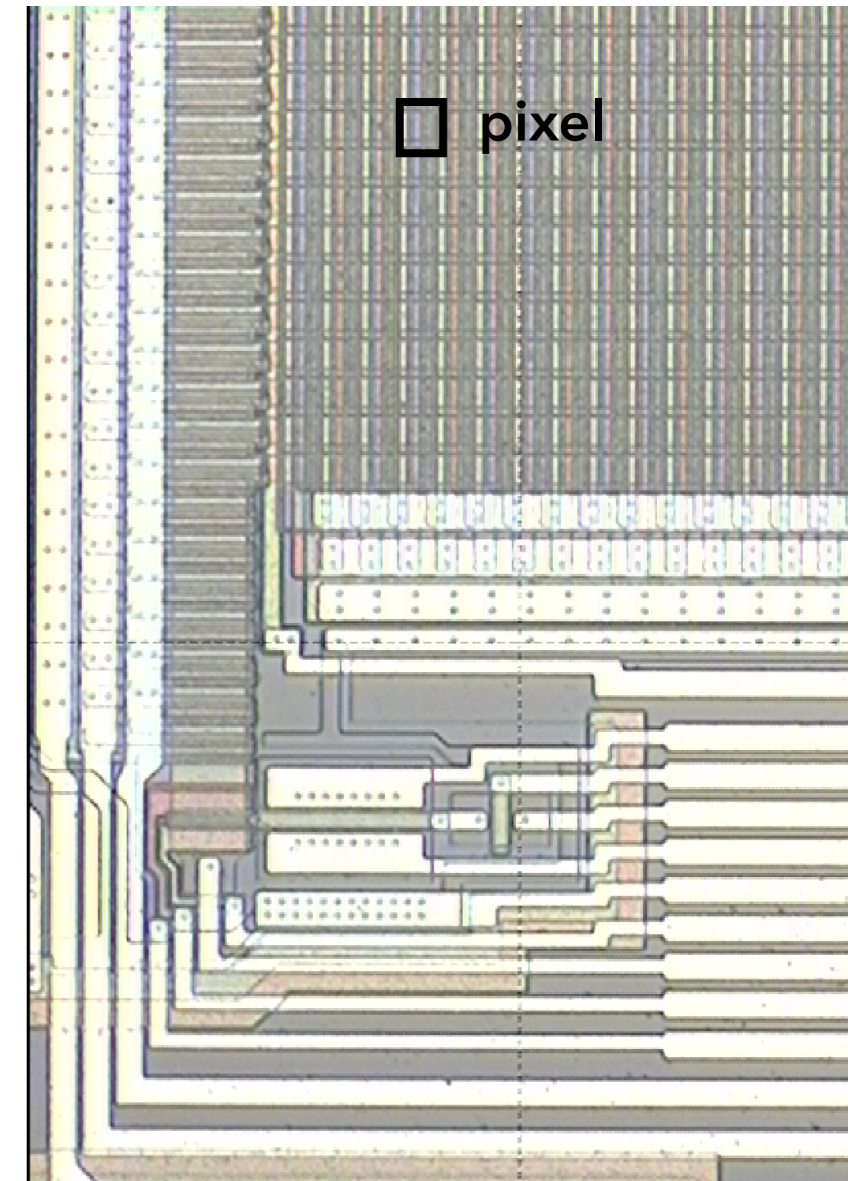
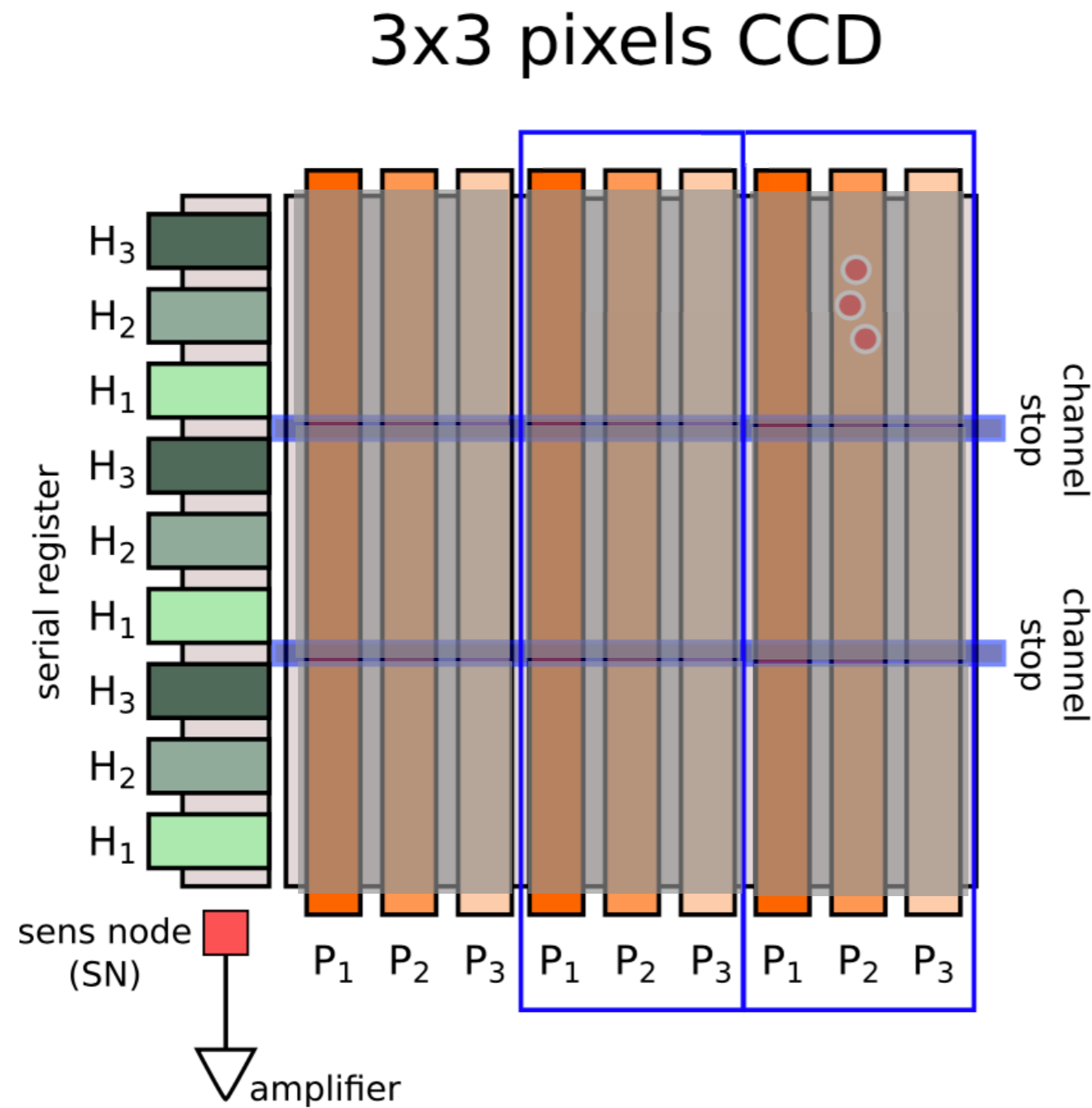
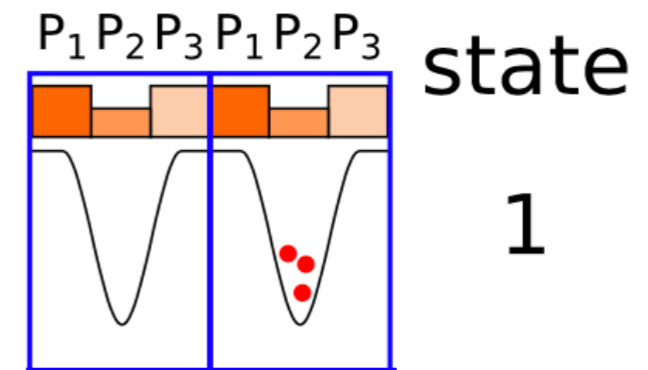
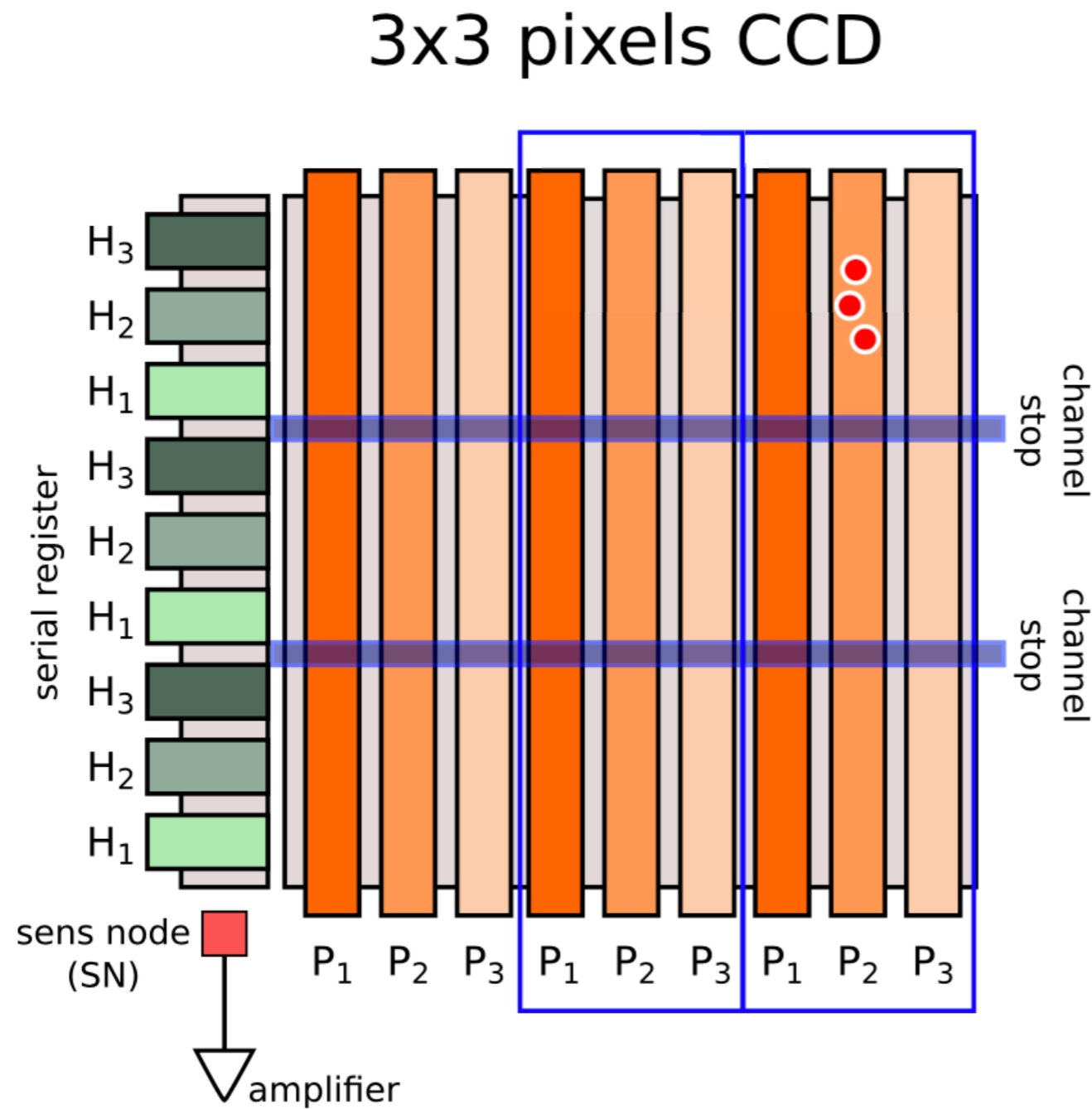
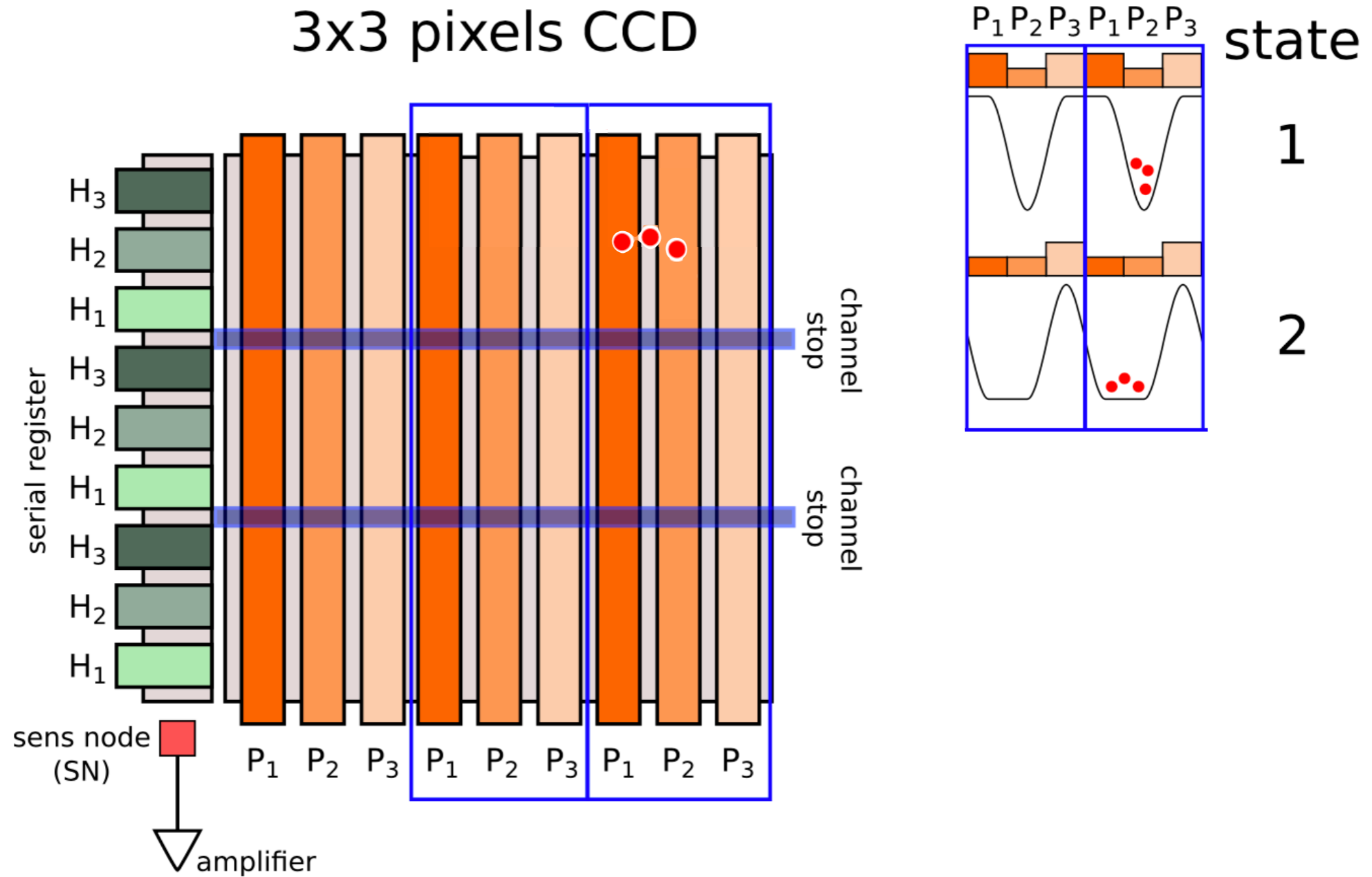


Imagem microscópica de uma porção de CCD

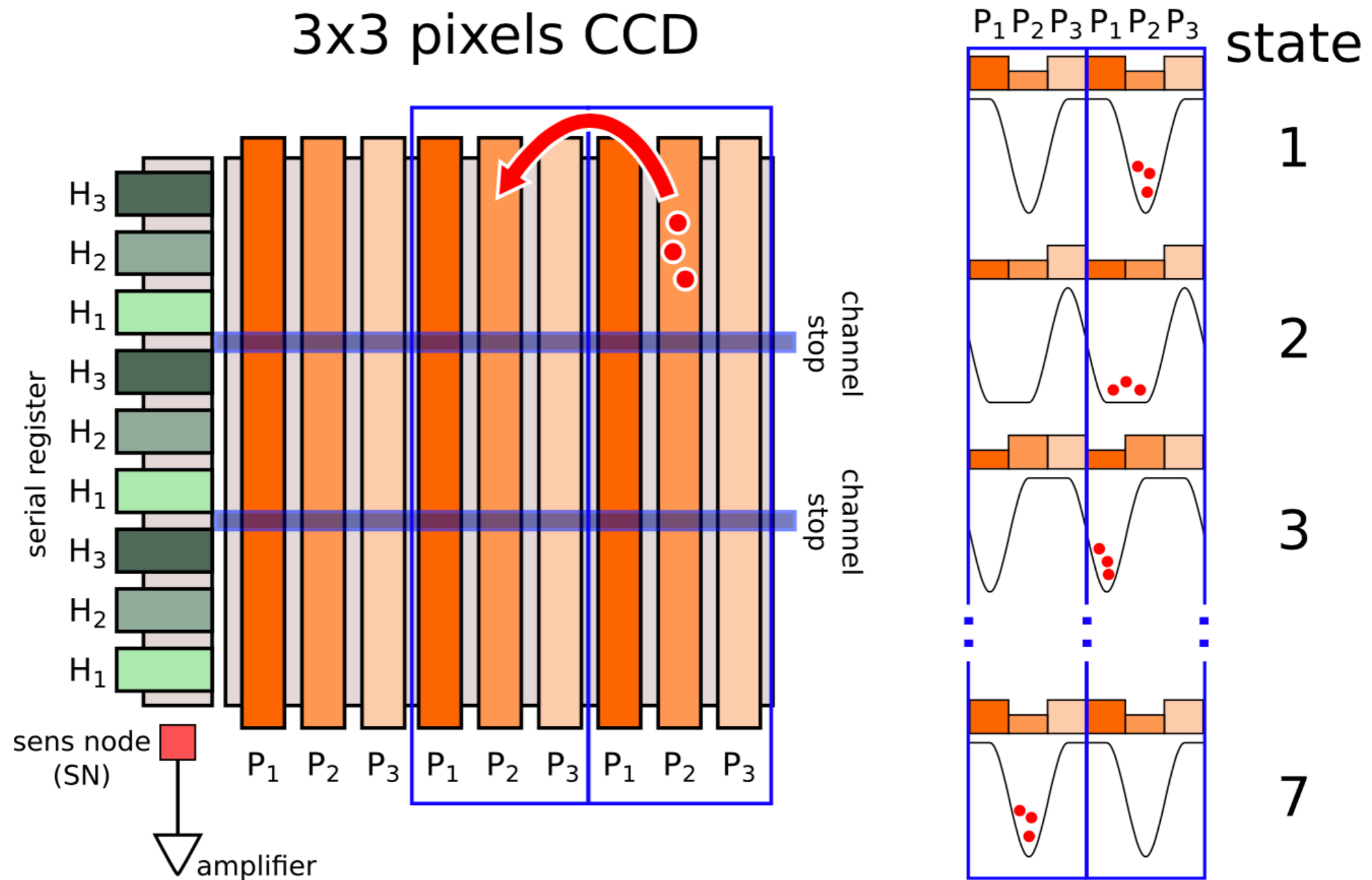
Leitura da CCD



Leitura da CCD

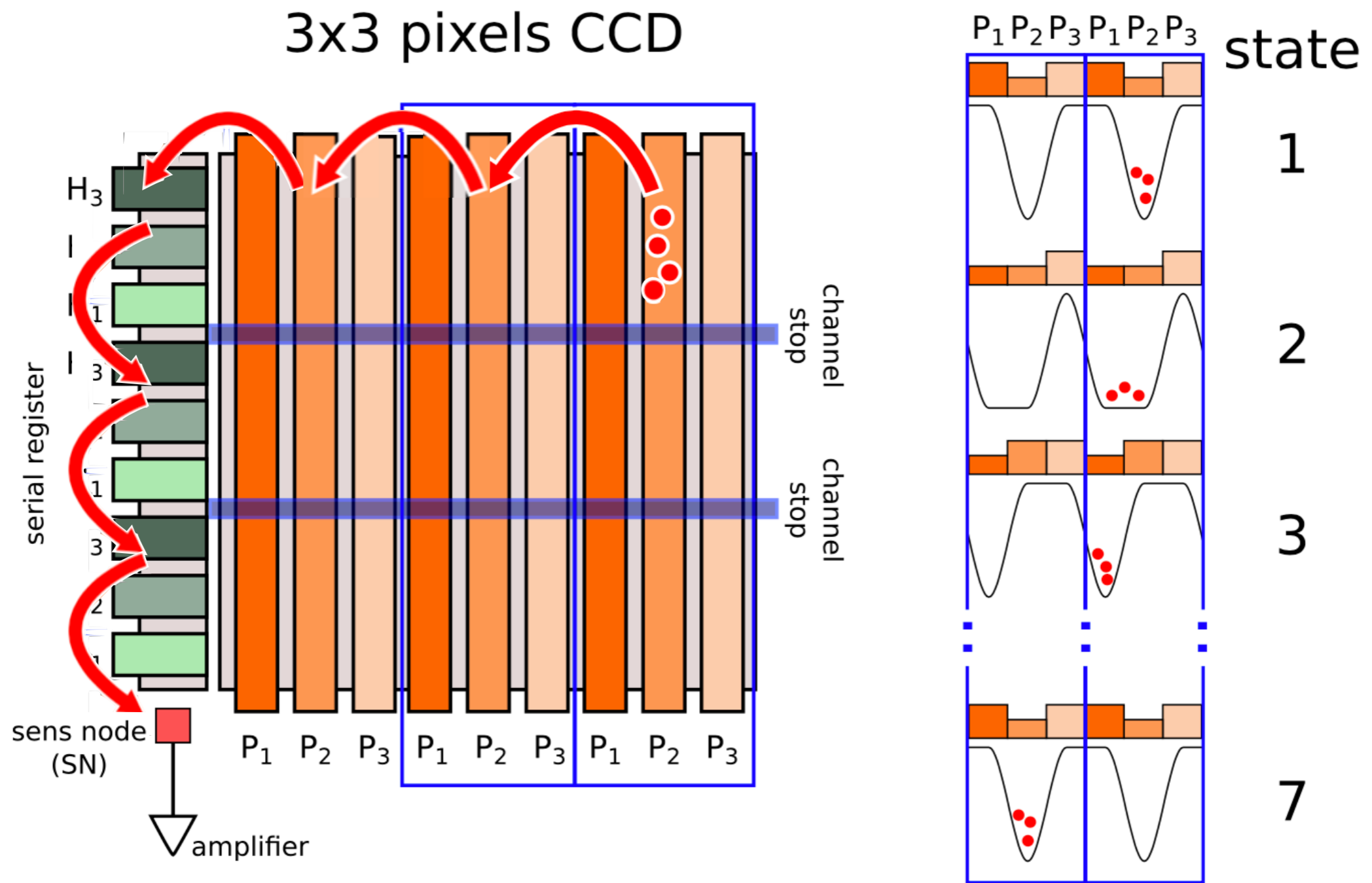


Lectura de la CCD



Leitura em seqüência, pixel por pixel.

Lectura de la CCD



Leitura em seqüência, pixel por pixel.

Leitura da CCD

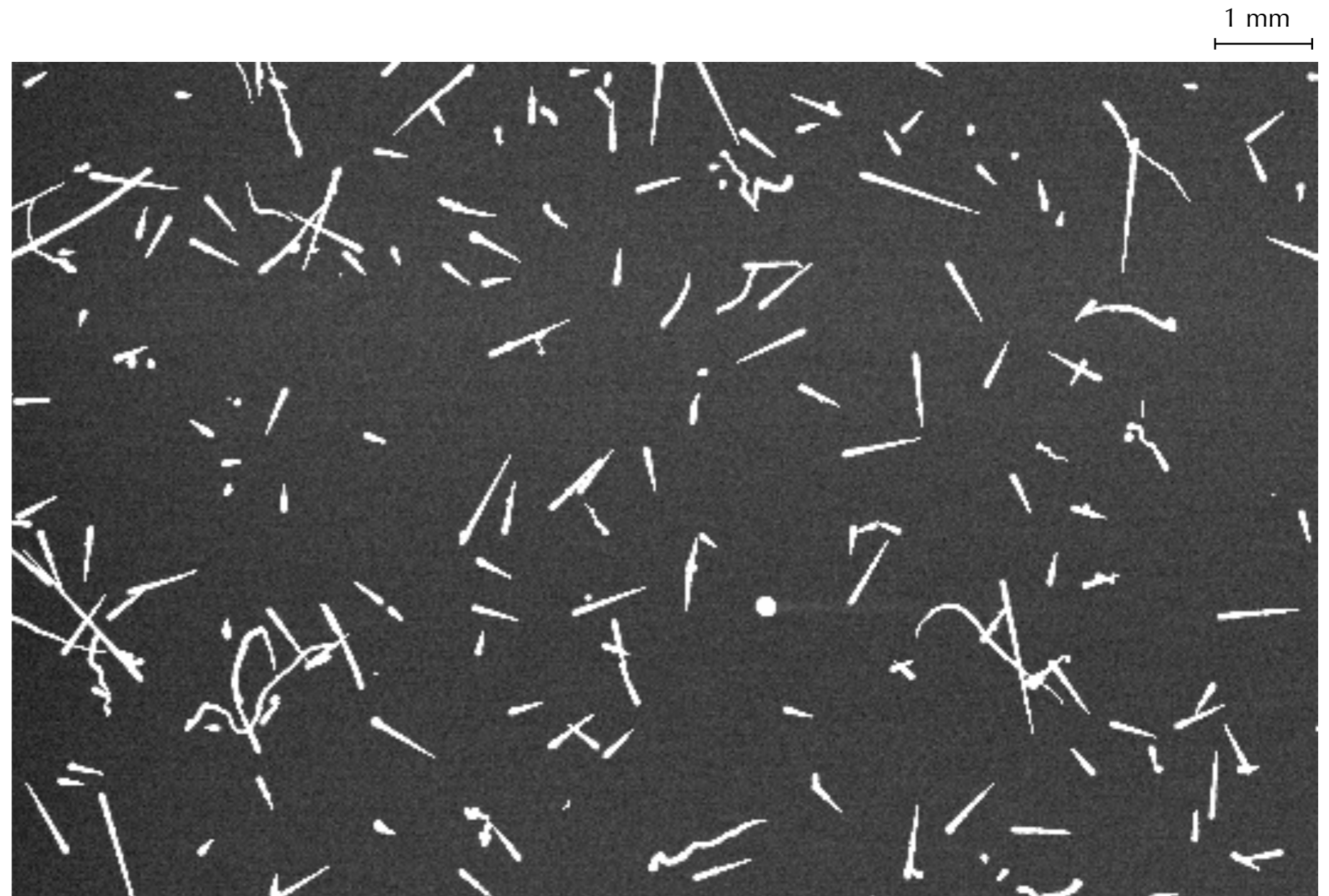
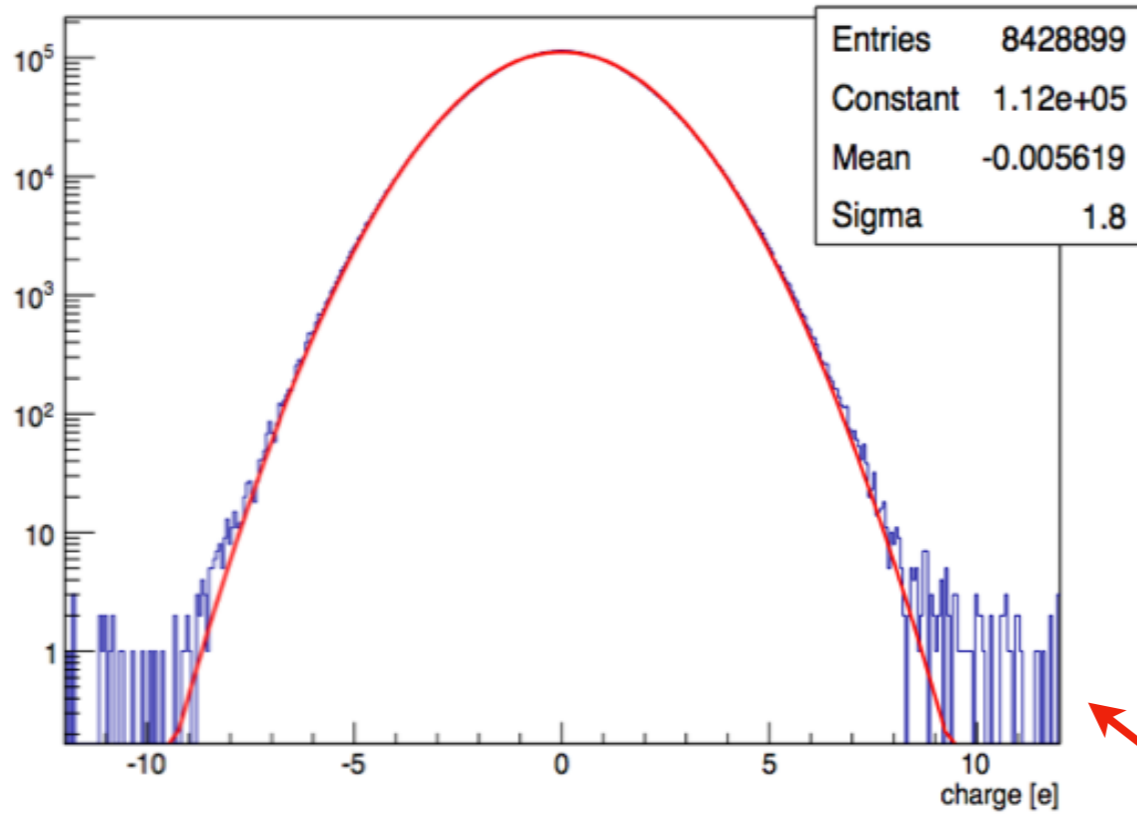


Imagem de um pedaço de CCD com 3 h de exposição em CONNIE

Leitura da CCD



Baixo nível de ruído $\sim 2e^-$

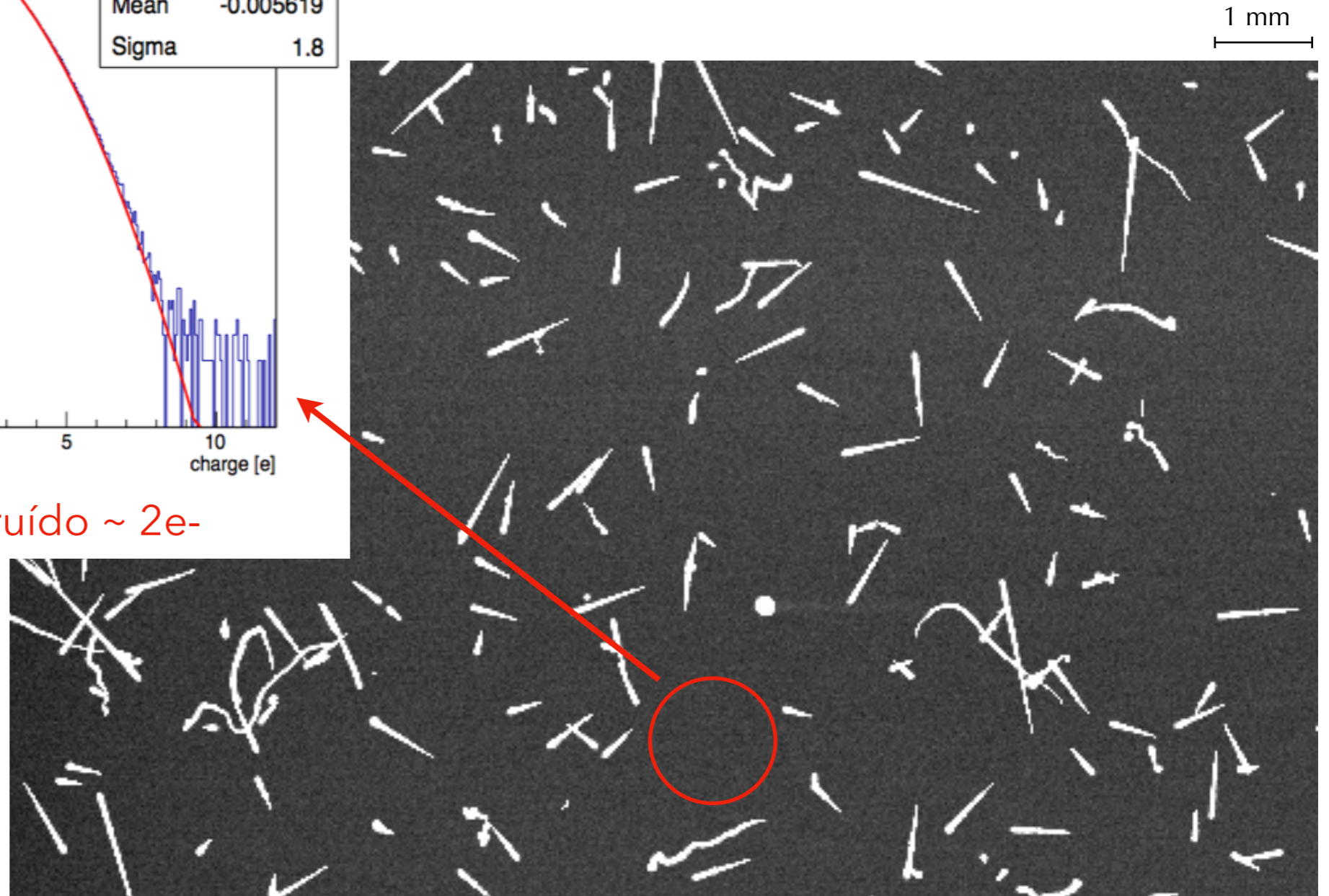
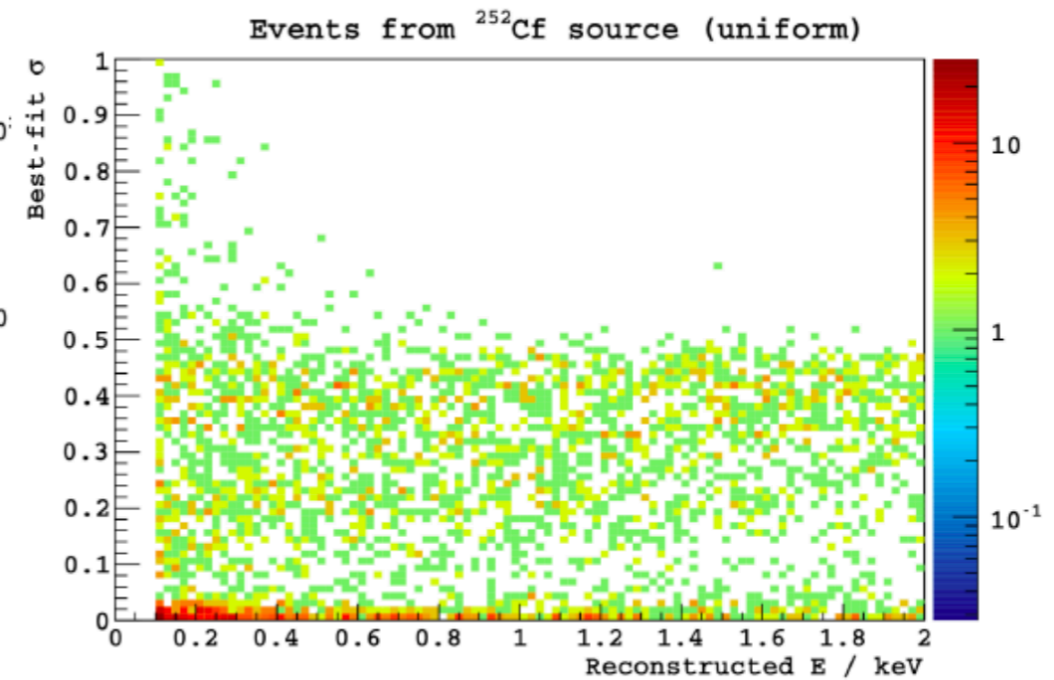
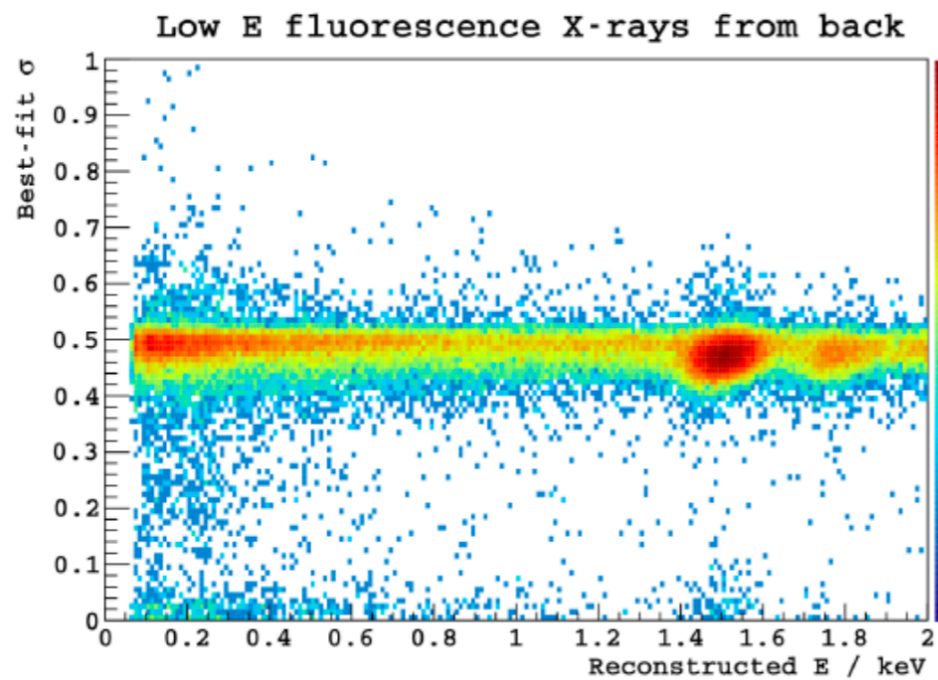
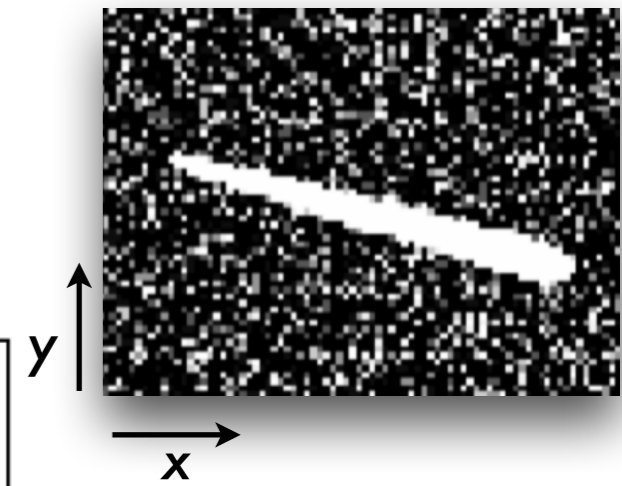
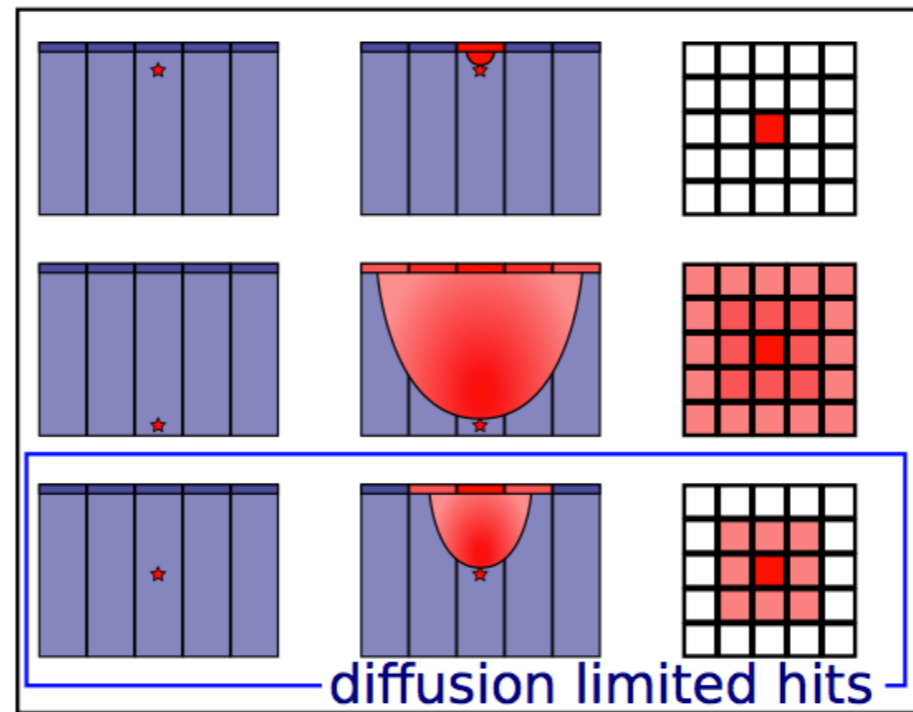
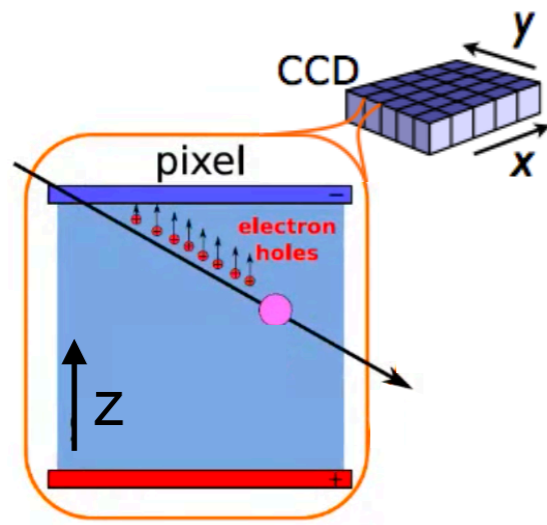


Imagen de una porción de CCD con 3 h de exposición en CONNIE

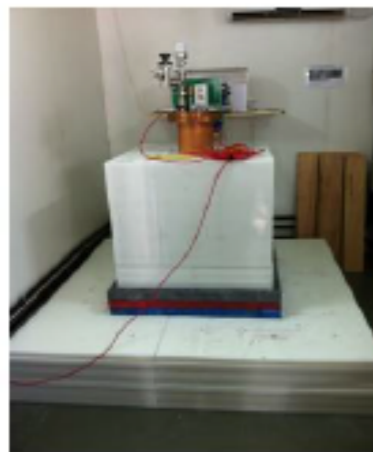
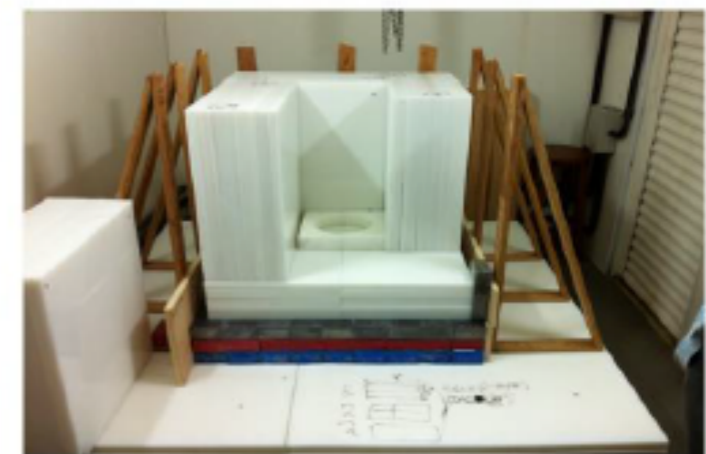
Difusão

A difusão nas CCDs nos fornece a possibilidade da reconstrução em 3D



Construção do experimento @Angra

Novembro de 2014



Agosto de 2015



time

Credito: G. Fernandez-Moroni

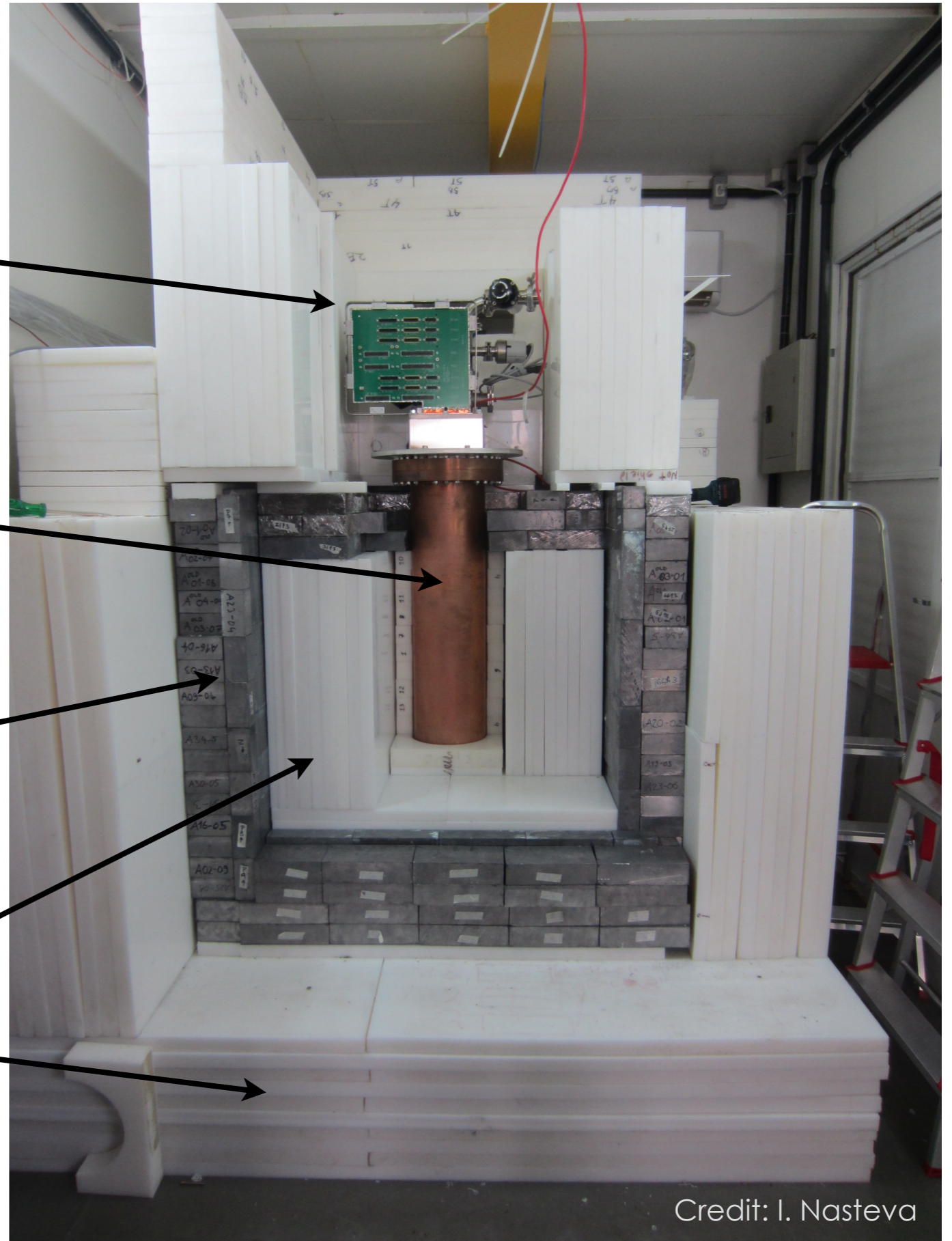
CONNIE @Angra

Placa VIB

Dewar
(Vácuo e criogenia)

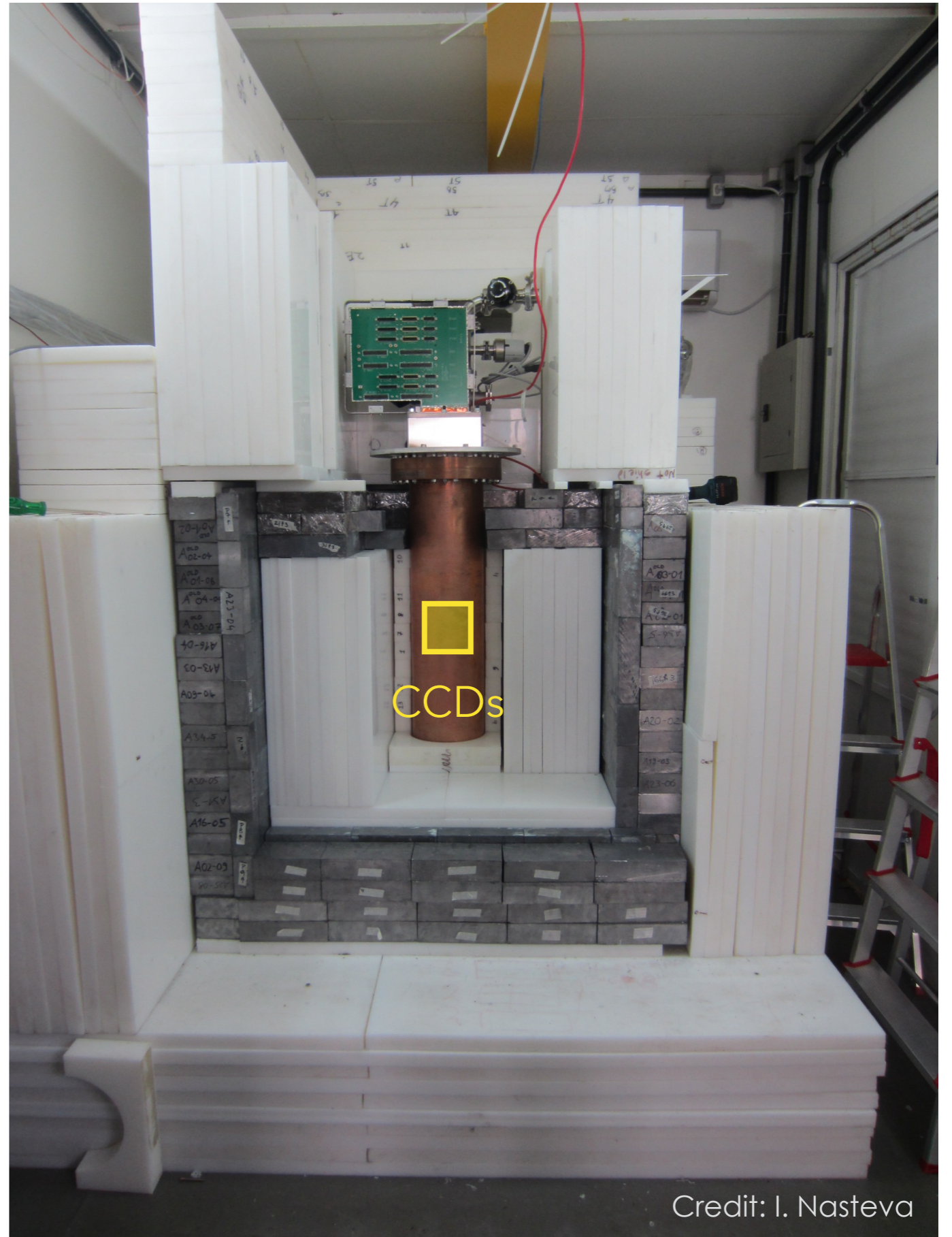
Chumbo (15 cm)
~ 800 tijolos

Polietileno de alta
densidade (30 cm)

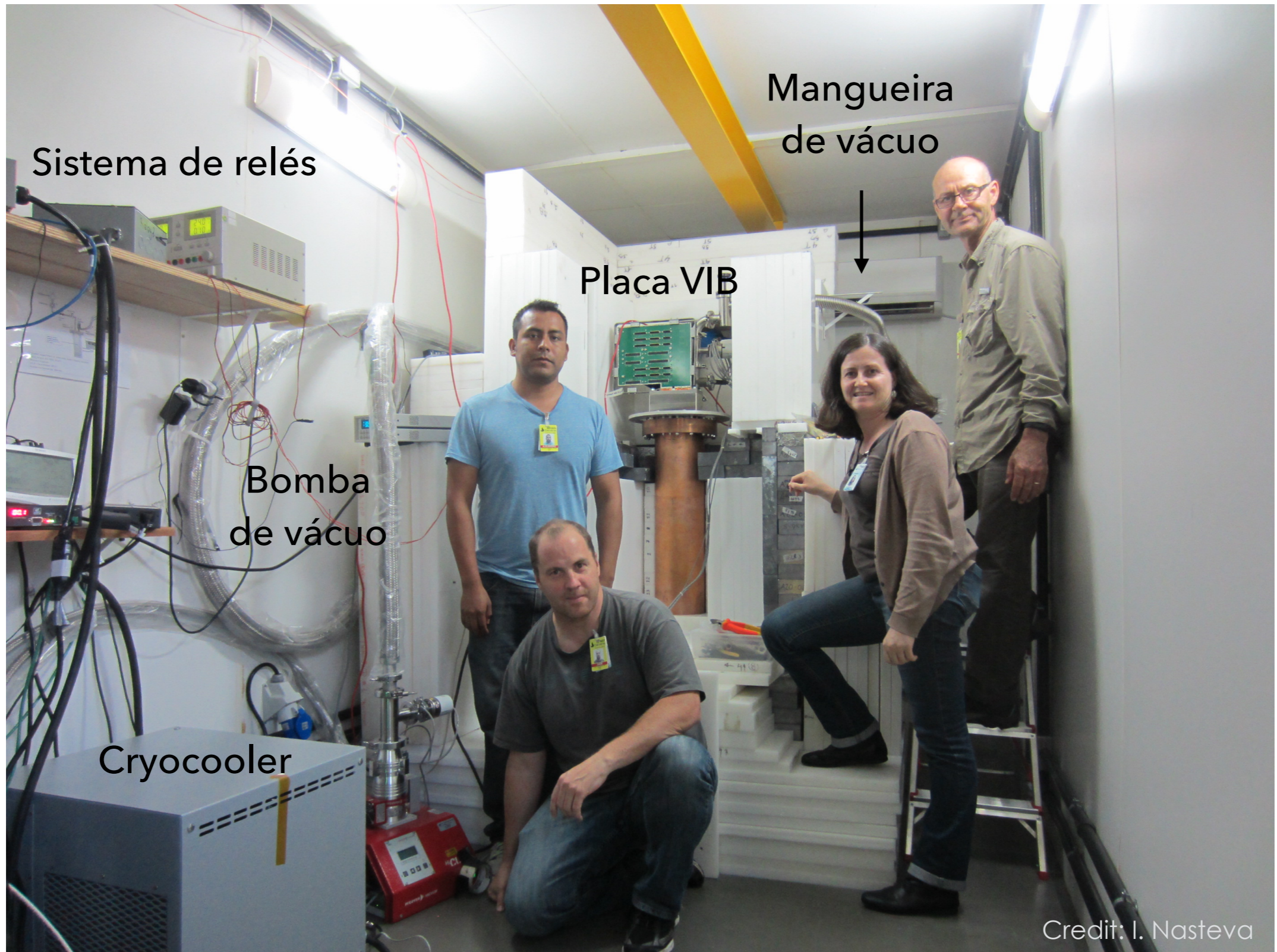


Credit: I. Nasteva

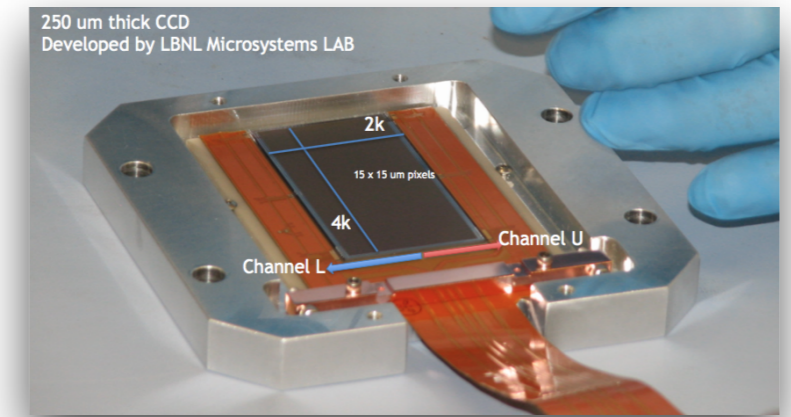
CONNIE @Angra



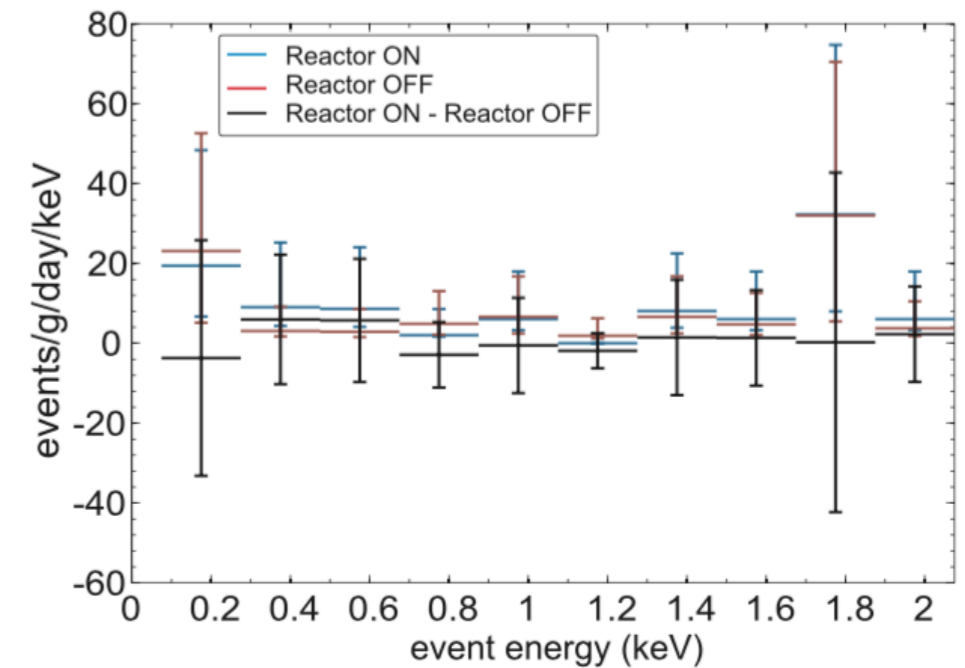
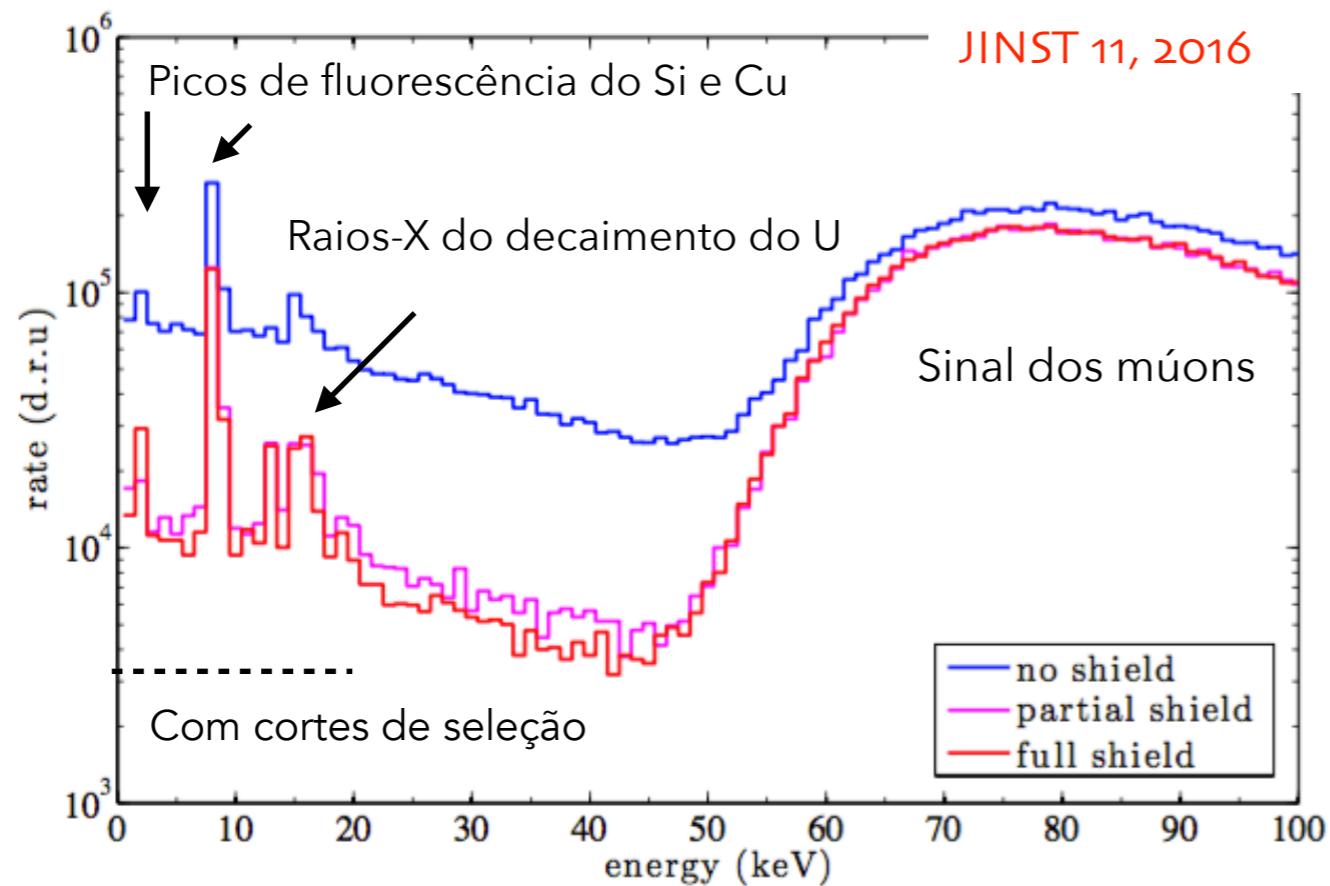
CONNIE @Angra



Prova de conceito 2014 – 2016

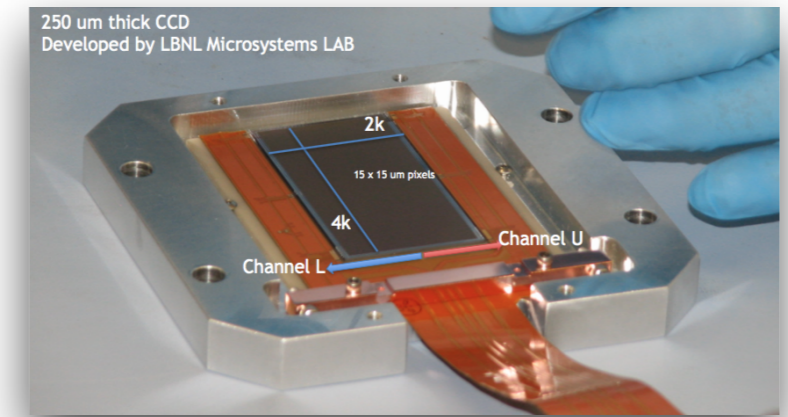


- Redução do background

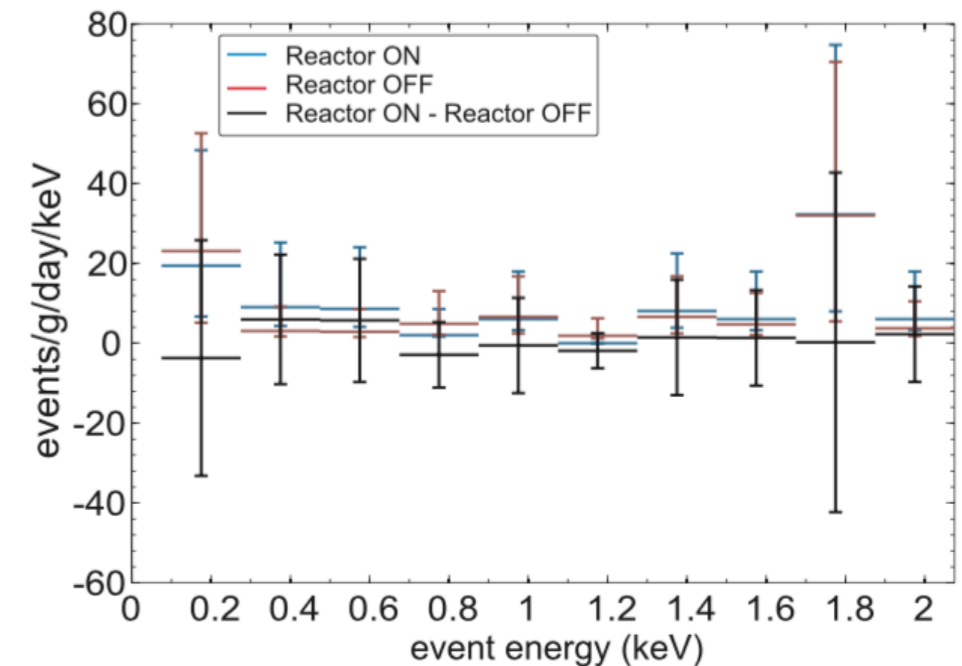
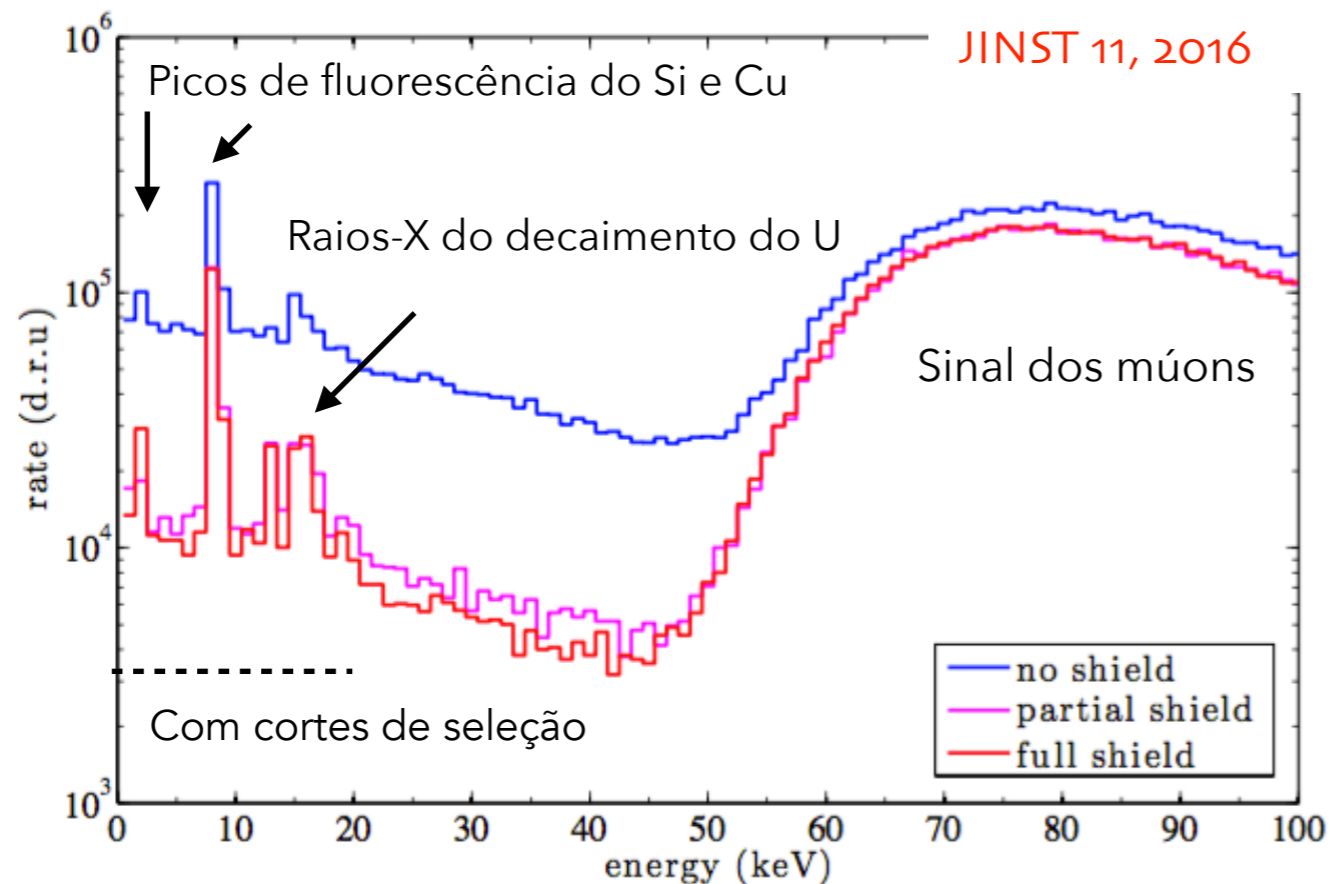


- Análise de dados com apenas 1 CCD colhendo dados por 15 dias
- Estudo da taxa de eventos com o reator ligado (ON) e desligado (OFF)
- Primeiro limite para CEvNS: 500 vezes maior ao sinal esperado pelo Modelo Padrão

Prova de conceito 2014 – 2016



- Redução do background



- Análise de dados com apenas 1 CCD colhendo dados por 15 dias
- Estudo da taxa de eventos com o reator ligado (ON) e desligado (OFF)
- Primeiro limite para CEvNS: 500 vezes maior ao sinal esperado pelo Modelo Padrão

No bom caminho!
Um detector maior e mais tempo de medição são necessários

CONNIE - primeiros dados

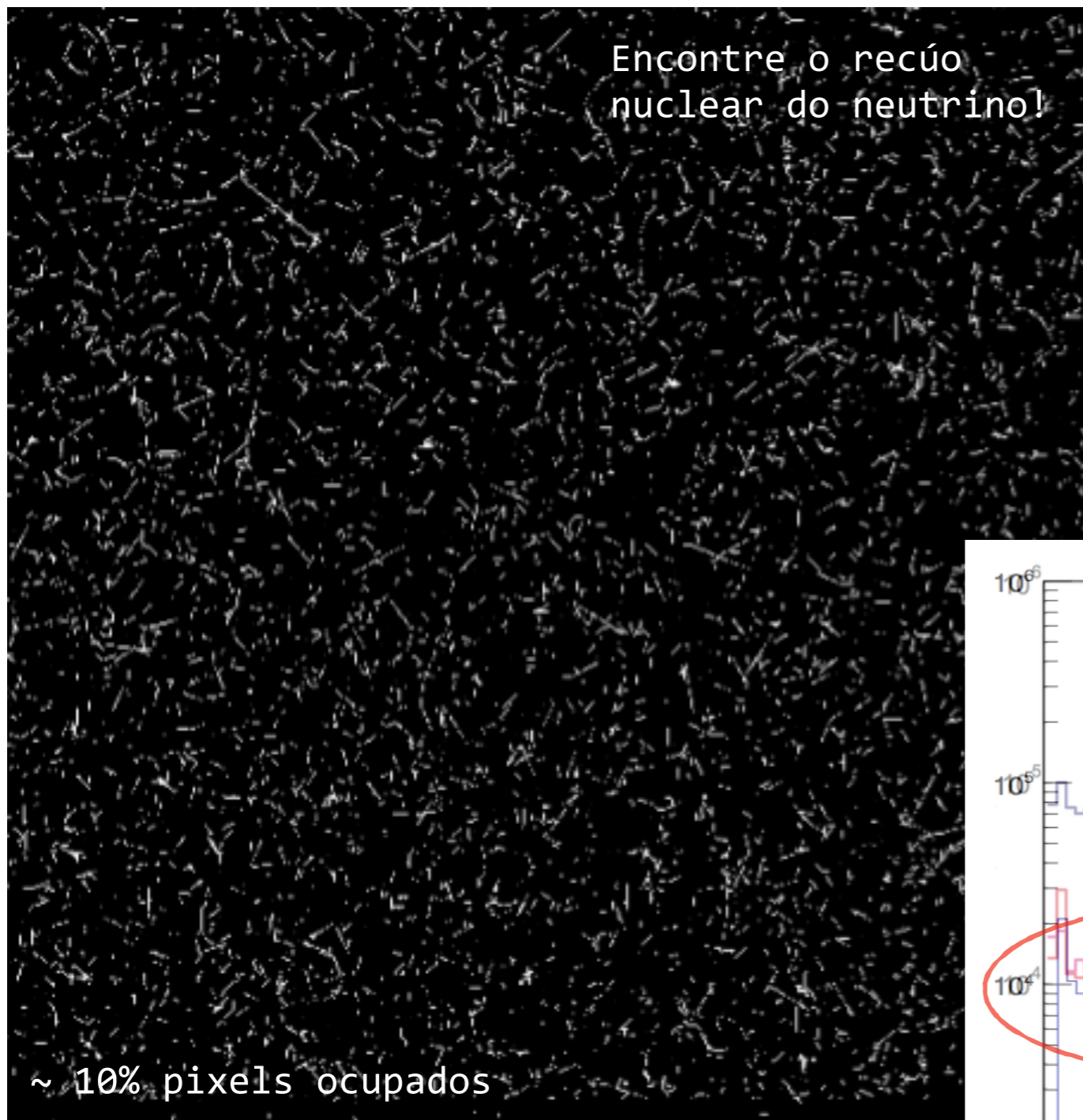
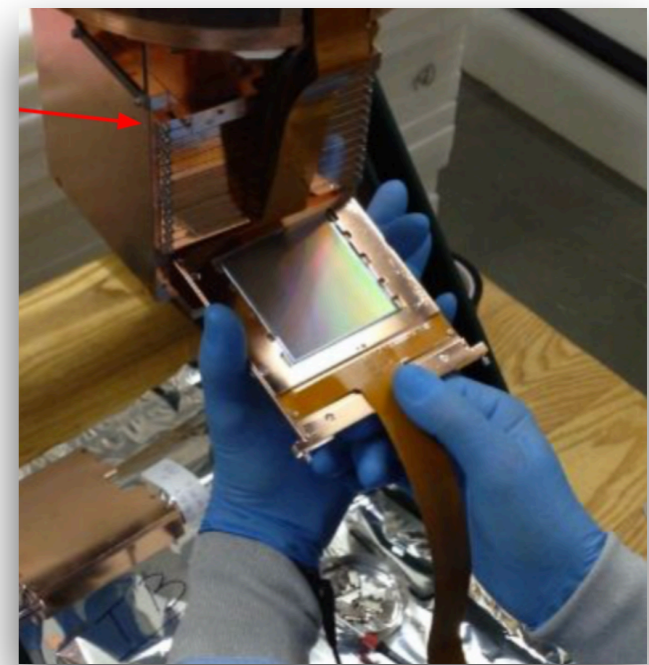
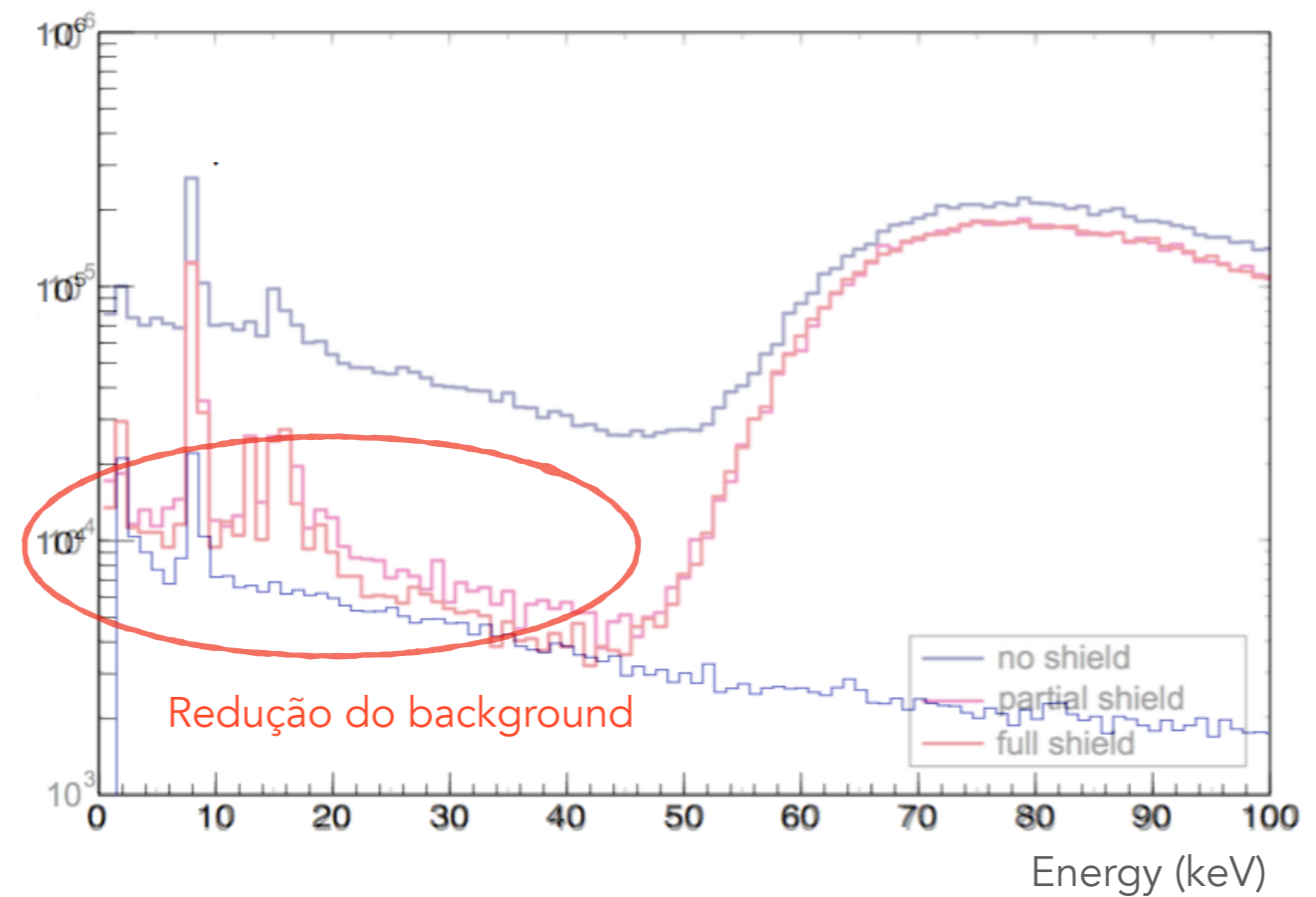
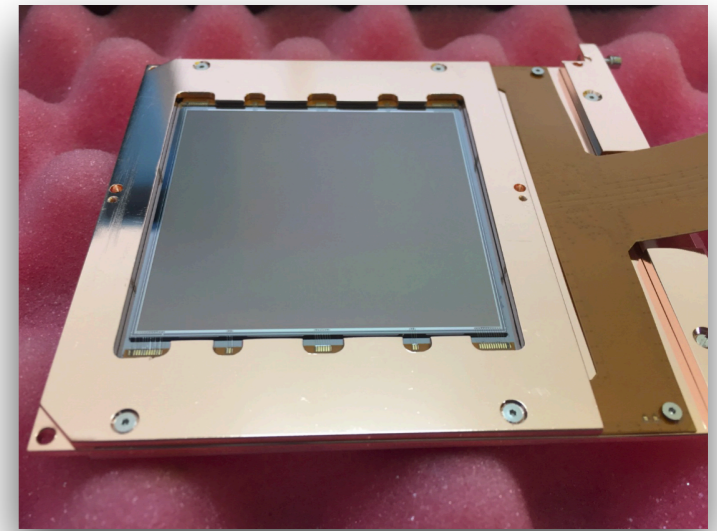


Imagem completa de um CCD de 4k x 4k com 3 h de exposição em CONNIE

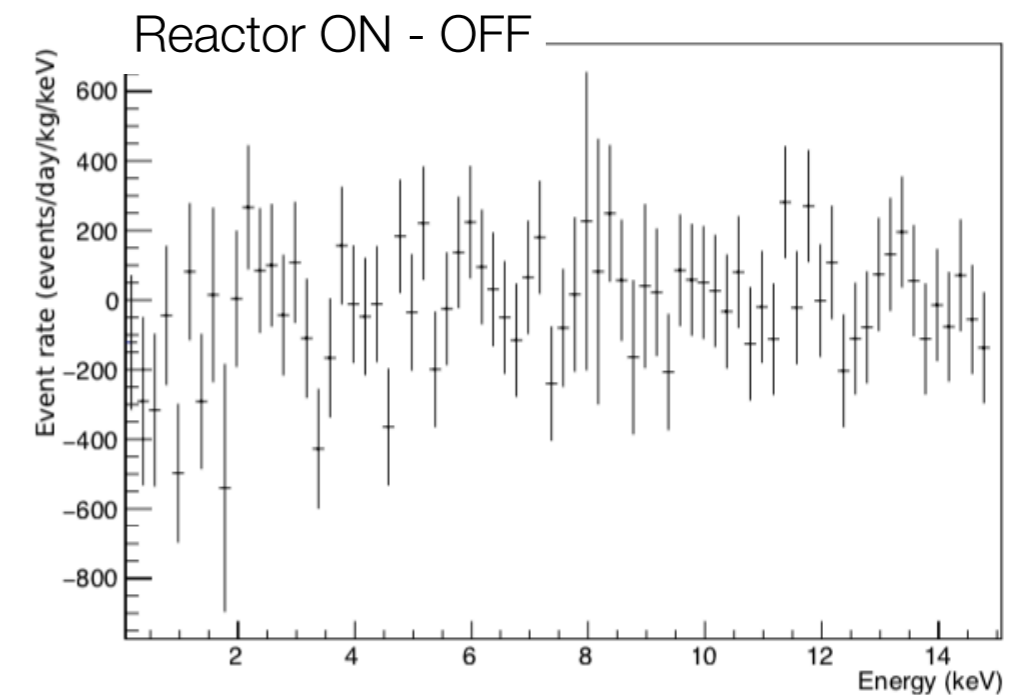
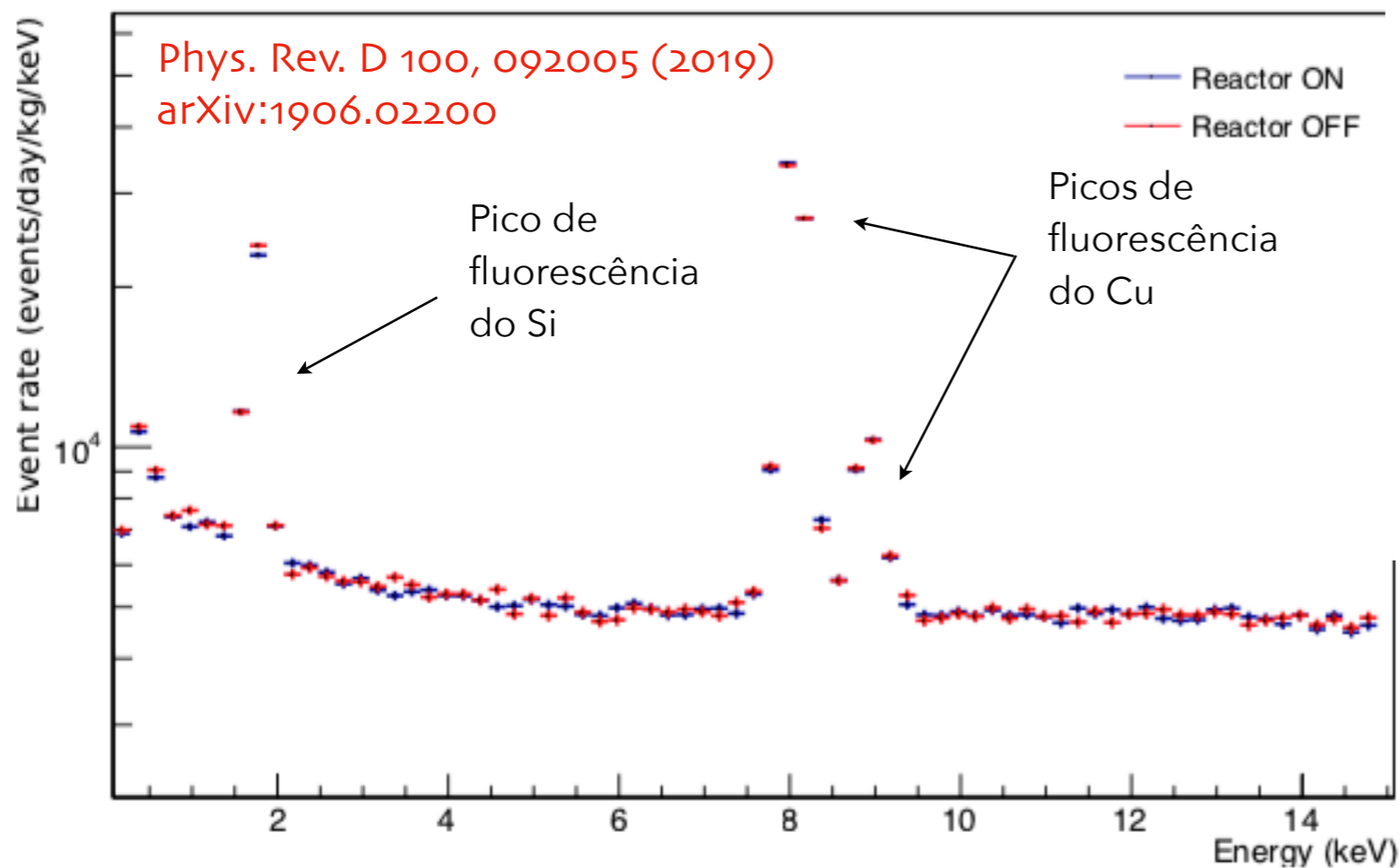


CONNIE - resultados

- 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-dia com reator ligado e 1,6 kg-dia com reator desligado

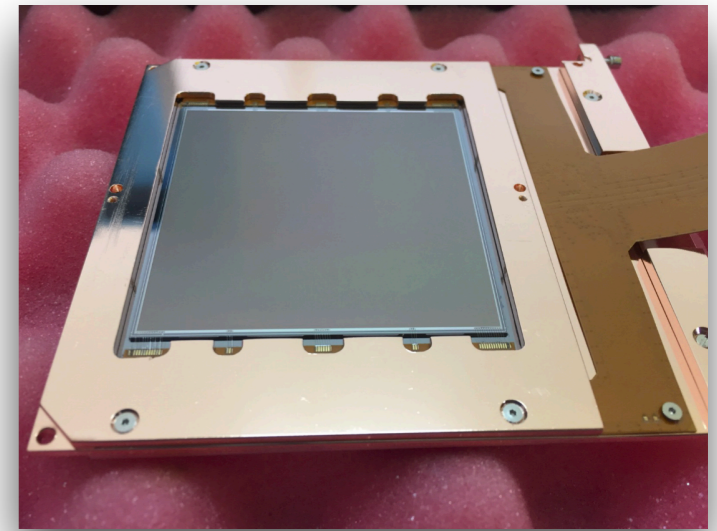


- Espectro de energia

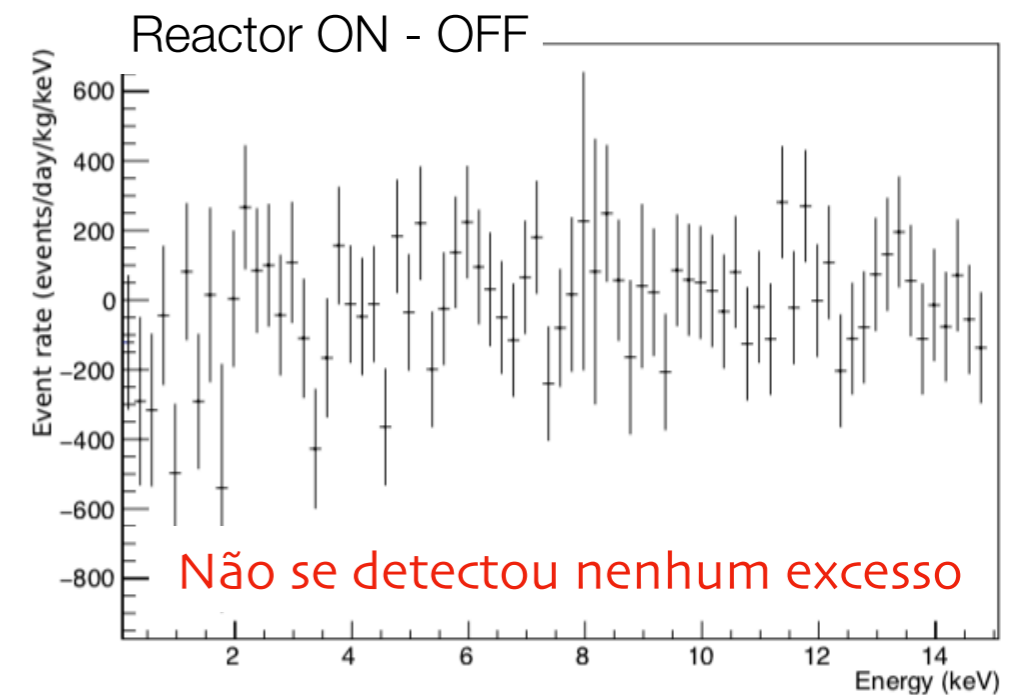
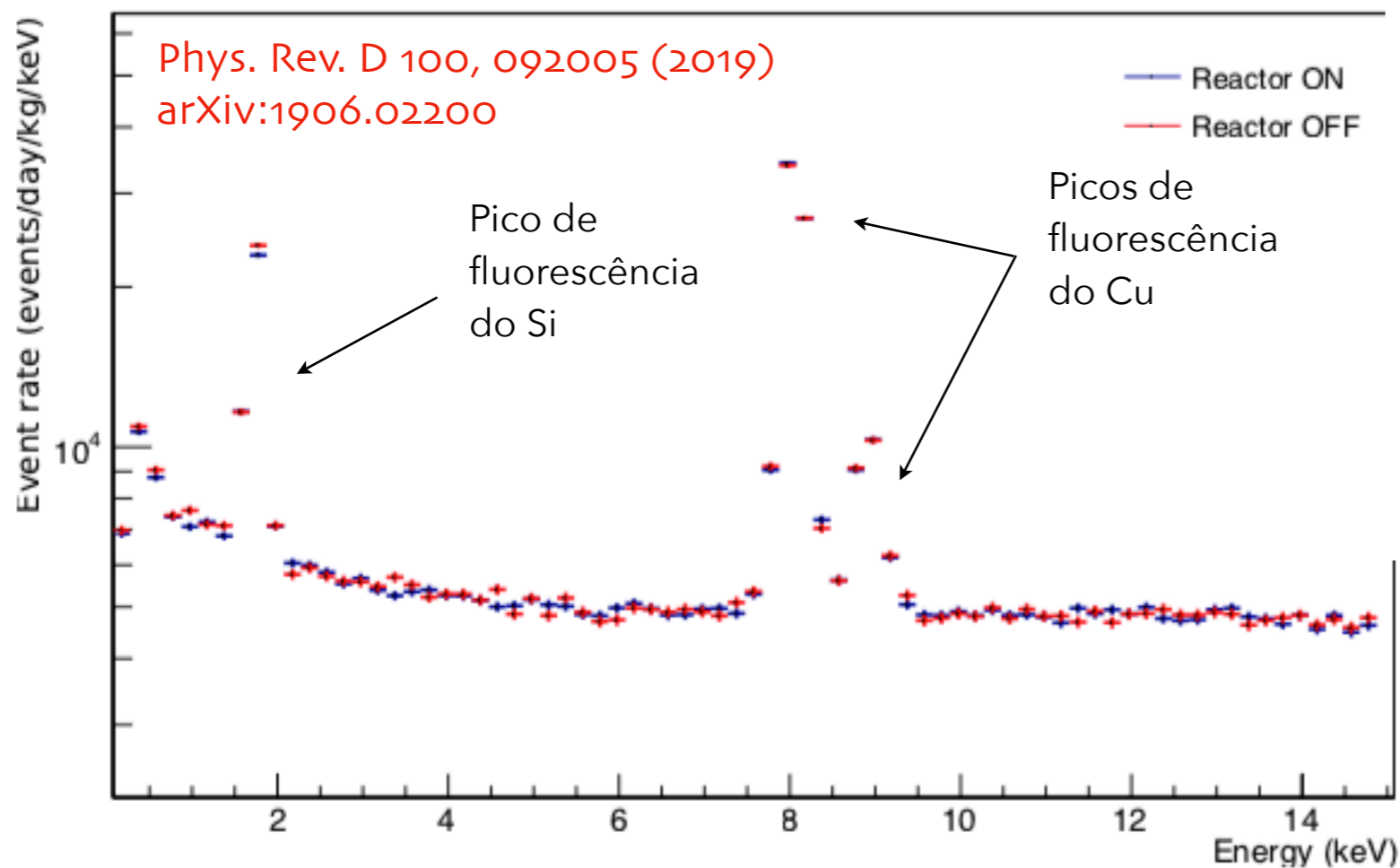


CONNIE - resultados

- 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-dia com reator ligado e 1,6 kg-dia com reator desligado

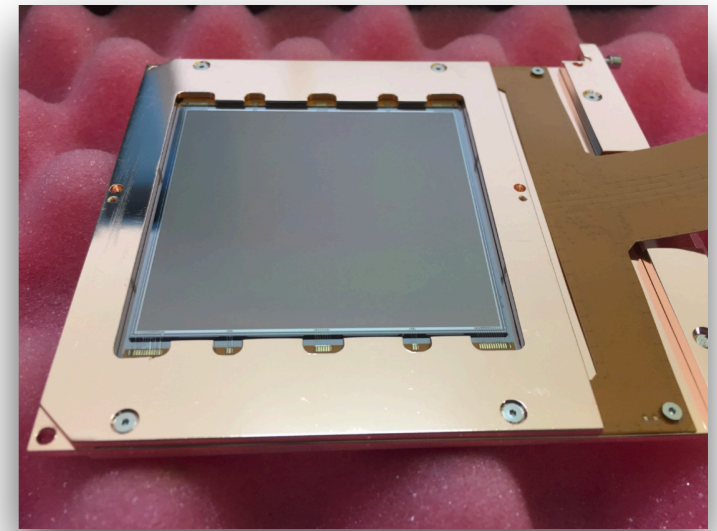


- Espectro de energia

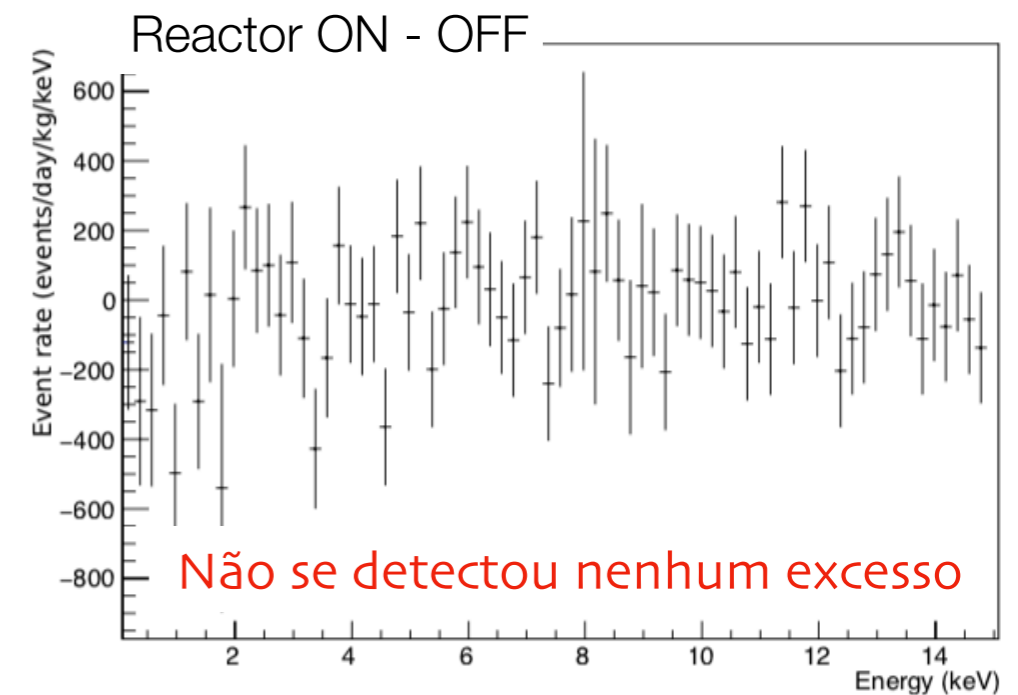
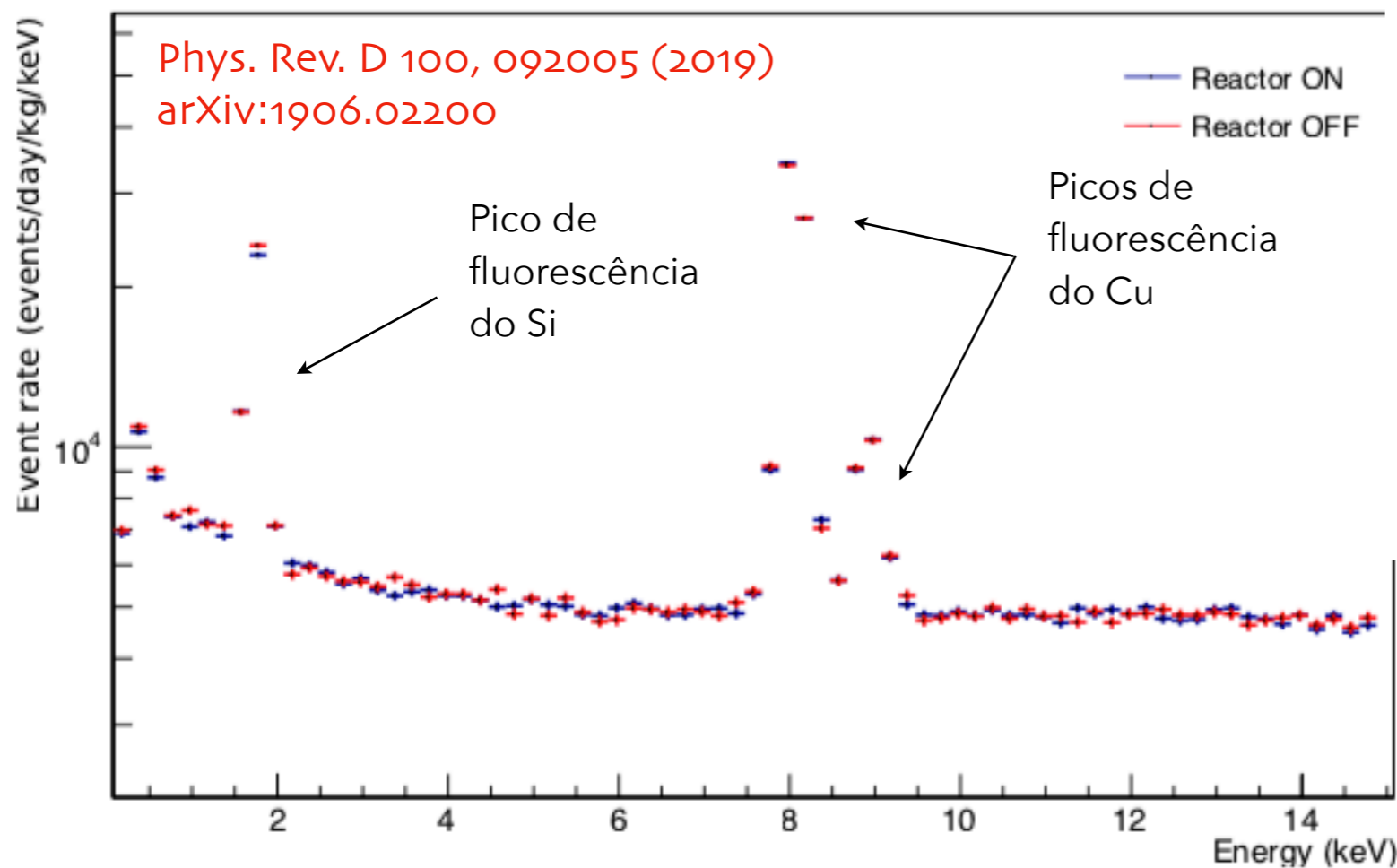


CONNIE - resultados

- 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-dia com reator ligado e 1,6 kg-dia com reator desligado



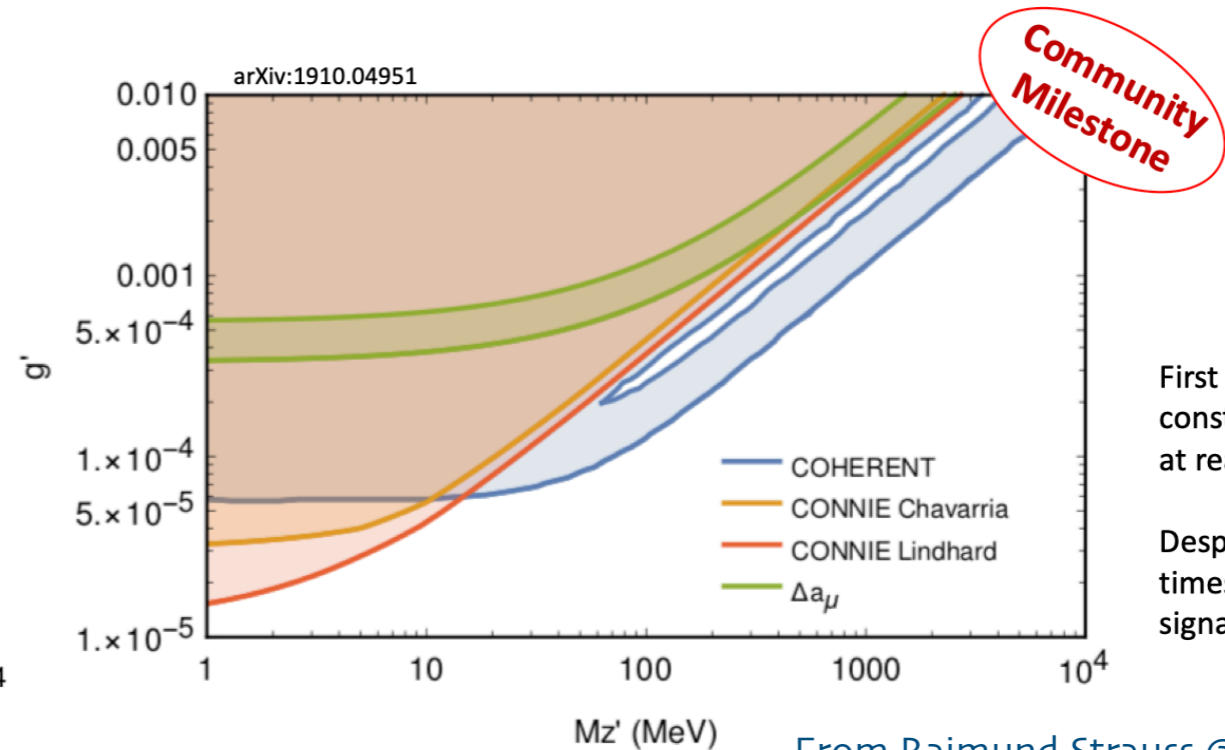
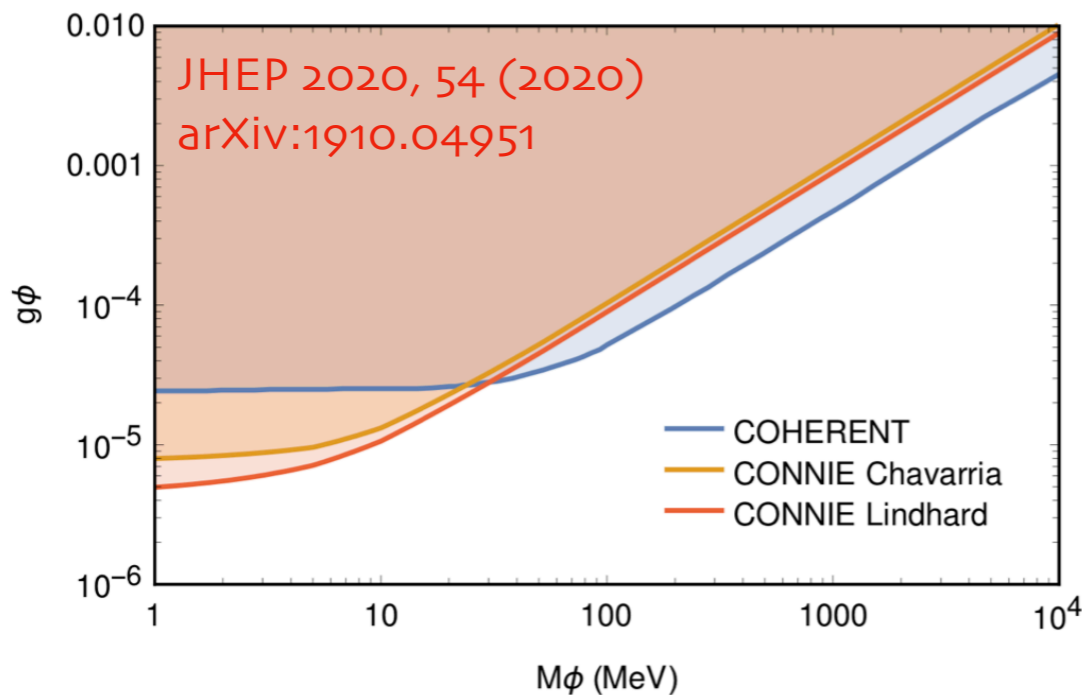
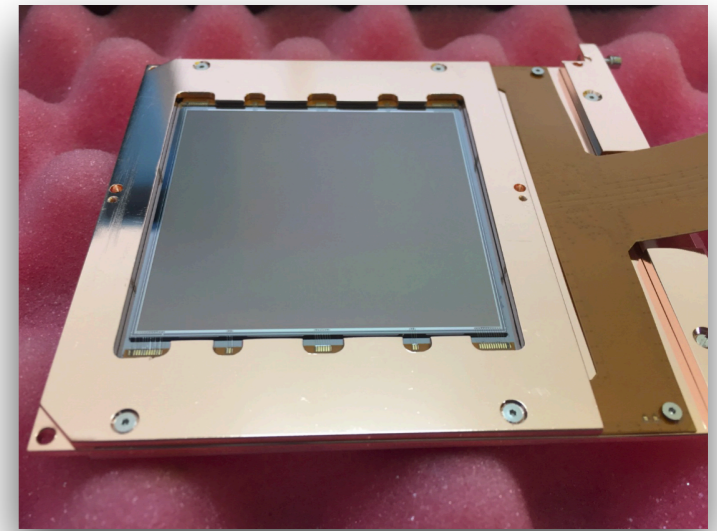
- Espectro de energia



Limite para CEvNS: 40 vezes maior ao sinal esperado pelo Modelo Padrão

CONNIE - resultados

- Limites para física além do Modelo Padrão
 - ▶ Limites para dois modelos simplificados de mediadores leves
 - Mediador vetorial leve (Z')
 - Mediador escalar leve (ϕ)
 - ▶ Melhor limite no mundo (CEvNS em reatores) em baixas energias



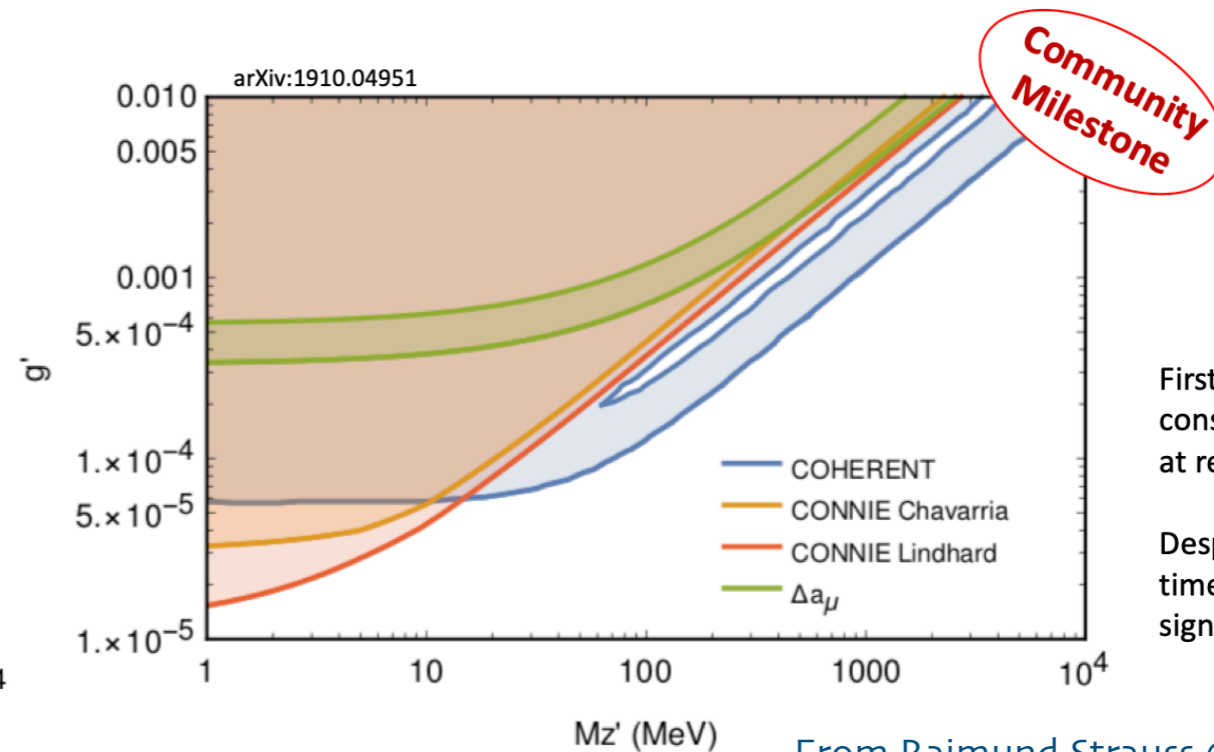
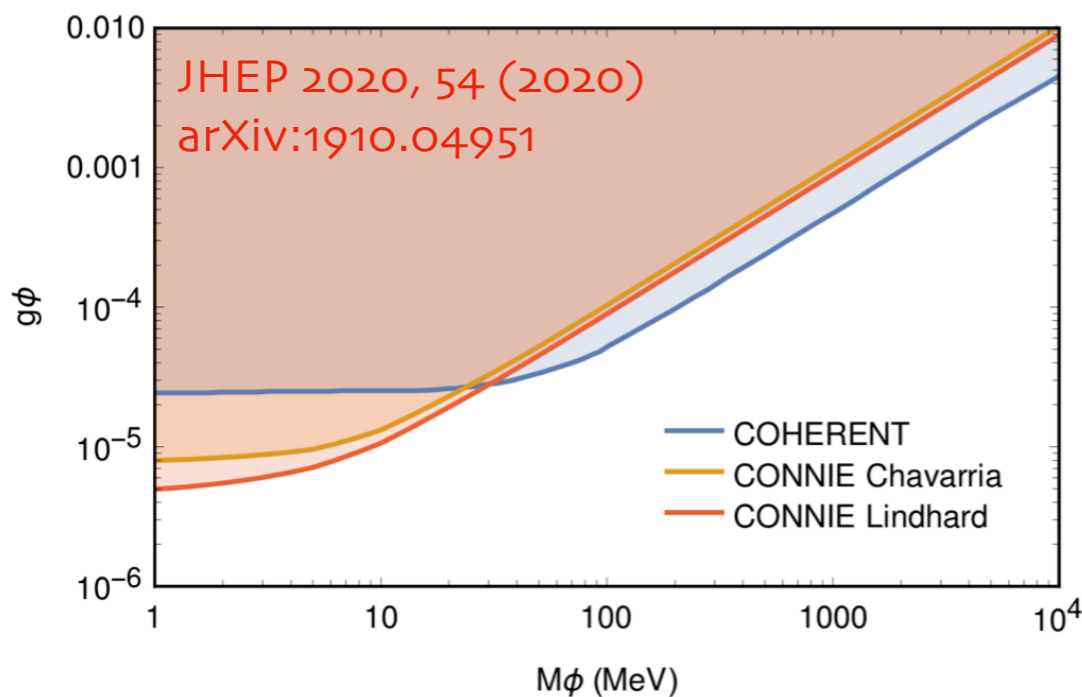
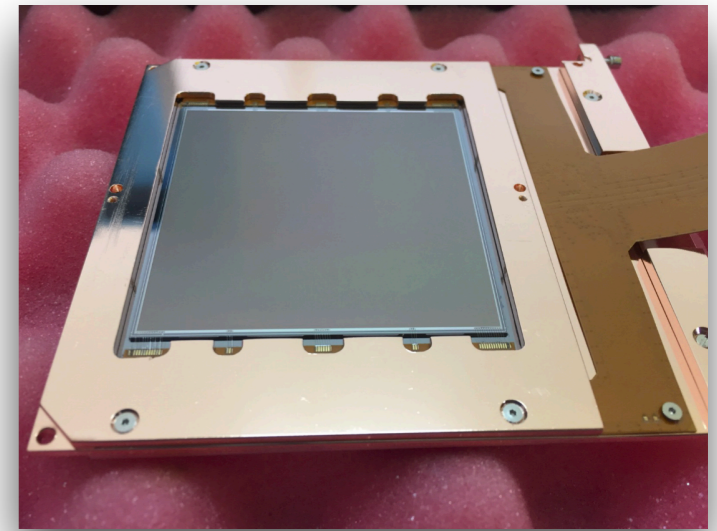
First competitive BSM constraint from CEvNS at reactors!

Despite background ~ 40 times above CEvNS signal.

From Raimund Strauss @ Neutrino 2020

CONNIE - resultados

- Limites para física além do Modelo Padrão
 - ▶ Limites para dois modelos simplificados de mediadores leves
 - Mediador vetorial leve (Z')
 - Mediador escalar leve (ϕ)
 - ▶ Melhor limite no mundo (CEvNS em reatores) em baixas energias



From Raimund Strauss @ Neutrino 2020



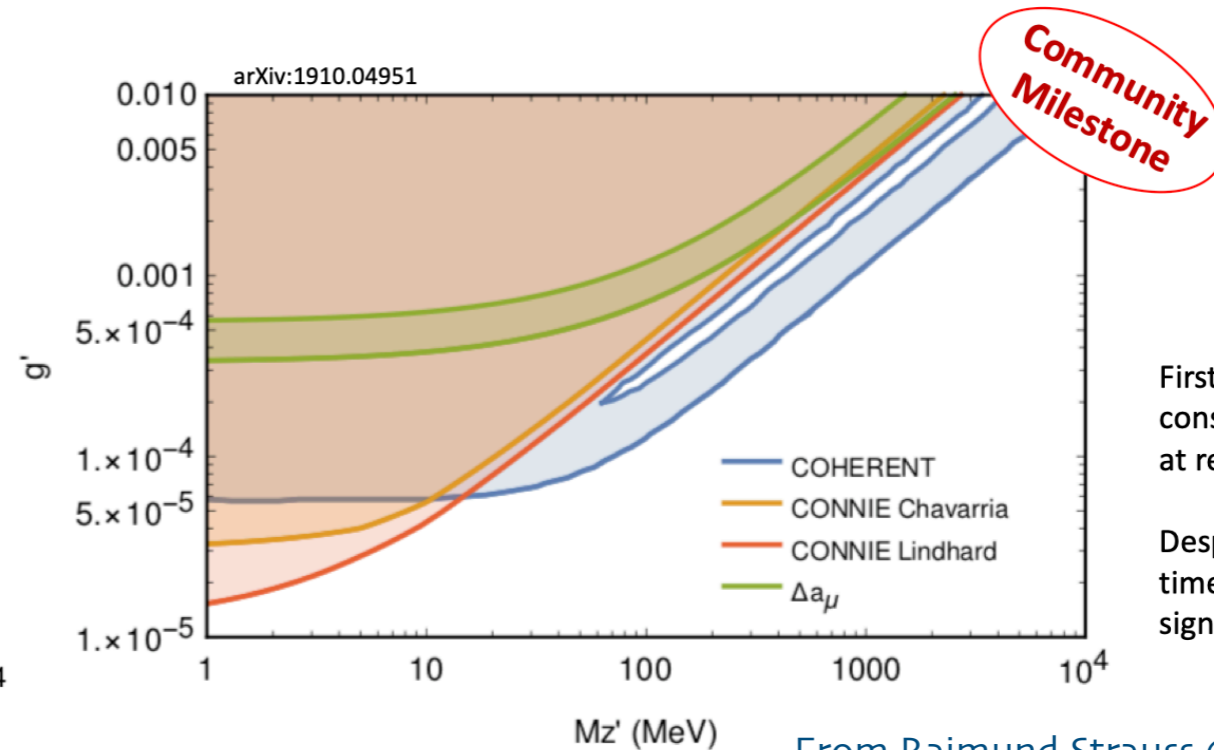
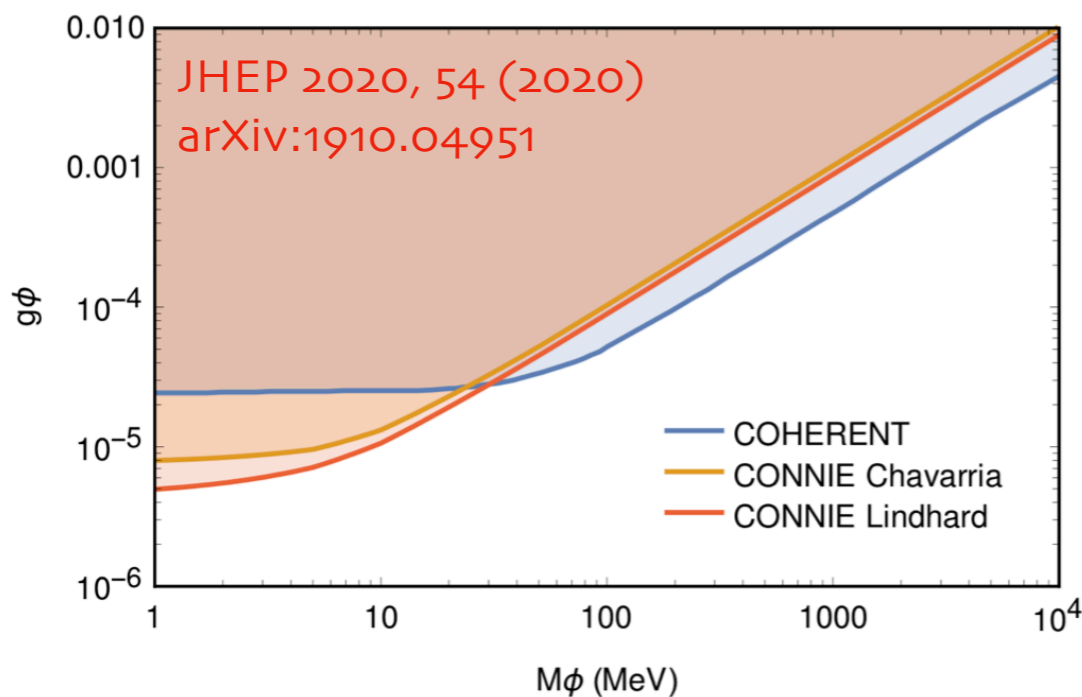
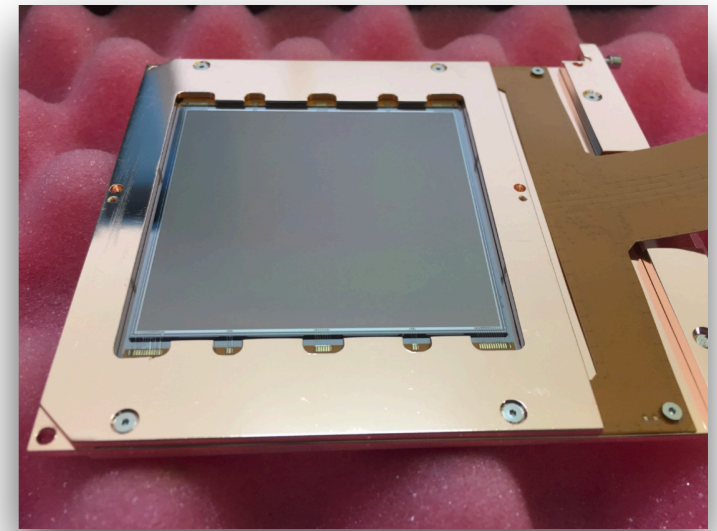
First competitive BSM constraint from CEvNS at reactors!


Despite background ~ 40 times above CEvNS signal.

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

CONNIE - resultados

- Limites para física além do Modelo Padrão
 - ▶ Limites para dois modelos simplificados de mediadores leves
 - Mediador vetorial leve (Z')
 - Mediador escalar leve (ϕ)
 - ▶ Melhor limite no mundo (CEvNS em reatores) em baixas energias



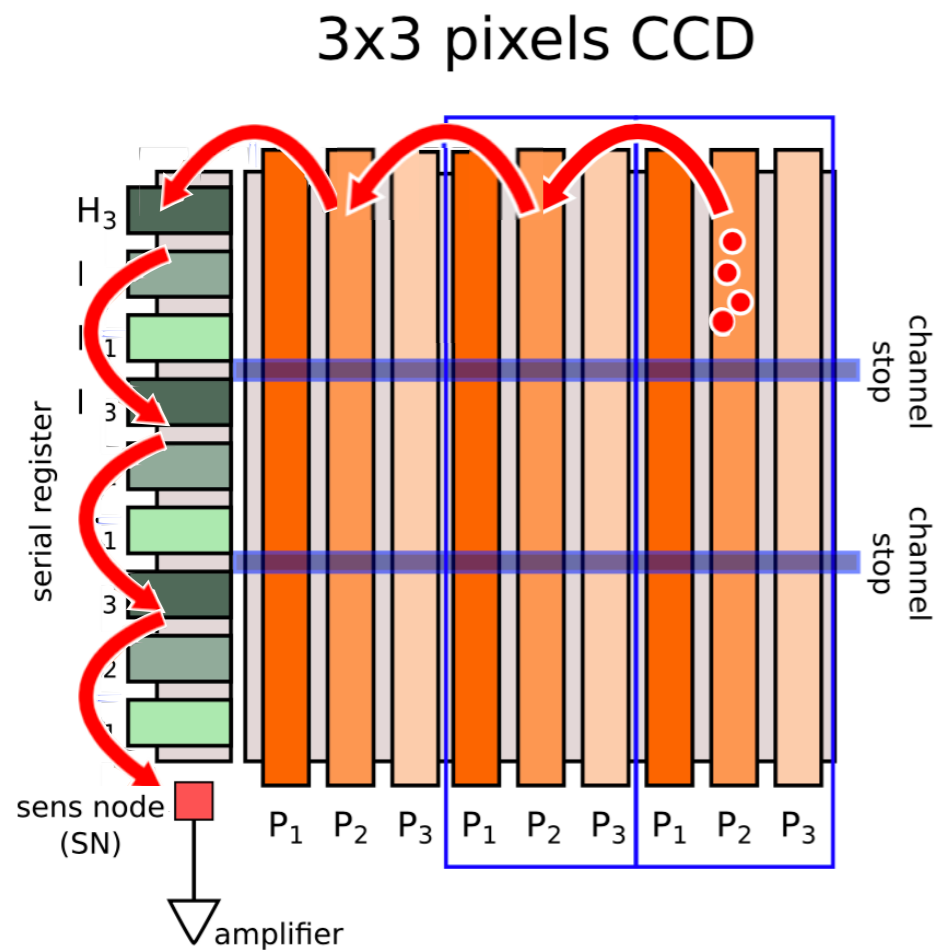

 co.vnie
 First competitive BSM constraint from CEvNS at reactors!
 Despite background ~ 40 times above CEvNS signal.

From Raimund Strauss @ Neutrino 2020

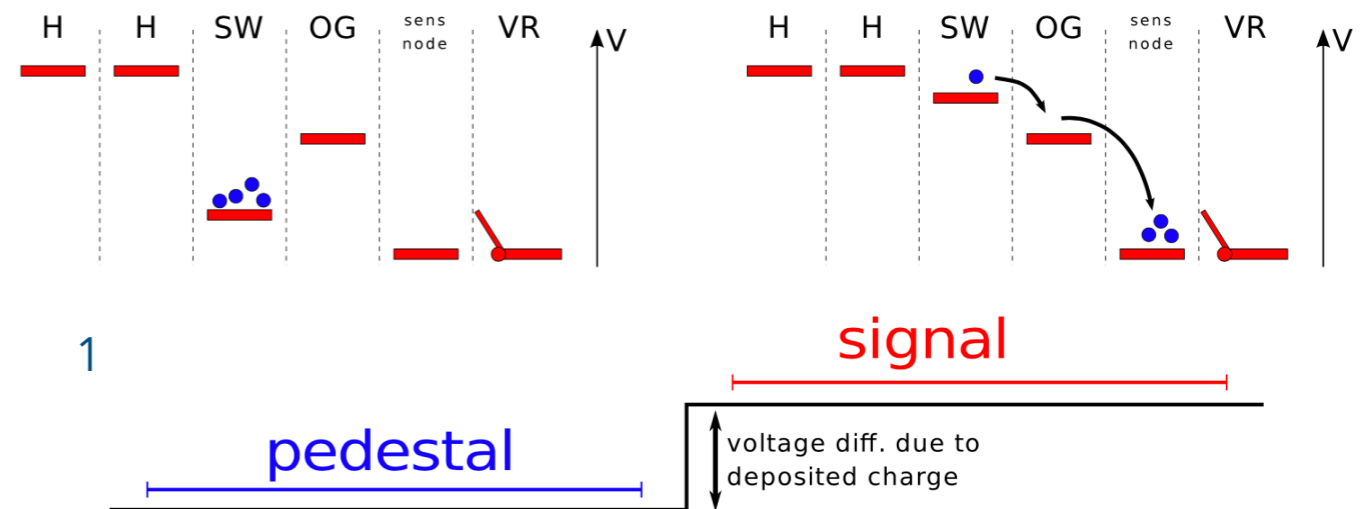
Experimentos de neutrinos de reator são especialmente aptos para sondar nova física em baixas energias

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

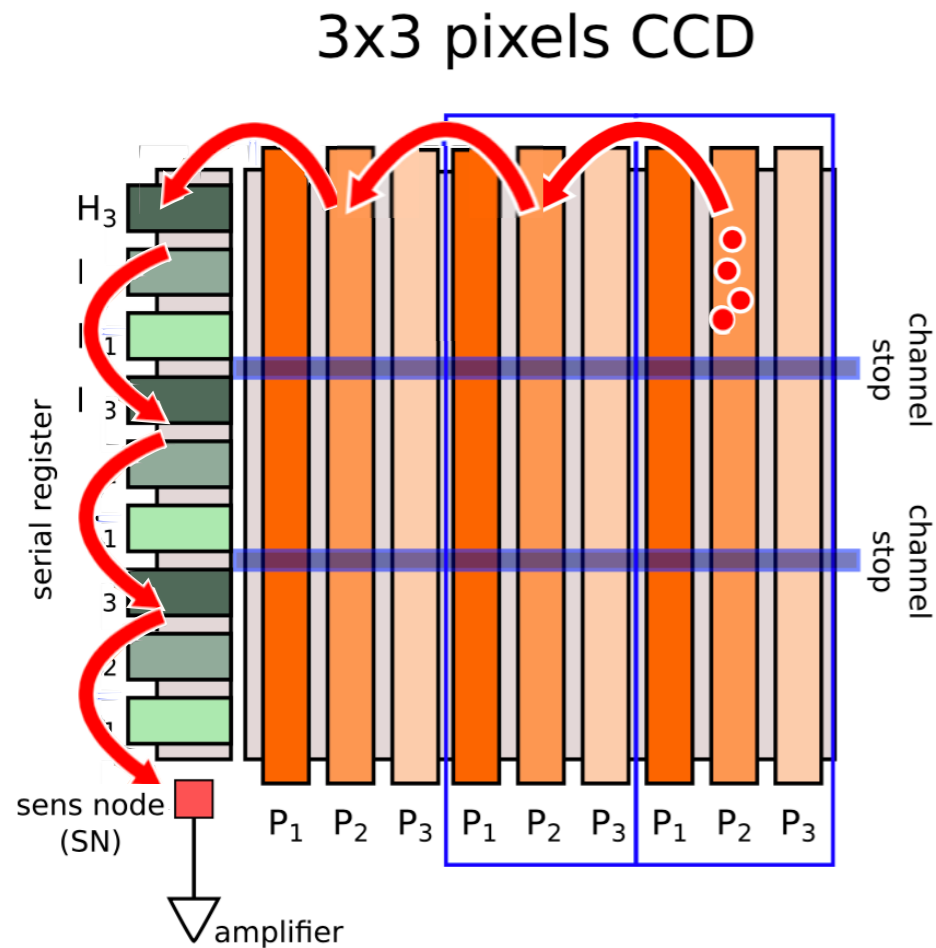
Nova tecnologia: Skipper-CCDs



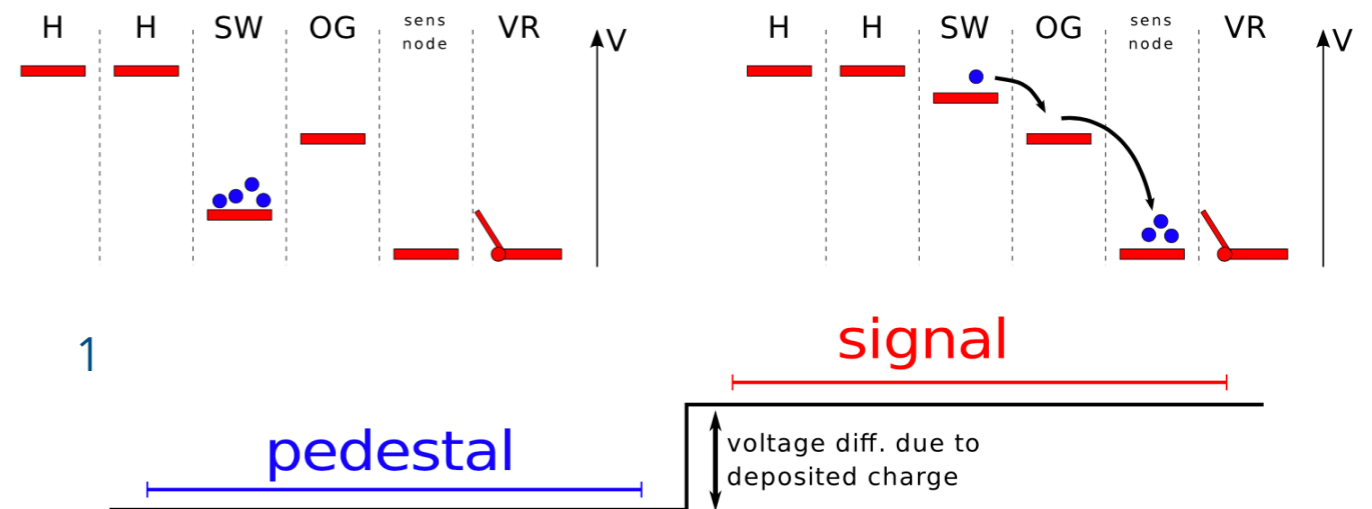
► CCD normal



Nova tecnologia: Skipper-CCDs

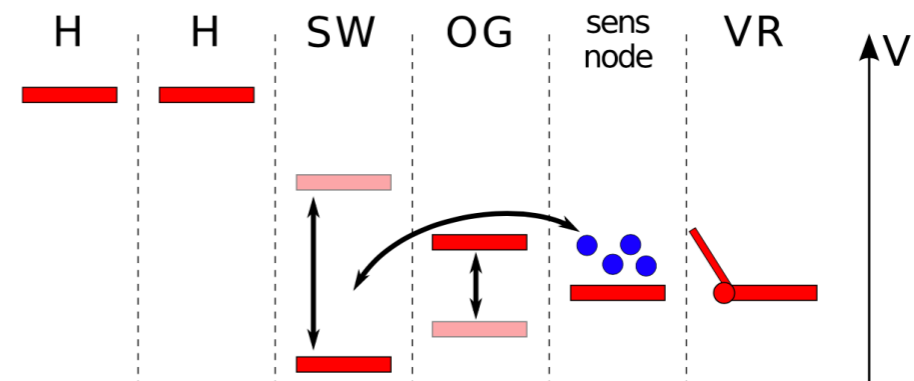


▶ CCD normal



▶ CCD Skipper

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



N leituras



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

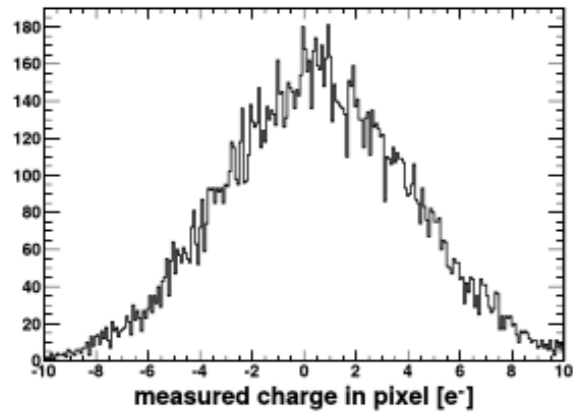
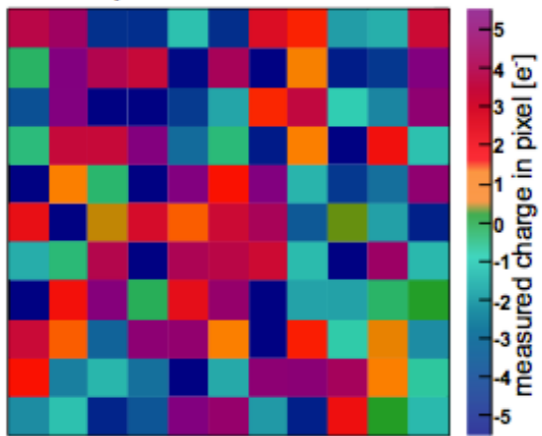
$$\sigma^2 = \frac{\sigma_1^2}{N} \quad \sigma_1 = \text{ruído de uma só leitura}$$

J. Tiffenberg et al, PRL 119 (2017)

Nova tecnologia: Skipper-CCDs

- Contando elétrons... 0, 1,

Standard CCD mode: charge in each pixel is measured once



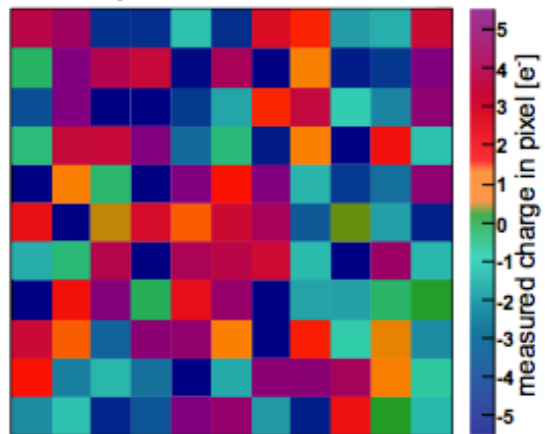
$$N_{\text{leituras}} = 1$$

$$\sigma = 3.5e^{-}$$

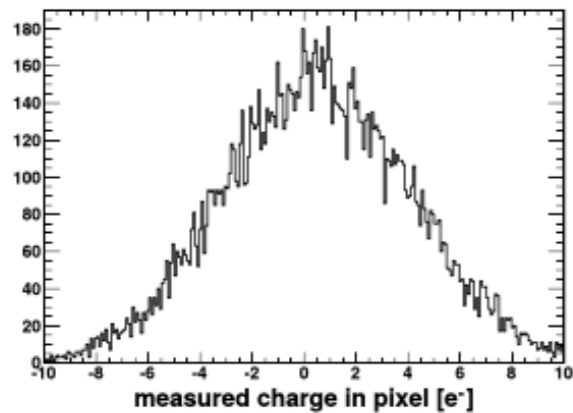
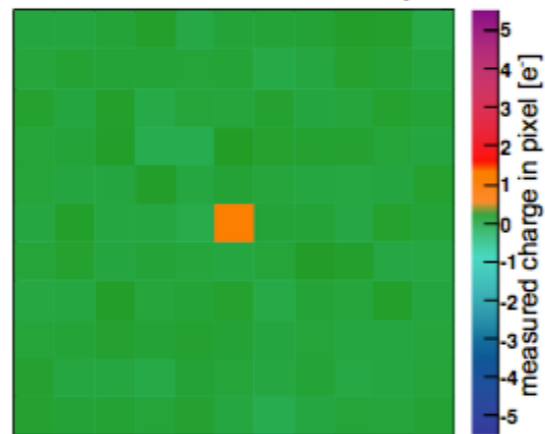
Nova tecnologia: Skipper-CCDs

- Contando elétrons... 0, 1,

Standard CCD mode: charge in each pixel is measured once

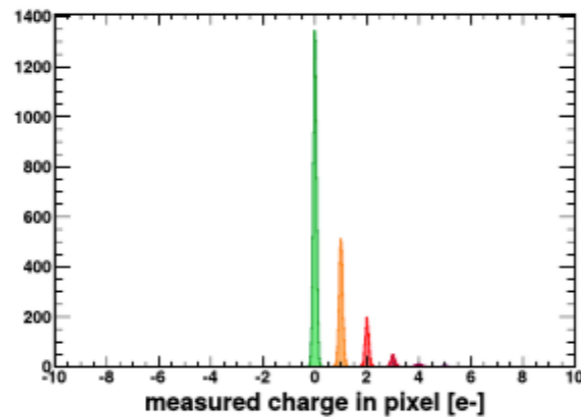


New Skipper CCD: charge in each pixel is measured multiple times



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

$$\sigma = 3.5e^-$$



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

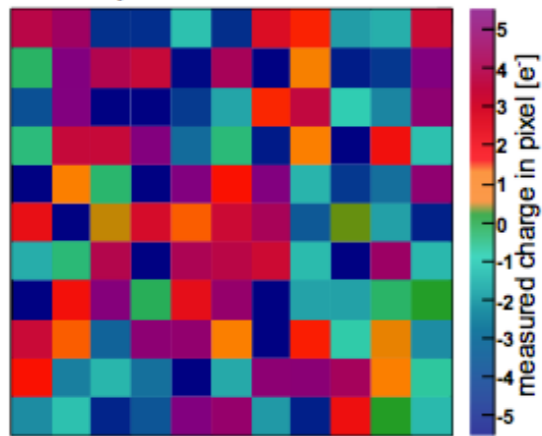
$$\sigma = \frac{3.5e^-}{\sqrt{4000}} = 0.06e^-$$

J. Tiffenberg et al, PRL 119 (2017)

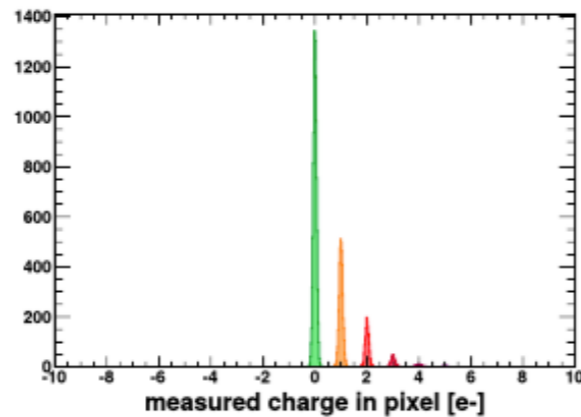
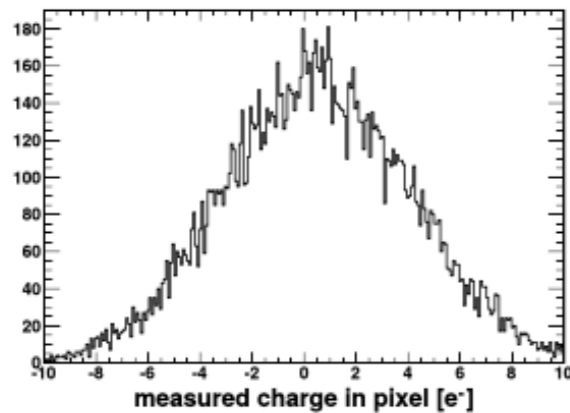
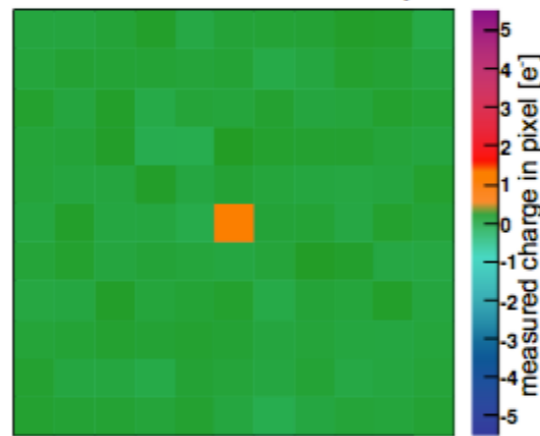
Nova tecnologia: Skipper-CCDs

- Contando elétrons... 0, 1,

Standard CCD mode: charge in each pixel is measured once



New Skipper CCD: charge in each pixel is measured multiple times



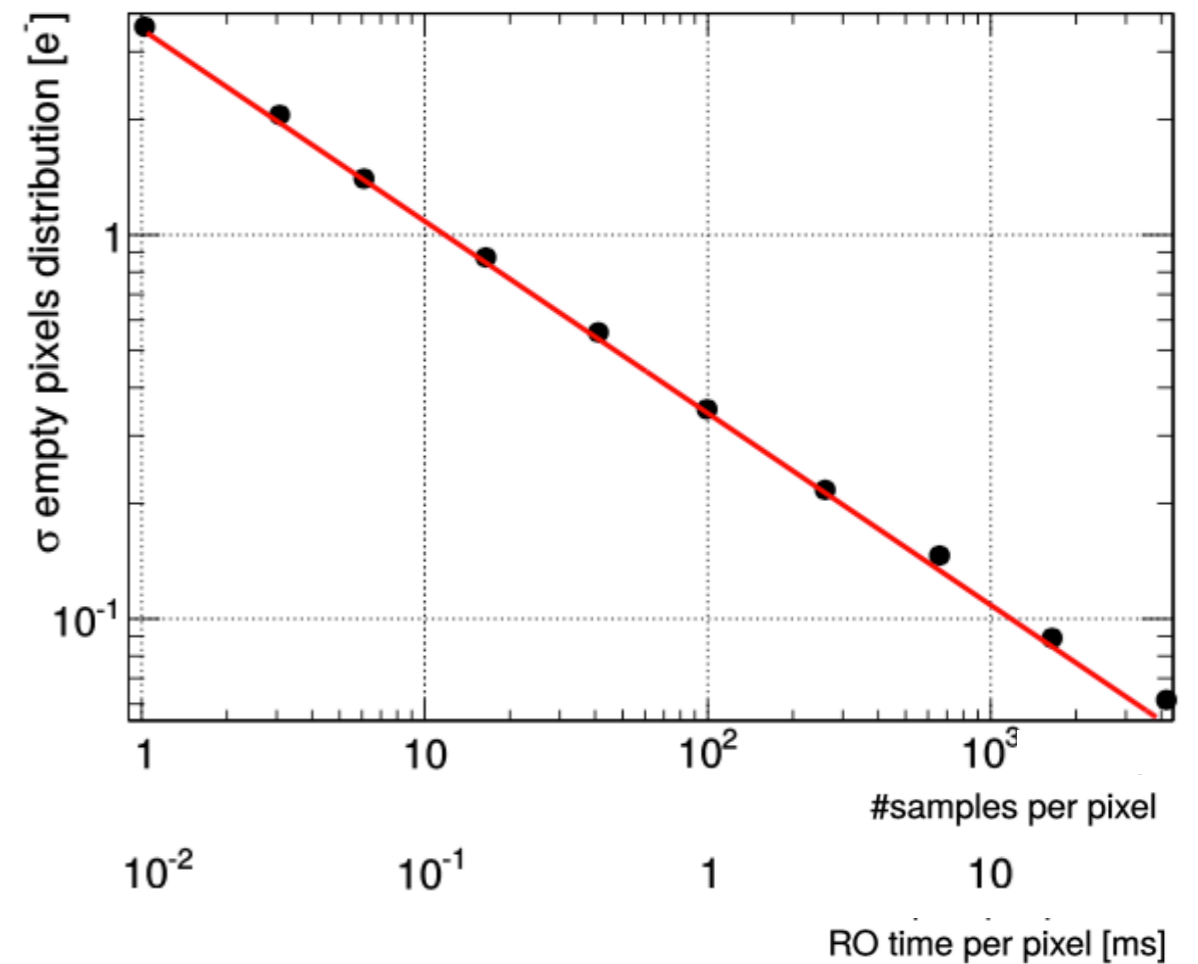
$$N_{\text{leituras}} = 1$$

$$\sigma = 3.5e^-$$

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

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

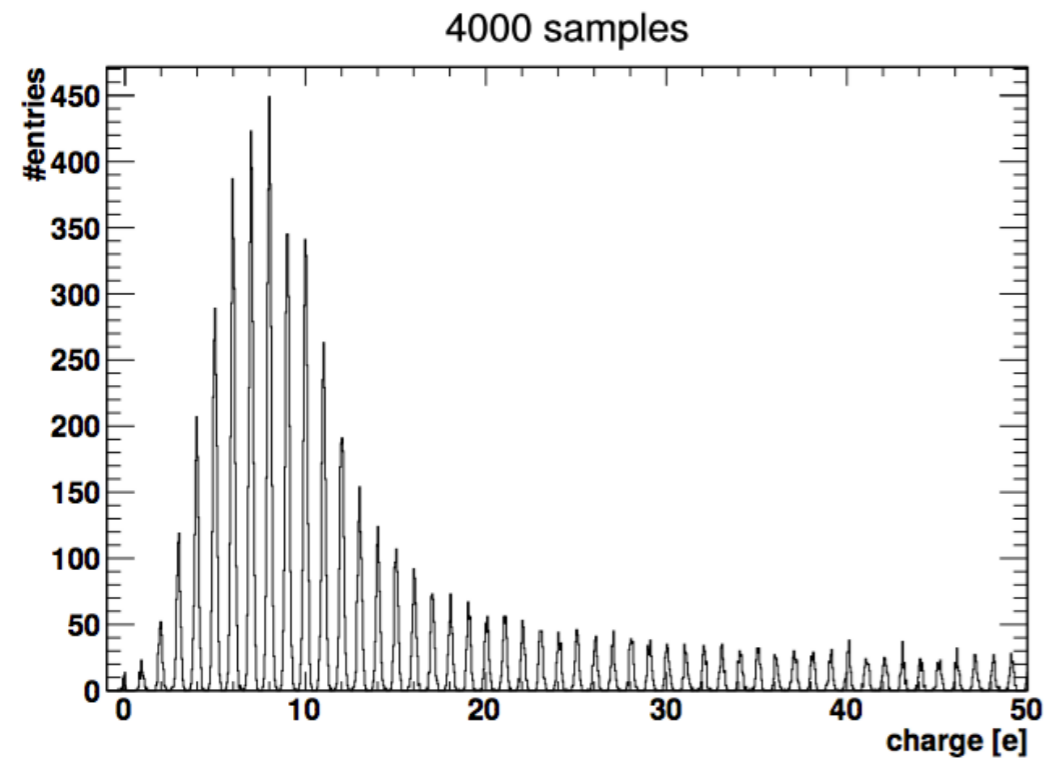
Ruído vs número de amostras



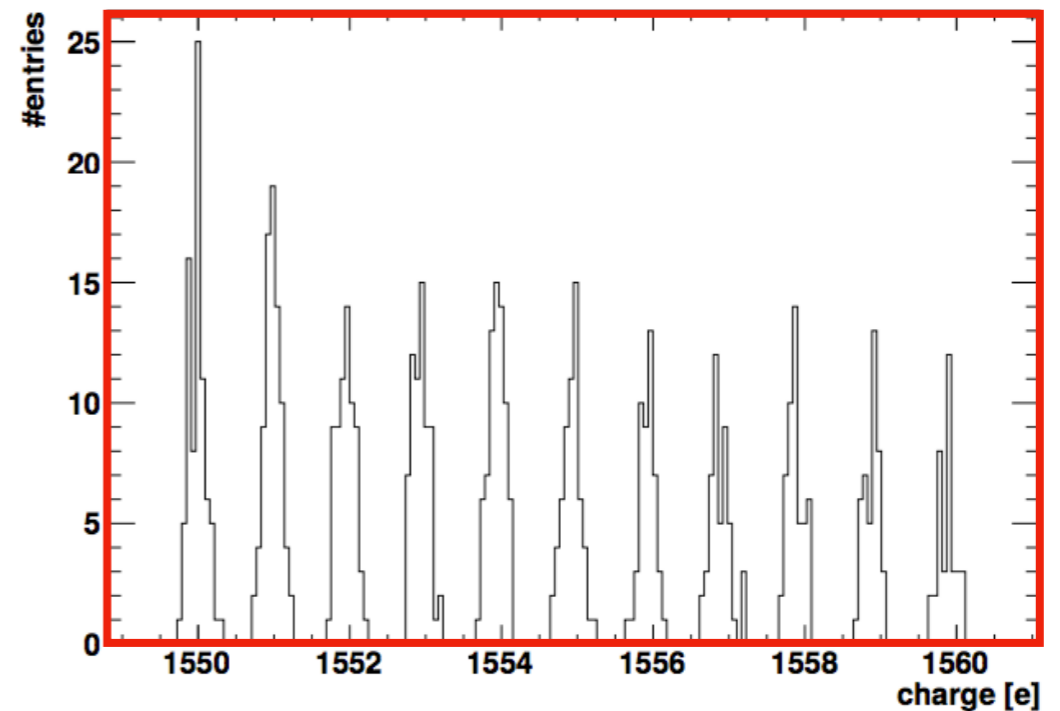
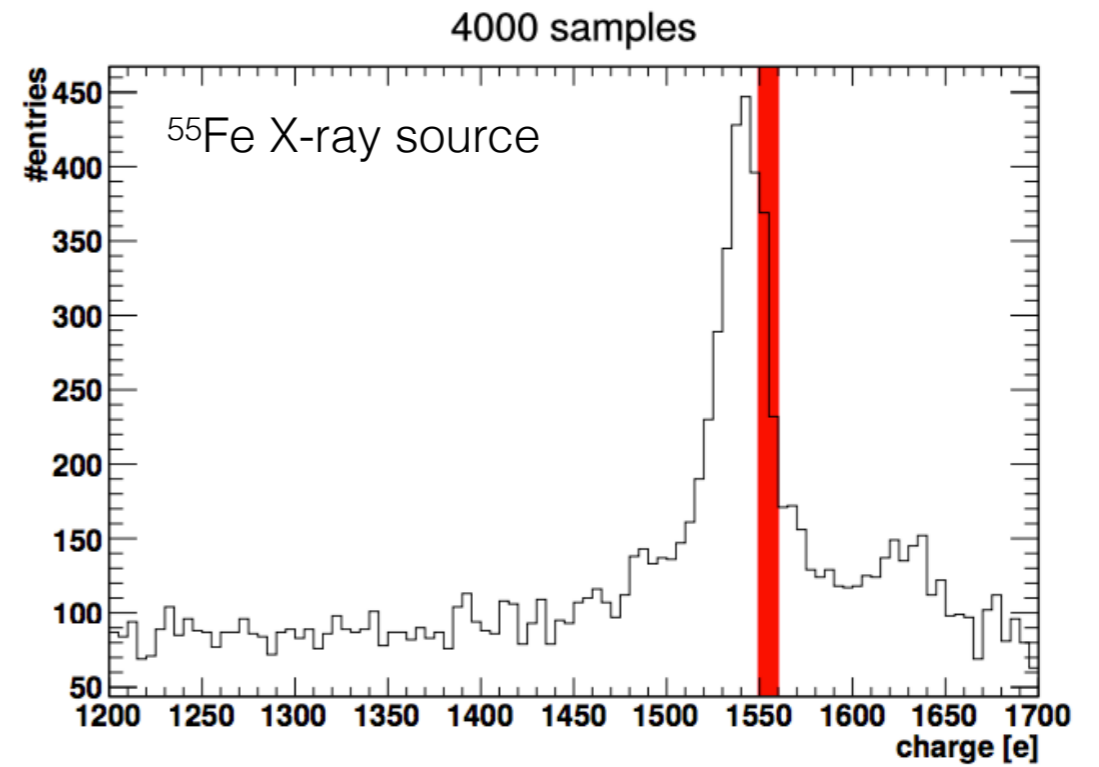
J. Tiffenberg et al, PRL 119 (2017)

Nova tecnologia: Skipper-CCDs

► Contando elétrons... 48, 49, 50

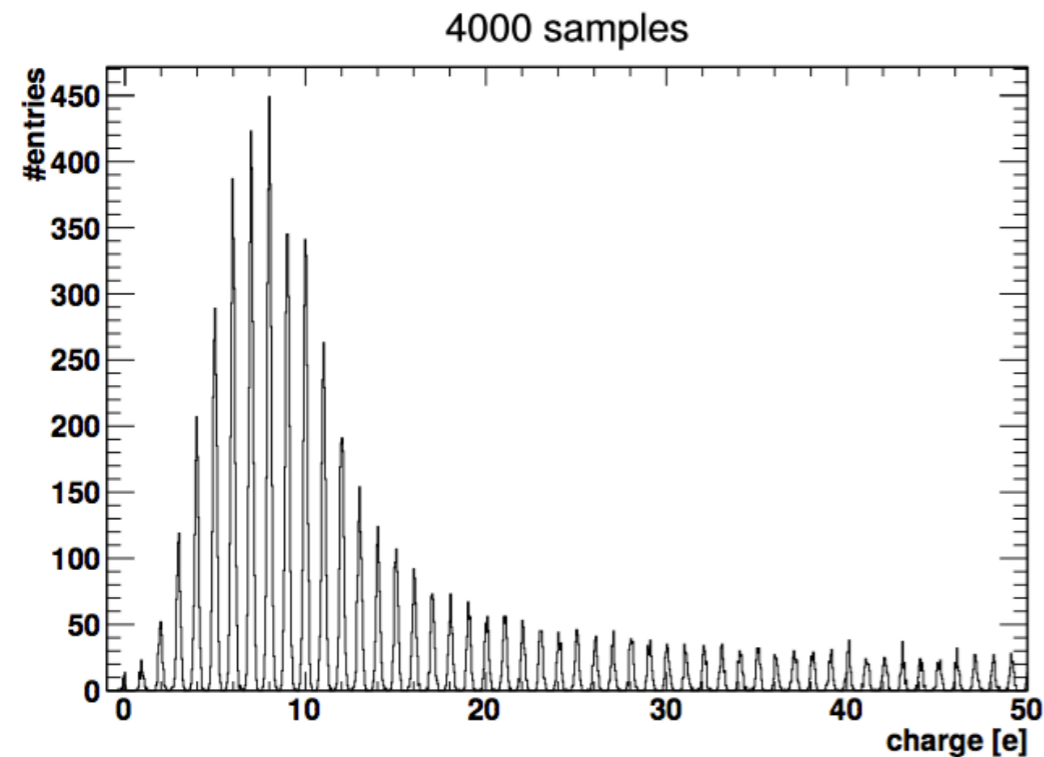


... 1550, 1551, 1552

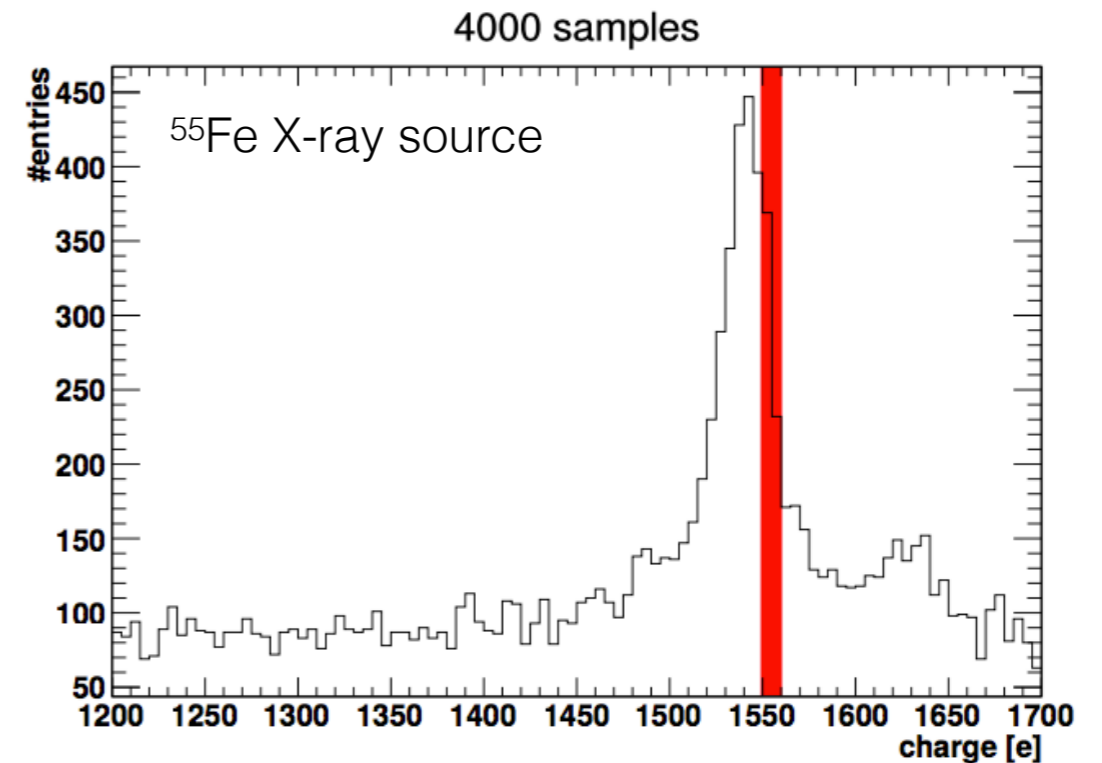


Nova tecnologia: Skipper-CCDs

► Contando elétrons... 48, 49, 50



... 1550, 1551, 1552



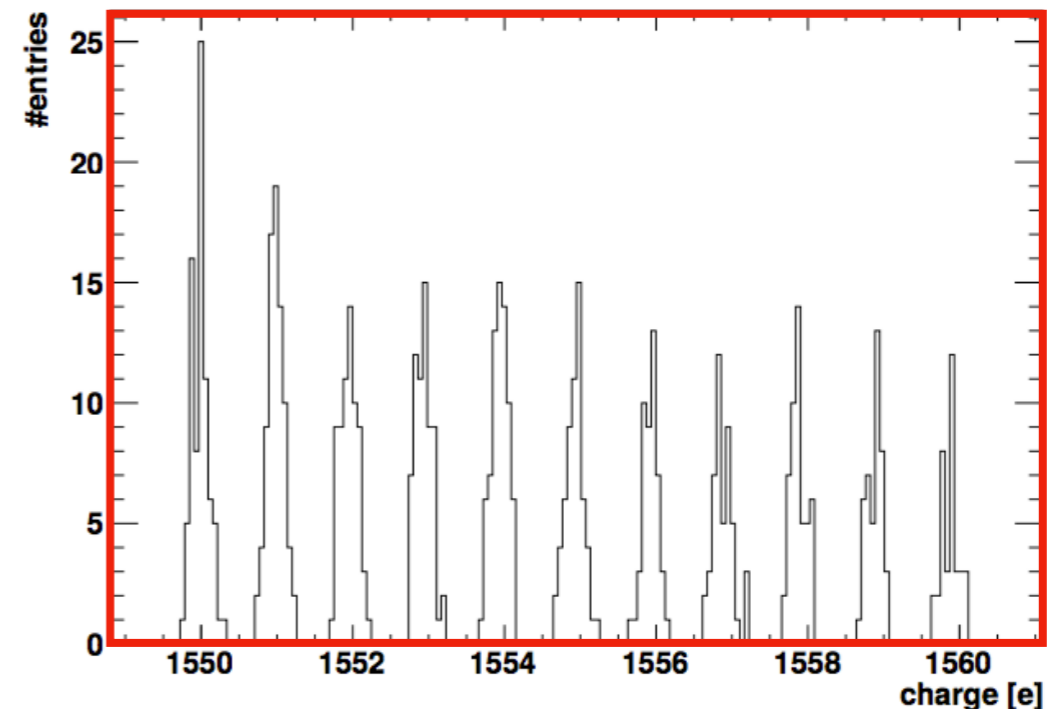
► Usadas no experimento SENSEI

- Objetivo: detectar interações de DM-e medindo a ionização produzida pelo recuo de elétrons

- Melhores limites mundiais para DM sub-GeV

[Phys.Rev.Lett. 122 \(2019\) 16, 161801](#)

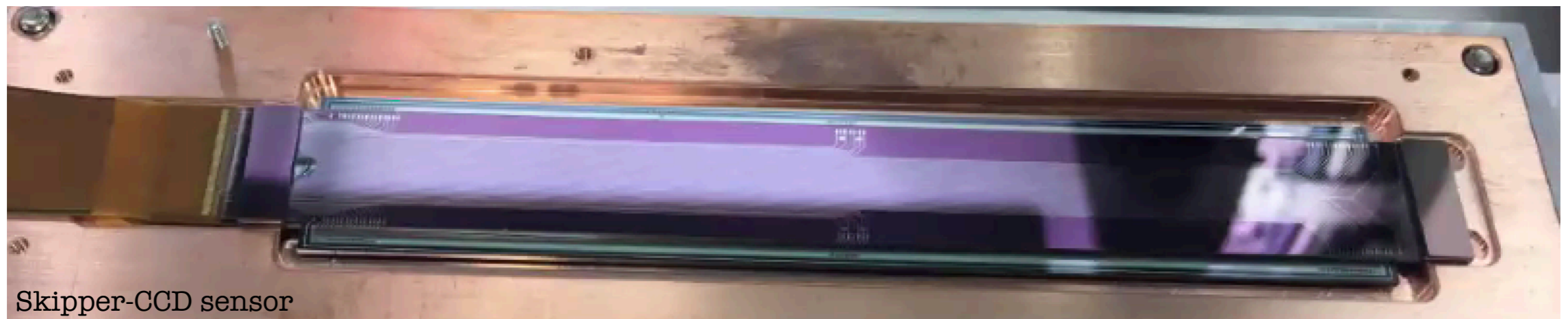
[Phys.Rev.Lett. 125 \(2020\) 17, 171802](#)



CONNIE - Upgrade



- Detecção de CEvNS com tecnologia de Skipper-CCDs
 - O ruído já não vai ser um problema
 - Mais sensível a sinais de baixa energia



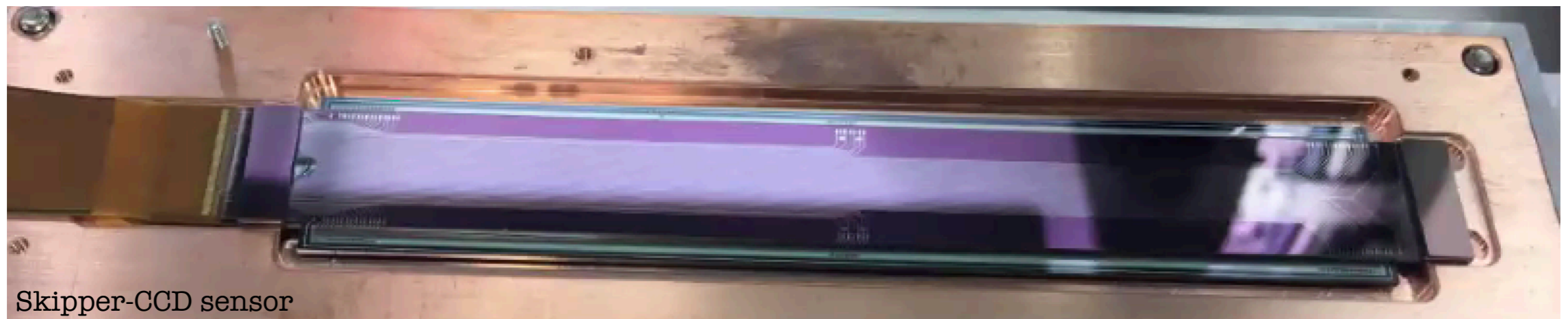
Skipper-CCD sensor

CONNIE - Upgrade



- 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!

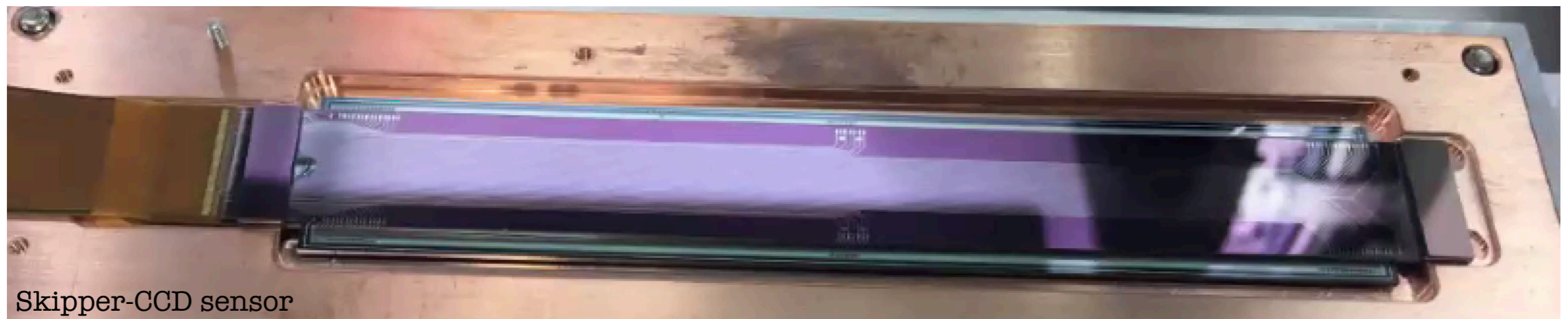


Skipper-CCD sensor

CONNIE - Upgrade



- 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



Skipper-CCD sensor

CONNIE - Upgrade



- Detecção de CEvNS com tecnologia de Skipper-CCDs

- ▶ O ruído já não vai ser um problema
- ▶ Mais sensível a sinais de baixa energia

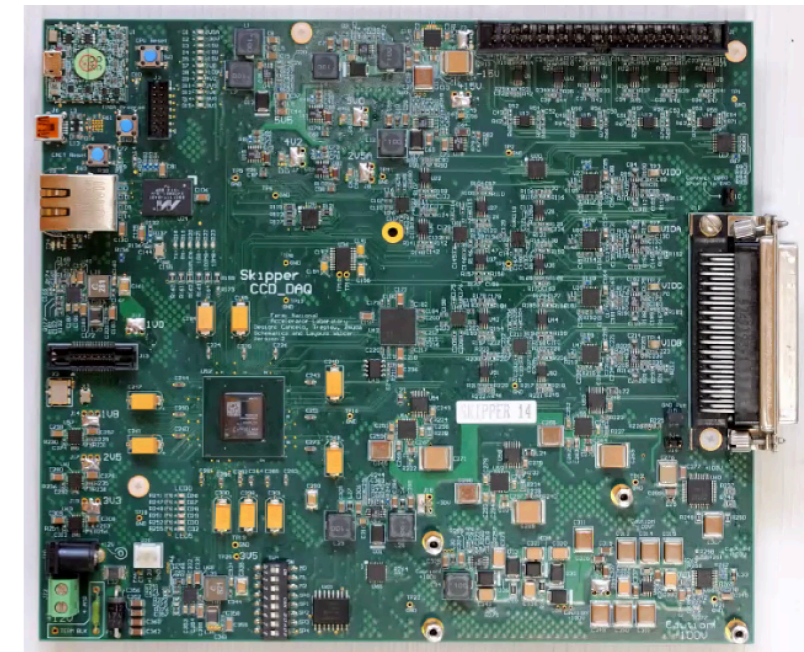
← ótimo e ao mesmo tempo um novo desafio!

- 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 ~ 4g (1k x 6k pixels, 675 μm)
- ▶ 4 CCDs Normais ~ 24g (4k x 4k pixels, 675 μm)
- ▶ Instalação de uma eletrônica de leitura (LTA)



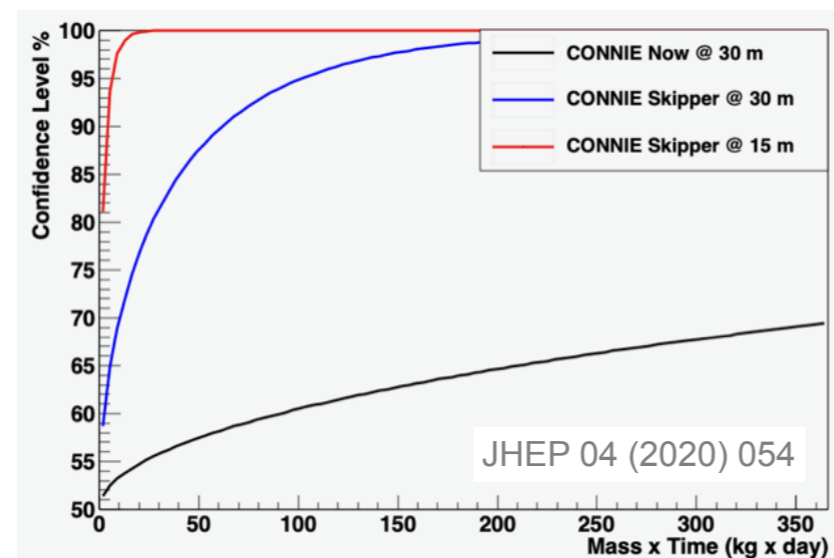
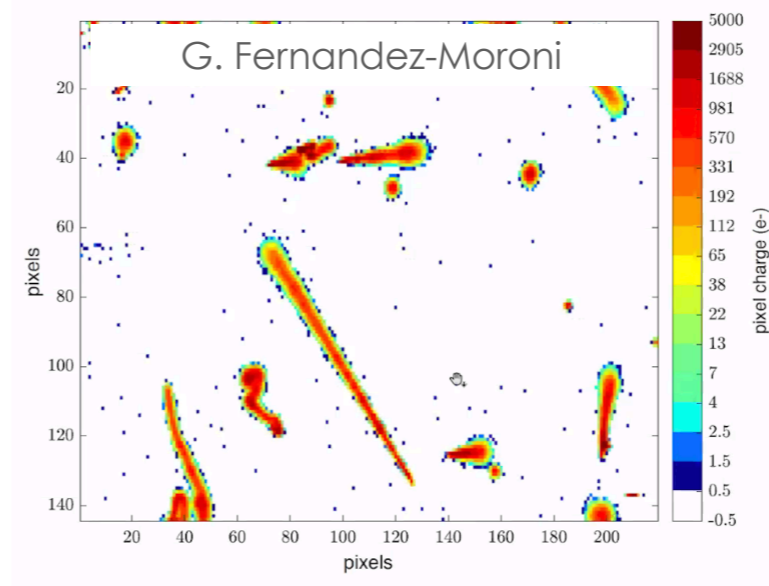
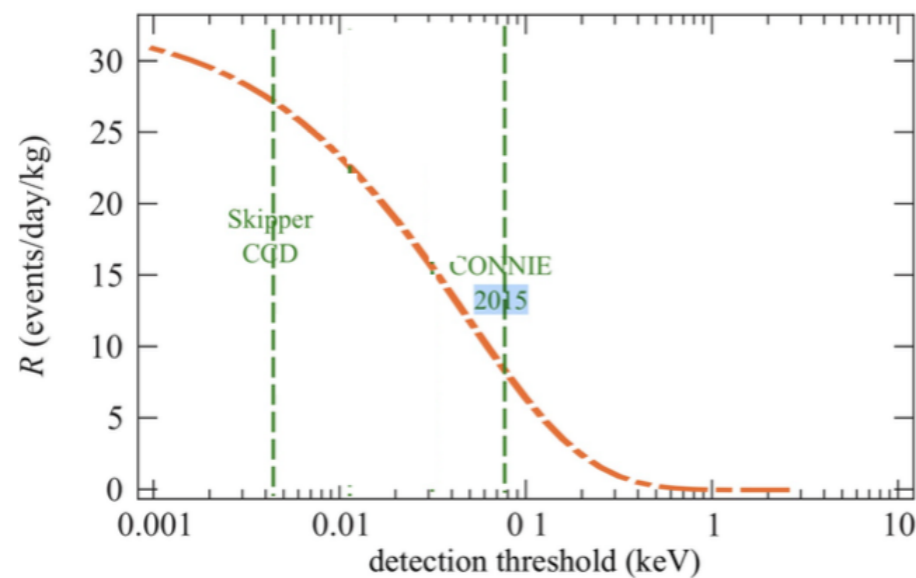
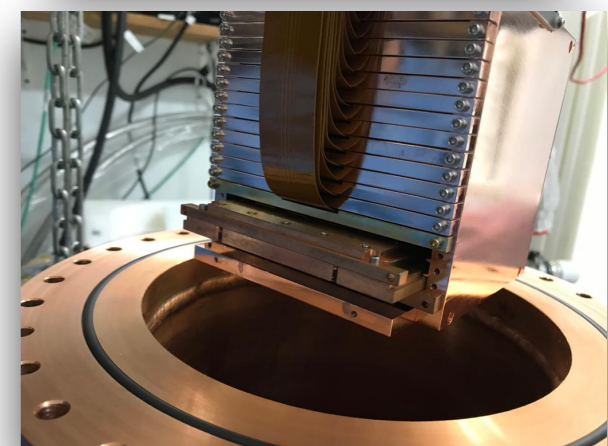
LTA - arXiv:2004.07599



Skipper-CCD sensor

CONNIE - Upgrade

- Em andamento
 - Experimento preparado para a instalação dos CCDs Skipper
 - Realizar medidas do detector ON-OFF em 2021
- Reduzir o limiar de detecção para ~ 15 eV
- Melhor entendimento do background
- Etapa intermediária para o desenho e construção da próxima geração de experimentos (VIOLETA)



Conclusões

Muitas coisas divertidas para fazer ;-)

e muitas oportunidades interessantes, especialmente para os estudantes

- A física de neutrinos de reator está tendo um crescimento importante e renovado, graças às novas tecnologias de baixo limiar de detecção.
 - ▶ Oferece oportunidades interessantes para estudar nova física além do Modelo Padrão.
- CONNIE é o experimento que possui atualmente o limiar mais baixo de detecção para a observação dos neutrinos de reator.
- A tecnologia de Skipper-CCDs está bem desenvolvida, o que permite utilizá-la em vários experimentos, tanto para a busca direta de matéria escura, quanto para a detecção de neutrinos de reator.
- Neste ano daremos um passo importante com o upgrade de CONNIE que visa baixar ainda mais seu limiar de detecção

Desafios nos desenvolvimentos experimentais, na análise dos dados,
e nas previsões e modelos teóricos

Conclusões

Muitas coisas divertidas para fazer ;-)
e muitas oportunidades interessantes, especialmente para os estudantes

- A física de neutrinos de reator está tendo um crescimento importante e renovado, graças às novas tecnologias de baixo limiar de detecção.
 - ▶ Oferece oportunidades interessantes para estudar nova física além do Modelo Padrão.
- CONNIE é o experimento que possui atualmente o limiar mais baixo de detecção para a observação dos neutrinos de reator.
- A tecnologia de Skipper-CCDs está bem desenvolvida, o que permite utilizá-la em vários experimentos, tanto para a busca direta de matéria escura, quanto para a detecção de neutrinos de reator.
- Neste ano daremos um passo importante com o upgrade de CONNIE que visa baixar ainda mais seu limiar de detecção

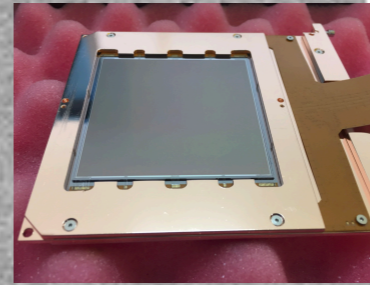
Desafios nos desenvolvimentos experimentais, na análise dos dados,
e nas previsões e modelos teóricos

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



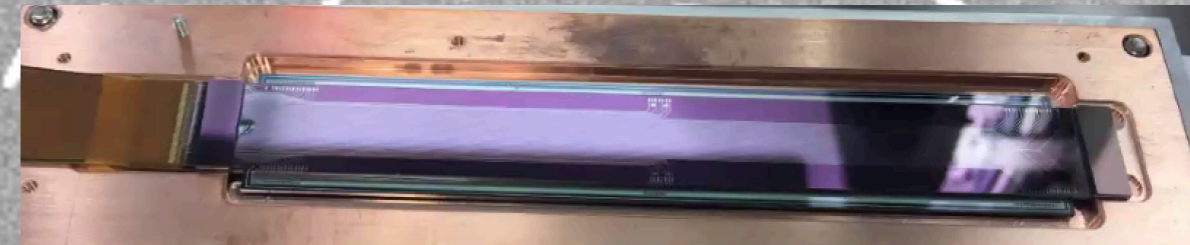
Angra

CONNIE



CCD 4k x 4k

Skipper - CCD 1k x 6k



Experiência em experimentos de neutrinos em reatores e formação de novos especialistas no Brasil

OBRIGADA !!

