

Buscando CEvNS de antineutrinos de reactores con el experimento CONNIE



Alexis A. Aguilar Arévalo
ICN-UNAM
por la CONNIE Collaboration



*XXVII Reunión Anual de la División de Partículas y Campos, SMF,
14 de Junio 2023, CINEVESTAV, Zacatenco, CDMX*

Con apoyo de DGAPA-UNAM proyectos PAPIIT-IN106322 y PAPIIT-IN104723.

Outline

- 1) Motivación de CONNIE
- 2) Resultados con CCD estándar
- 3) CONNIE con Skipper-CCD
- 4) Perspectivas a futuro
- 5) Resumen

Motivation de CONNIE

- La meta de CONNIE es **detectar la dispersión elástica de neutrinos con núcleos (CEvNS)** en Si a las energías de neutrinos de reactores (<10 MeV), y usar este canal para **buscar física más allá del Modelo Estándar**.
- Utiliza CCD de calidad científica desarrolladas en el LBNL Microsystems Lab (originalmente para DECam y DESI). También usadas en el experimento DAMIC (Dark Matter In CCDs).

Colaboración CONNIE

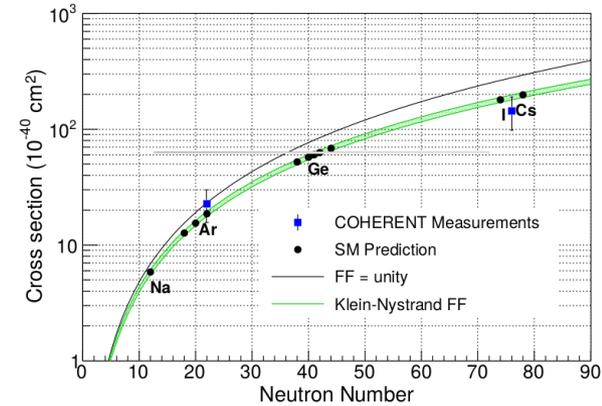
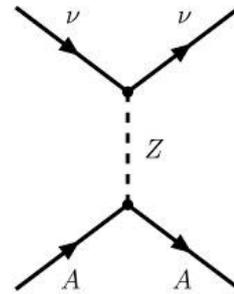
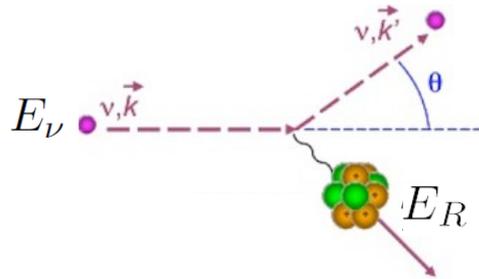


Centro Atómico Bariloche, Universidad de Buenos Aires, Universidad del Sur / CONICET, Universidad Nacional de San Martín, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, CEFET – Angra, Universidade Federal do ABC, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Nacional de Asunción, University of Zurich, Fermilab

14 instituciones, 6 países ~30 personas

CE ν NS: “Coherent Elastic ν -N Scattering”

Interacción de corriente neutra donde un neutrino de cualquier sabor se dispersa de un núcleo como un todo.



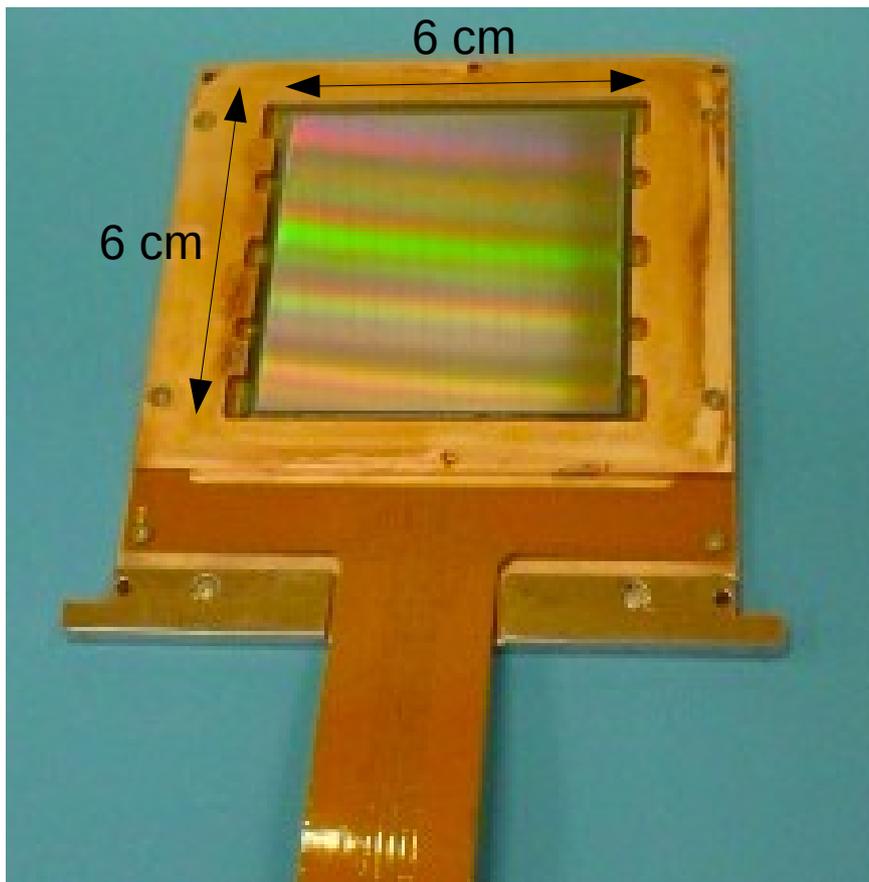
Carga nuclear débil $Q_W^2 \sim N^2$

$$\frac{d\sigma_{SM}}{dE_R}(E_{\bar{\nu}_e}) = \frac{G_F^2}{4\pi} \left[N - (1 - 4 \sin^2 \theta_W) Z \right]^2 \left(1 - \frac{ME_R}{2E_{\bar{\nu}_e}^2} - \frac{E_R}{E_{\bar{\nu}_e}} + \frac{E_R^2}{2E_{\bar{\nu}_e}^2} \right) MF^2(q)$$

Observada por 1^a vez por la colaboración COHERENT con neutrinos de $E \sim 16-53$ MeV con detectores de CsI (Science 357, 1123, 2017), y de Ar líquido (PRL, 126, 012002, 2021).

Su estudio a energías más bajas (Reactores) podrían indicar la existencia de física BSM.

CCD (estándar) de CONNIE



Tamaño de pixel: $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$

de pixeles: 4000×4000

Grosor CCD: $675 \mu\text{m}$

Masa CCD: 5.95 gram

Temp operación: $< 100 \text{ K}$

Ruido de lectura ~ 2.0 electrons RMS

Umbral de energía $< 50 \text{ eV}_{\text{ee}}$

Manufacturadas con Si de muy alta resistividad:

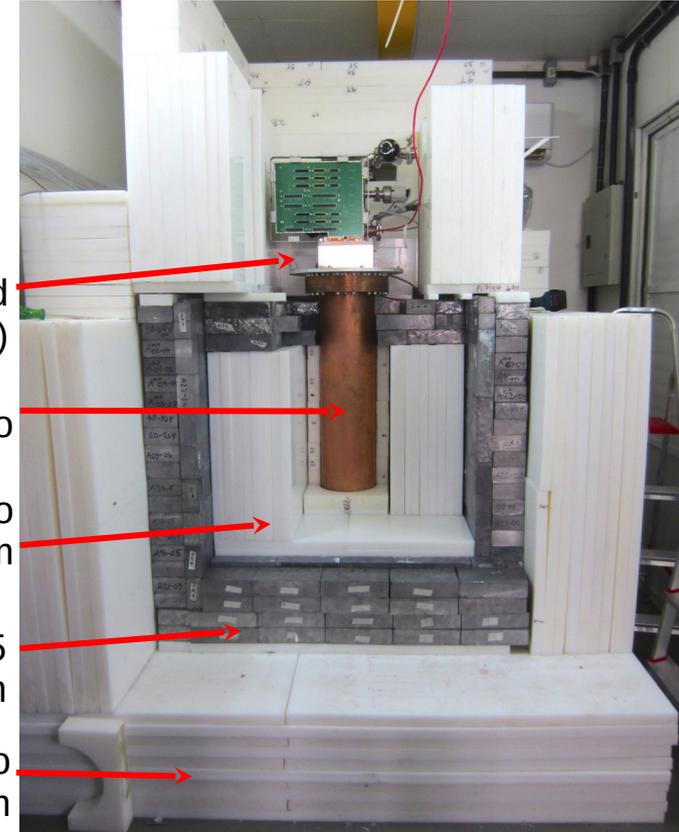
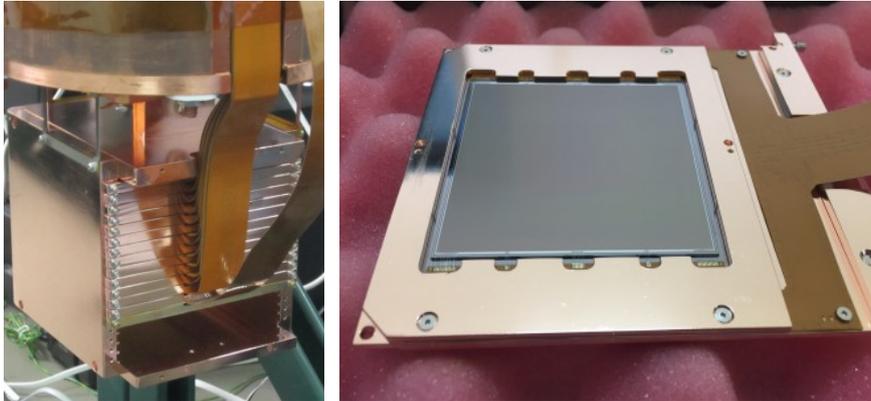
- bajo nivel de radioactividad
- baja corriente oscura ($\sim 0.1 \text{ e}^- / \text{pix} / \text{day}$)
- despreciable número de defectos de red.

El detector de CONNIE

Instalado en 2014 y mejorado en 2016

- 14 CCDs instaladas (5.95 g c/u)
- 2 desconectadas por problemas desde el inicio
- 8 CCD seleccionadas para análisis de física (buen ruido, eficiencia de transf. Carga & estabilidad).

4k × 4k pixeles, 15 μm × 15 μm, grosor 675 μm



VIB readout board
(signal transport)

Dewar al vacío

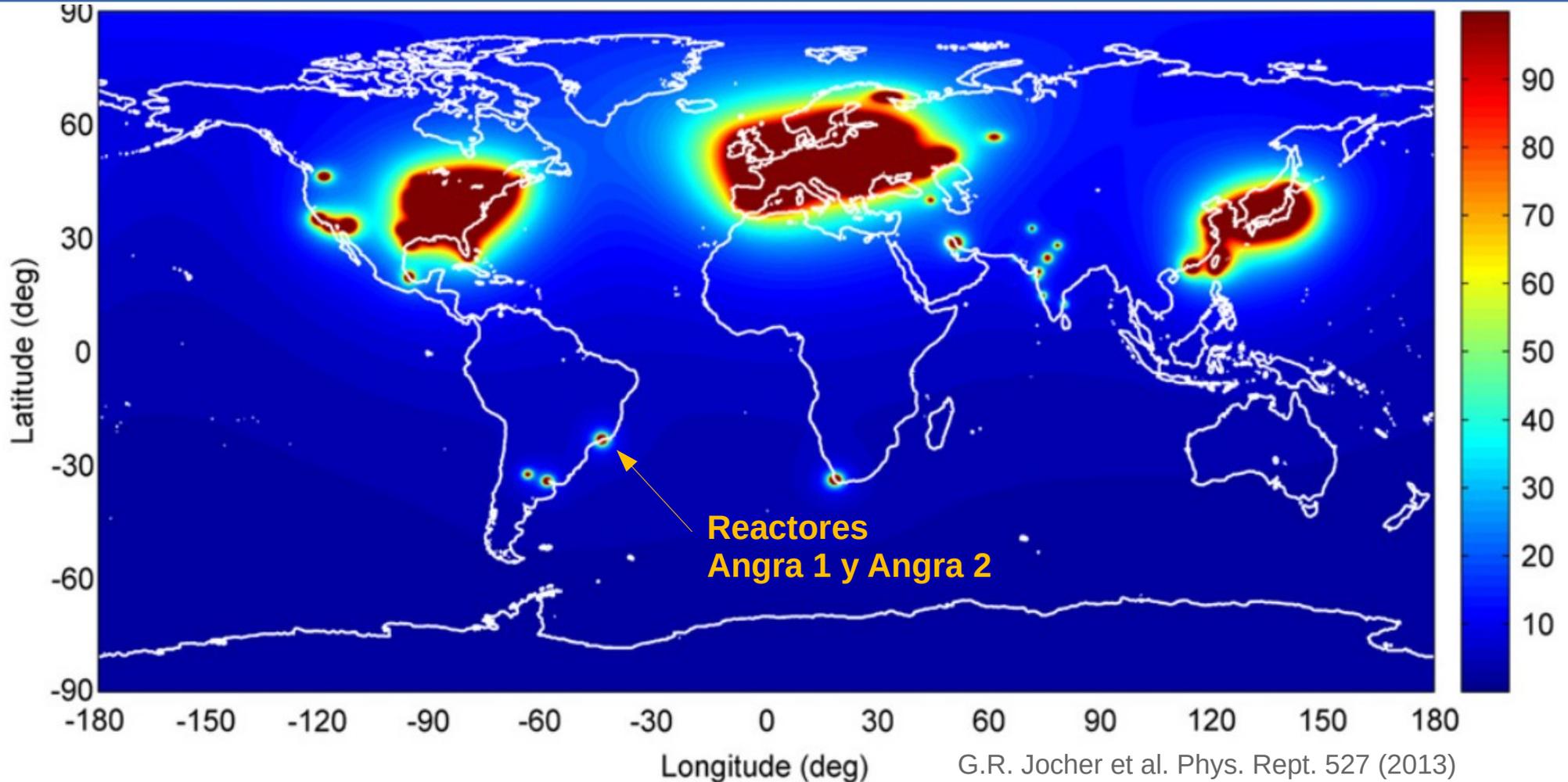
Polietileno interno
(neutrones) 30 cm

Plomo (gammas) 15
cm

Polietileno externo
(neutrones) 30 cm

JINST 11 (2016) P07024

Antineutrinos de reactores nucleares



Planta nuclear de Angra dos Reis

CONNIE está ubicado a un costado de, reactor Angra 2 en la planta nuclear Almirante Álvaro Alberto, cerca de Rio de Janeiro, Brazil.



CONNIE en el reactor Angra-2



CONNIE

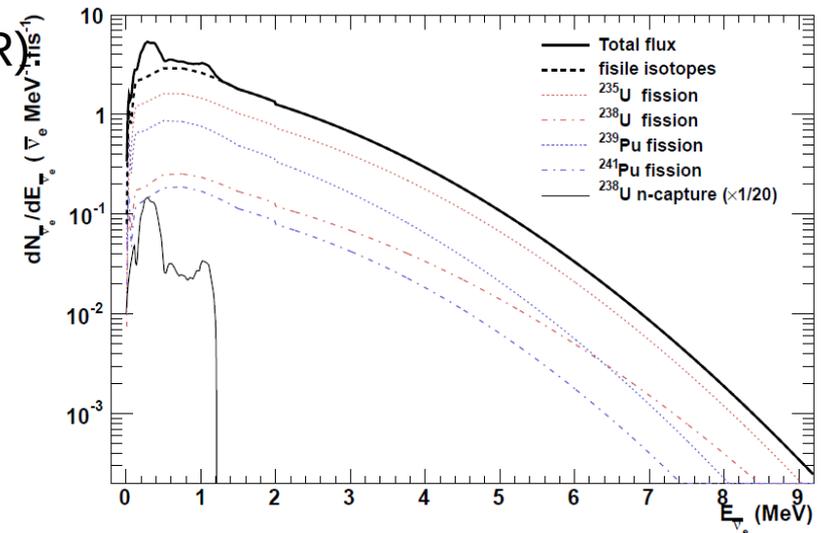
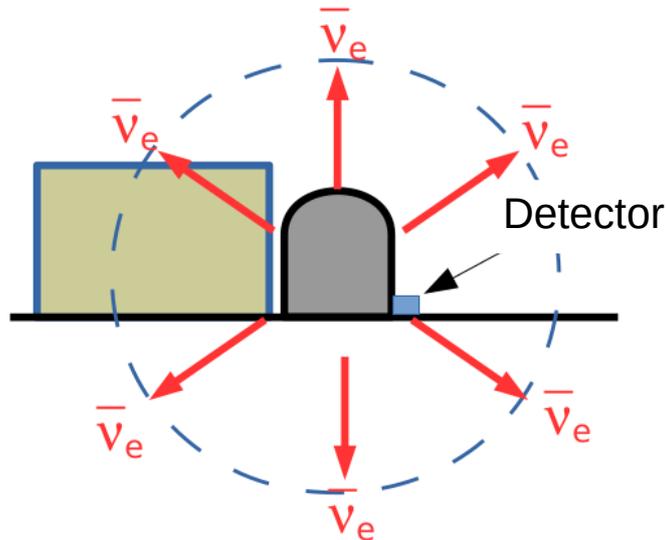


En contenedor estándar para el "Angra Neutrinos Project"

CONNIE en el reactor Angra-2

- Angra-2: 3.95 GW_{th} Reactor de agua presurizada (PWR)
- Emite $\sim 8.7 \times 10^{20} \bar{\nu}_e \text{s}^{-1}$ ($2.23 \times 10^{20} \bar{\nu}_e \text{s}^{-1} \text{GW}_{\text{th}}^{-1}$).
- Flujo $\sim 7.8 \times 10^{12} \bar{\nu}_e \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 30 m del núcleo.

$$\text{fisRate} = \frac{3.95 \text{ GW}_{\text{th}}}{205.24 \text{ MeV/fis}} \approx 1.2 \times 10^{20} \text{ fis/s}$$



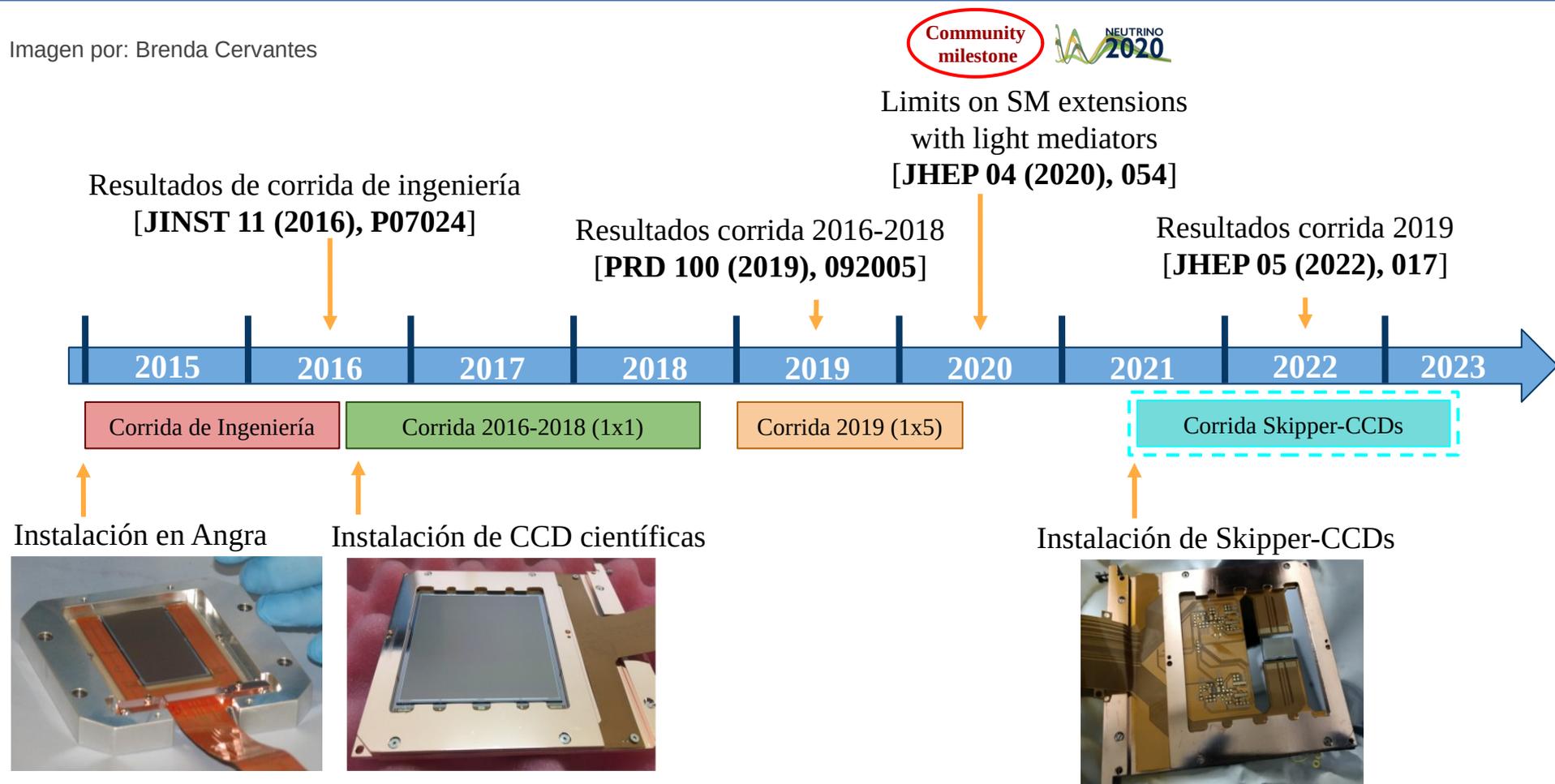
Dominant processes	(E release)	fis.frac.	$\bar{\nu}_e/\text{proc}$	$\bar{\nu}_e/\text{fis}$
^{235}U fission	202 MeV	0.56	6.14	3.43
^{238}U fission	205 MeV	0.08	7.08	0.56
^{239}Pu fission	210 MeV	0.30	5.58	1.67
^{241}Pu fission	212 MeV	0.06	6.42	0.38
n-capture on ^{238}U	202 MeV	0.60	2.00	1.20

$\langle E \text{ rel} \rangle = 205.24 \text{ MeV/fis}$

Tot: 7.24

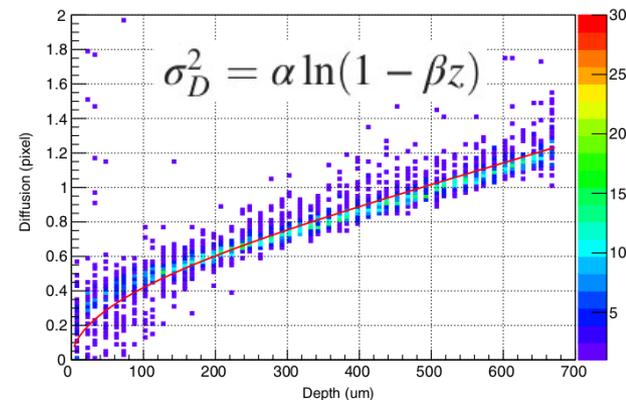
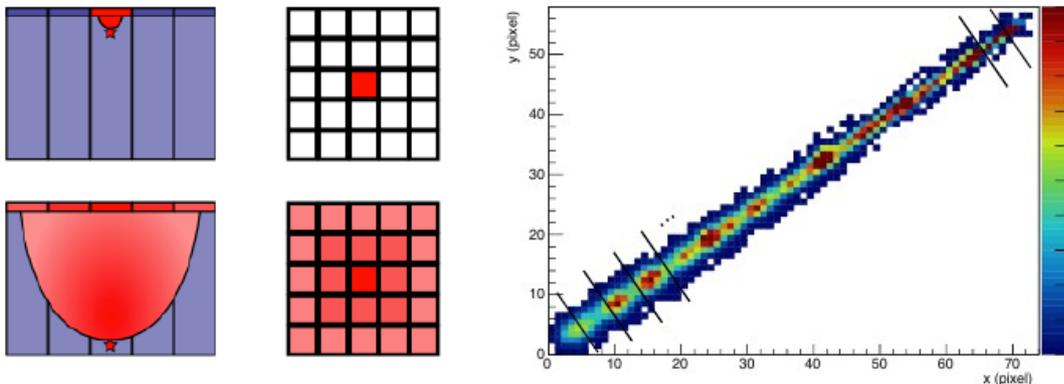
Línea de tiempo de CONNIE

Imagen por: Brenda Cervantes



Profundidad y selección de eventos de baja E

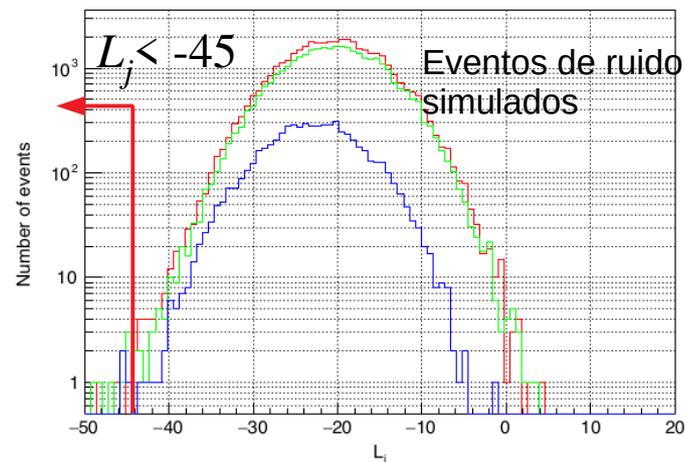
- Trazas de muones usadas para caracterizar relación profundidad/tamaño.



- Selección de eventos de baja-E basada en prueba de verosimilitud doble los N pixeles de cada evento "j":

$$L_j(P_1, \dots, P_N | \sigma) = \sum_{i=1}^N (-1)^{n_i} \left(\frac{P_i^2}{2\sigma^2} + \log(\sqrt{2\pi}\sigma) \right)$$

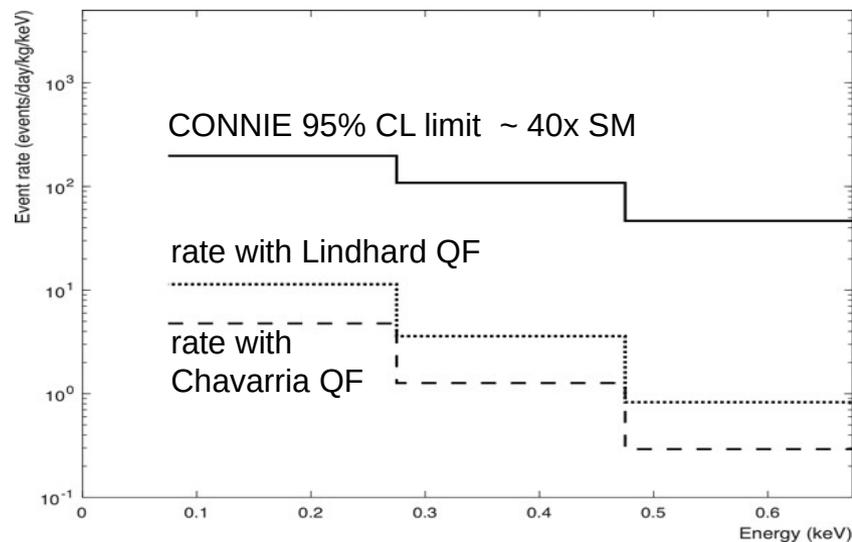
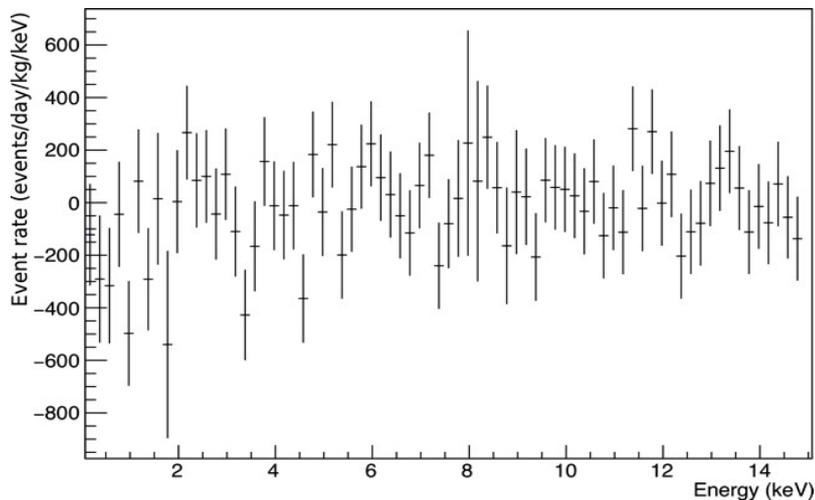
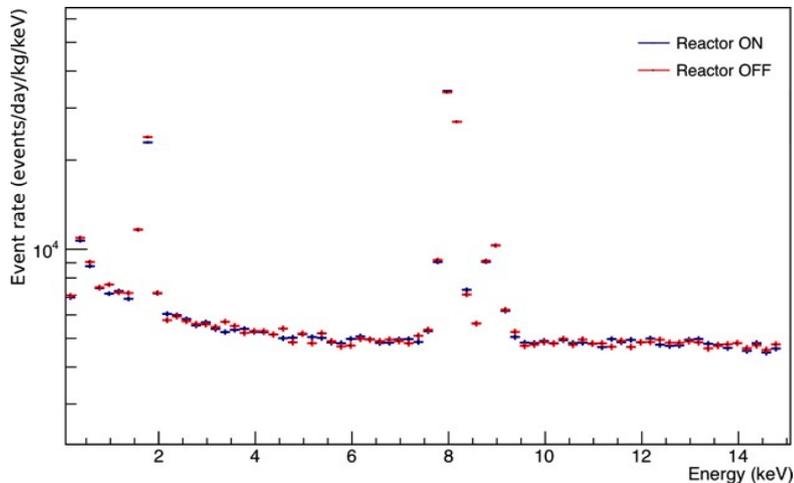
- Eventos tipo neutrino: $L_j < -45$



Resultados 2016–2018

Phys. Rev. D 100 (2019) 092005

- Corrida 2016-18 con masa activa de 47.6 g.
- Espectro de energías con **reactor on** (2.1 kg-día) vs datos con **reactor off** (1.6 kg-day).
- Se extrae un **límite superior** para la tasa de eventos CE ν NS. Comparación con tasa esperada y dependiendo del quenching factor.



Constricciones a física más allá del ME

- Tasa de eventos en bin de más baja E prove límites en interacciones no estándar de ν 's

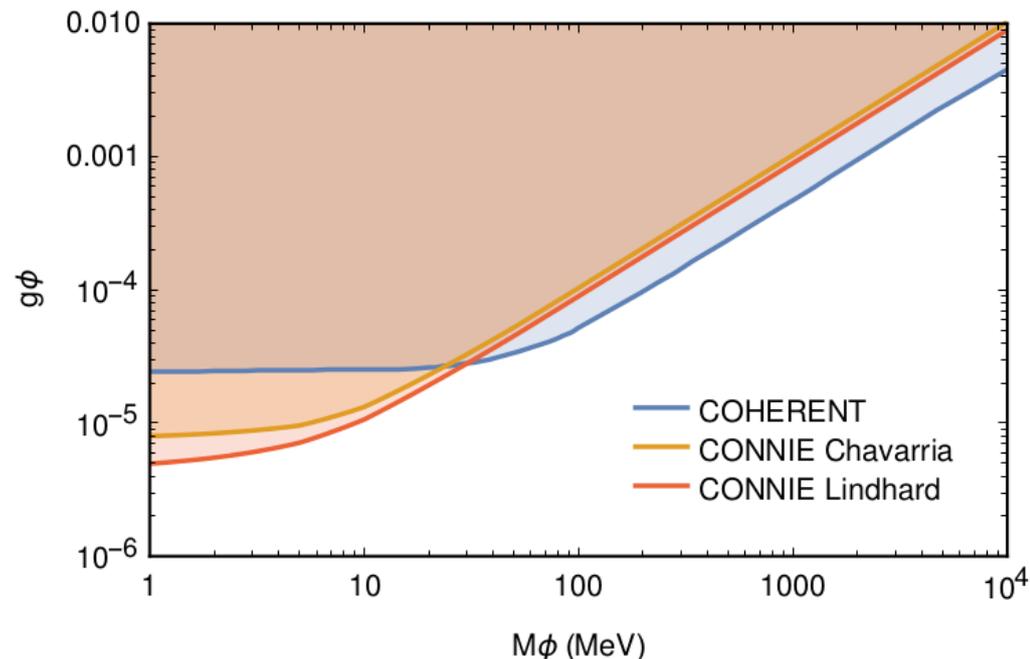
Modelo simplificado con mediador **escalar** (ϕ) liviano

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

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

- Límites restrictivos para bajas masas del mediador $M_\phi < 30$ MeV.
- Primera restricción competitiva a física BSM con CEvNS en reactores!
- Mejor límite actualmente por el experimento CONUS [JHEP, 085, 05, 2022]

Community
milestone



JHEP 04 (2020), 054

Constricciones a física más allá del ME

- Tasa de eventos en bin de más baja E prove límites en interacciones no estándar de ν 's:

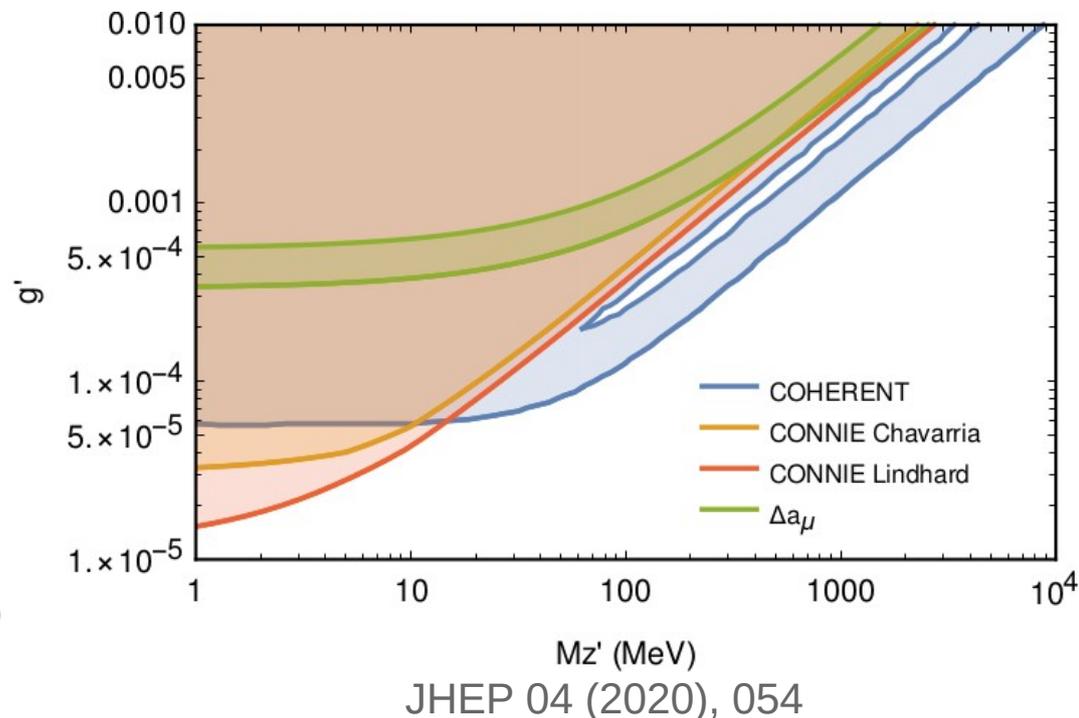
Modelo simplificado con mediador **vectorial** (Z') liviano

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

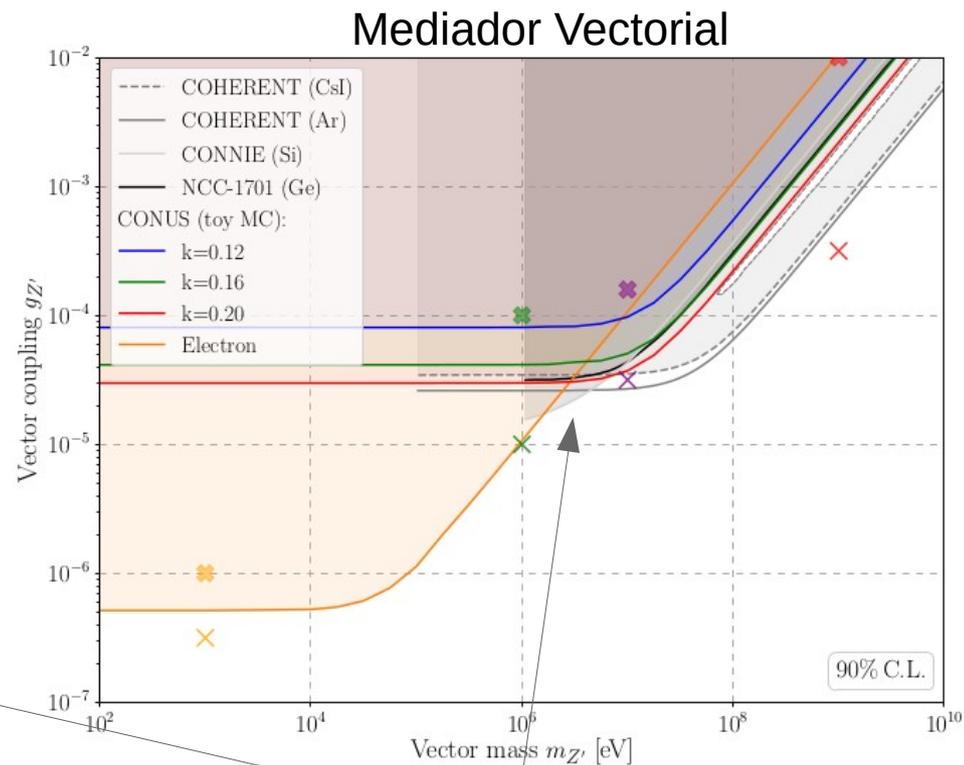
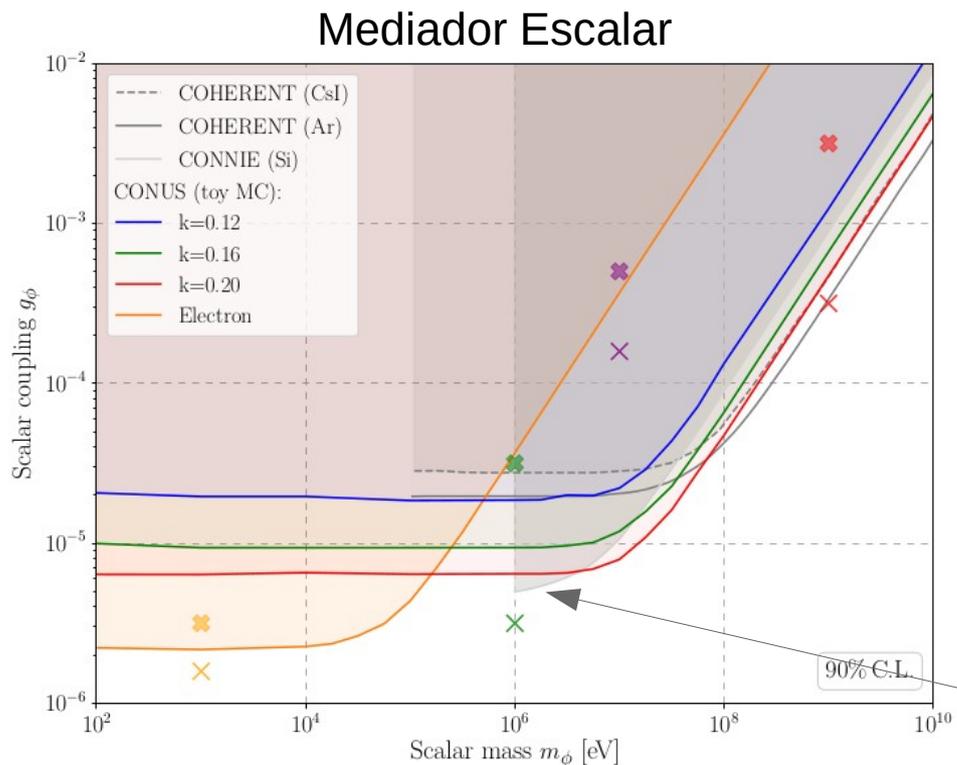
$$Q_{Z'} = \frac{3(N+Z)g'^2}{\sqrt{2}G_F(2ME_R + M_{Z'}^2)}$$

- Límites restrictivos para bajas masas del mediador $M_{Z'} < 10$ MeV.
- Primera restricción competitiva a física BSM con CEvNS en reactores!
- Mejor límite actualmente por el experimento CONUS [JHEP, 085, 05, 2022]

Community
milestone



Constricciones a física más allá del ME



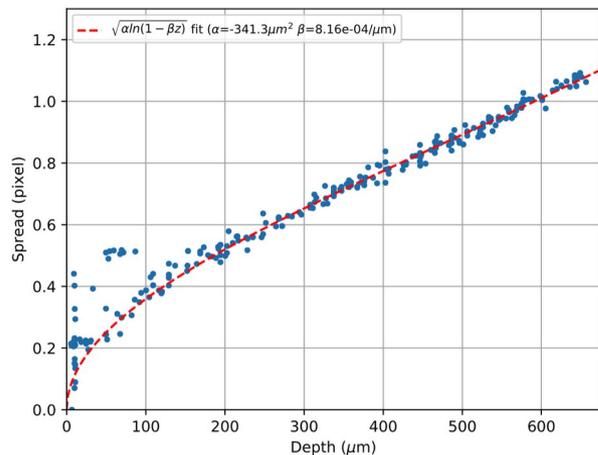
CONUS Collab. JHEP, 085, 05, 2022

CONNIE aún mejor en esta región

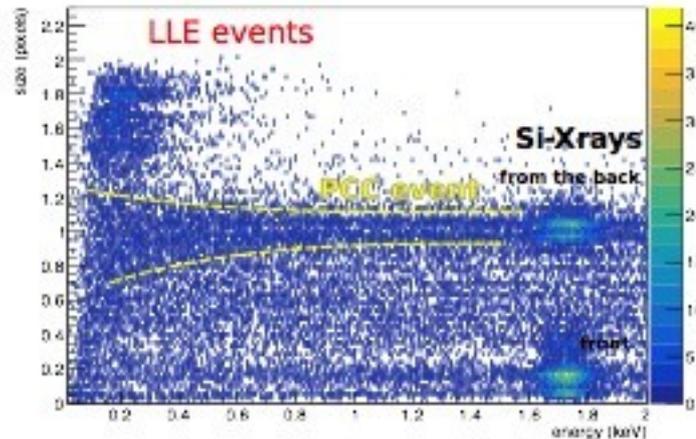
Corrida de 2019

Mejoras en la adquisición de datos y técnicas de análisis:

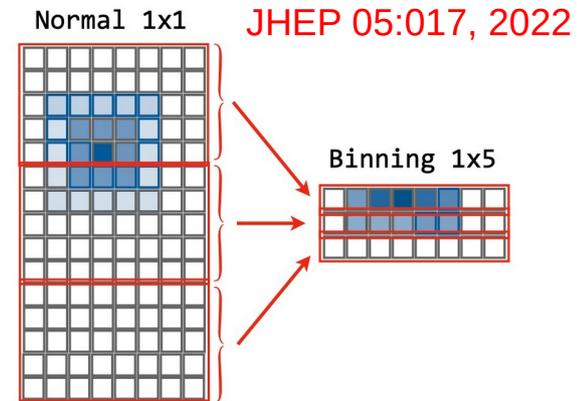
- **1x5 pixel hardware rebinning** reduce el ruido de lectura.
- Mejoras en calibración de energía y relación profundidad/tamaño.
- **Caracterización y reducción** del background de bajas energías
 - Large low-energy events (LLE);
 - Capa de recolección parcial de carga (PCC).
- Análisis a ciegas y múltiples chequeos.



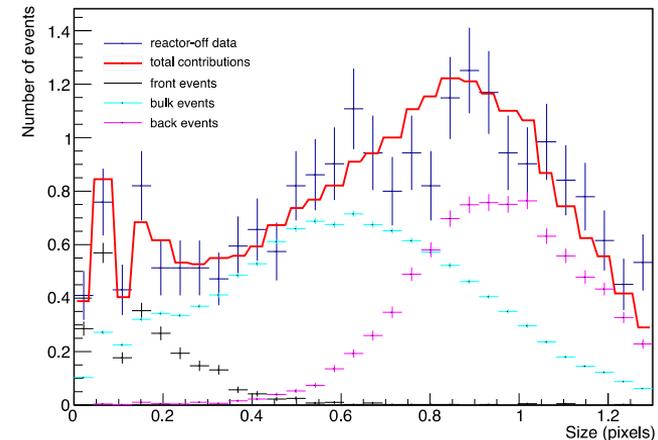
Calibración tamaño-prof con muones



LLE de las colas de altas energías y volumen inactivo son excluidos.



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



Capa de recolección parcial de carga en la parte trasera del sensor.

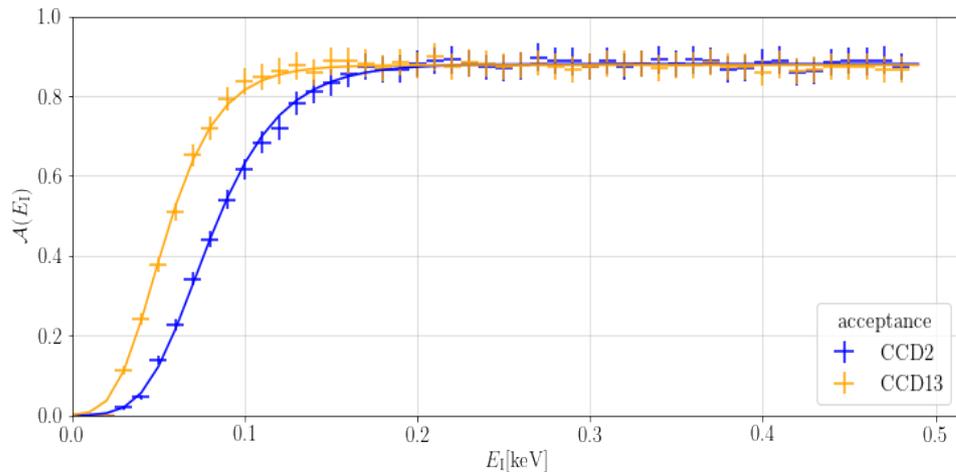
Corrida de 2019

Mejoras en la adquisición de datos y técnicas de análisis:

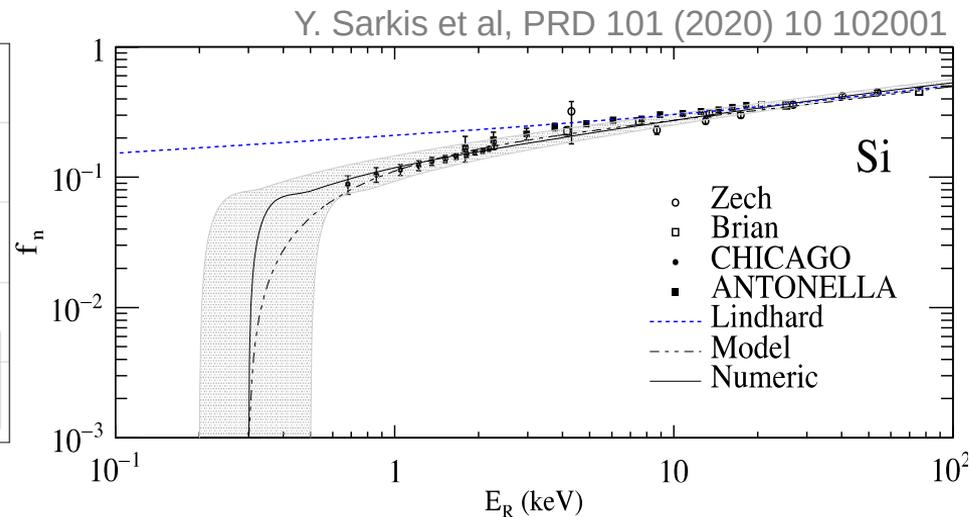
- Aceptancia y eficiencia de selección a bajas E mejoradas.
- **Umbral de detección** reducido a ~ 45 eV.
- Máxima eficiencia alcanzada a 100-150 eV.

JHEP 05:017, 2022

Nuevo **modelo del quenching factor** de Sarkis **para la eficiencia de ionización** a bajas E.



Aceptancia para la más y menos eficiente CCD



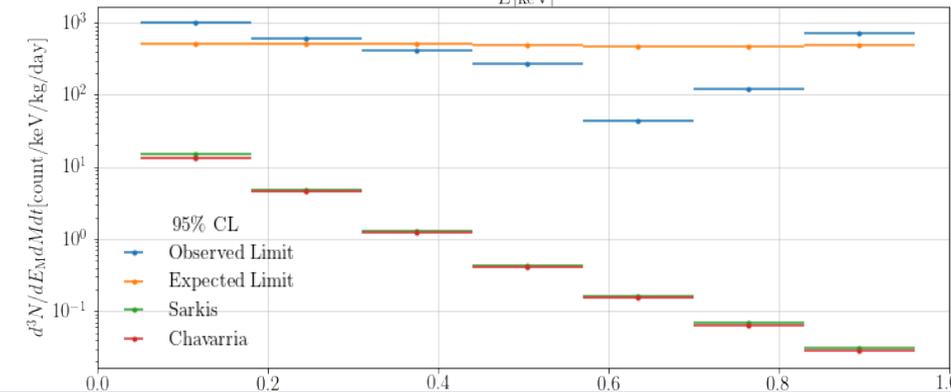
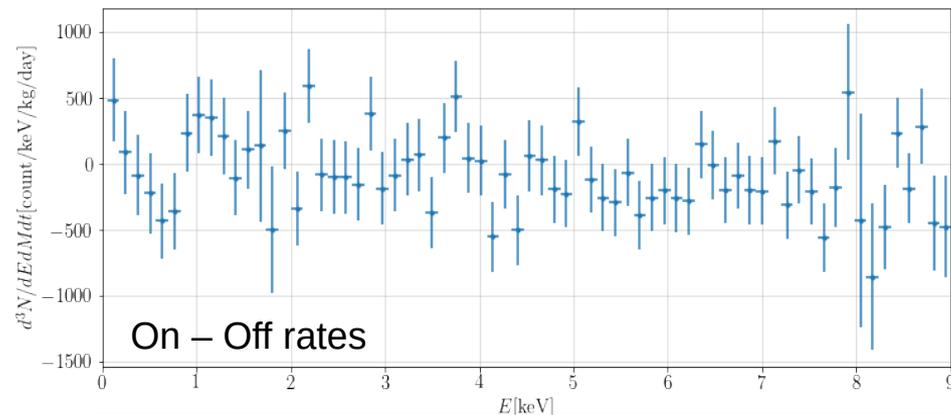
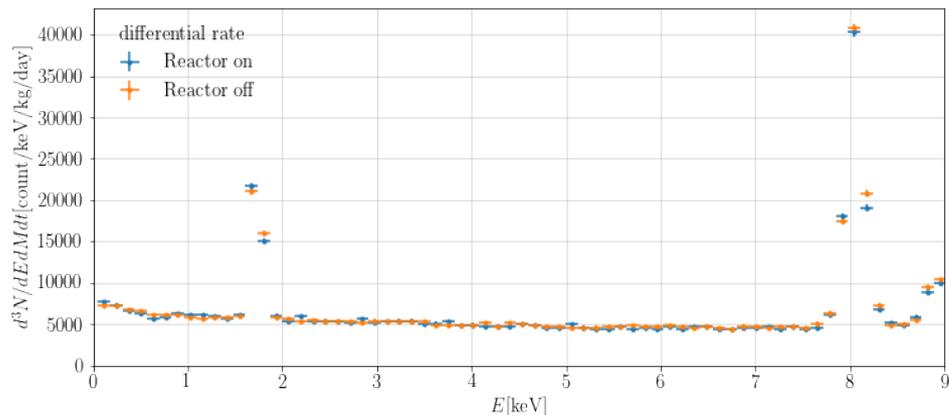
Modelo de Sarkis para el quenching factor en Si

Resultados corrida de 2019

Mejoras en la adquisición de datos y técnicas de análisis.

JHEP 05:017, 2022

- Espectro de energía de 8 CCDs con masa total activa de 44.48 g.
- Exposiciones de 31.85 días (reactor on) y 28.25 días (reactor off). Exposición total: 2.7 kg-día.



Límites superiores al 90% CL en la tasa de interacciones CEvNS. Bin de más baja Energía:

- Límite **esperado** es 34-39 veces la predicción.
- Límite **observado** es 66-75 veces la predicción.

Búsqueda de partículas milicargadas

- Partículas milicargadas relativistas (χ_q), predichas en extens. del ME con sectores ocultos

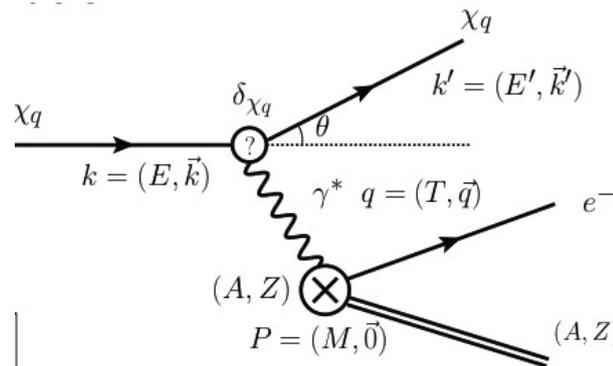
Producción: Dispersión tipo Compton de rayos γ de alta energía de reactores.



Espectro de γ 's da el flujo diferenc. de χ_q :

$$\frac{d\phi_{\chi_q}}{dE_{\chi_q}} = \frac{2}{4\pi R^2} \int \frac{1}{\sigma_{\text{tot}}} \frac{d\sigma}{dE_{\chi_q}} \frac{dN_{\gamma}}{dE_{\gamma}} dE_{\gamma}$$

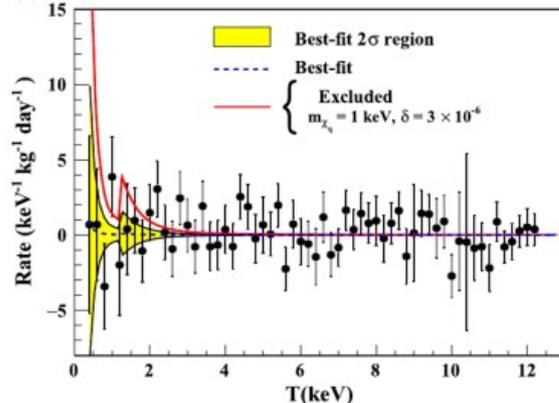
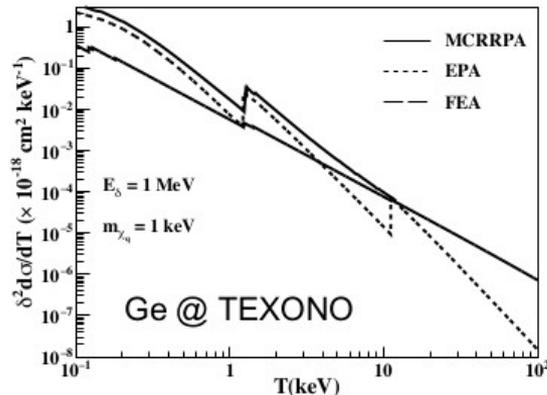
Detección: Ionización atómica (canal-t).



Tasa de conteo diferencial esperada en el detector:

$$\frac{dR}{dT} = \rho_A \int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \left[\frac{d\sigma}{dT} \right] \left[\frac{d\phi_{\chi_q}}{dE_{\chi_q}} \right] dE_{\chi_q}$$

Varios modelos de la sección eficaz de interacción.

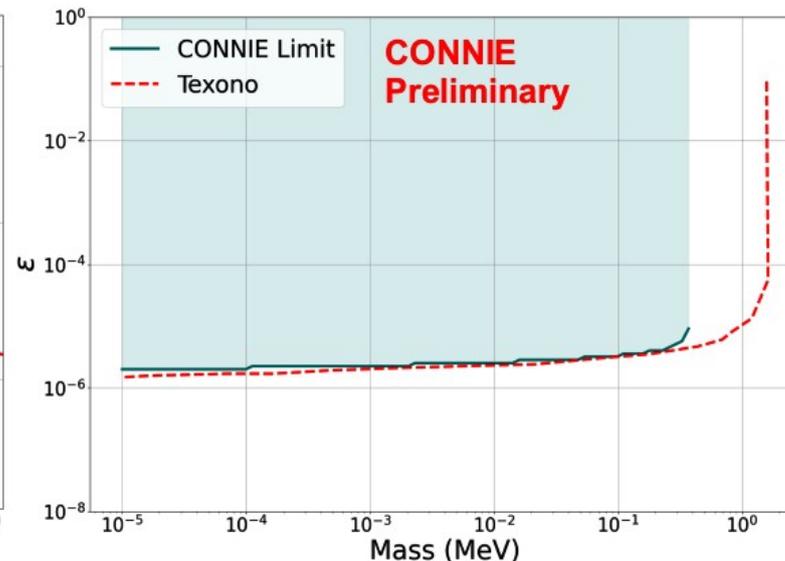
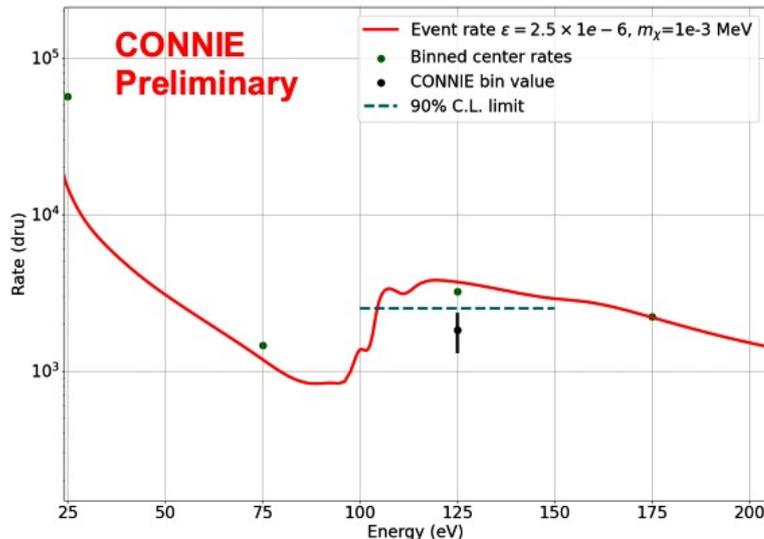
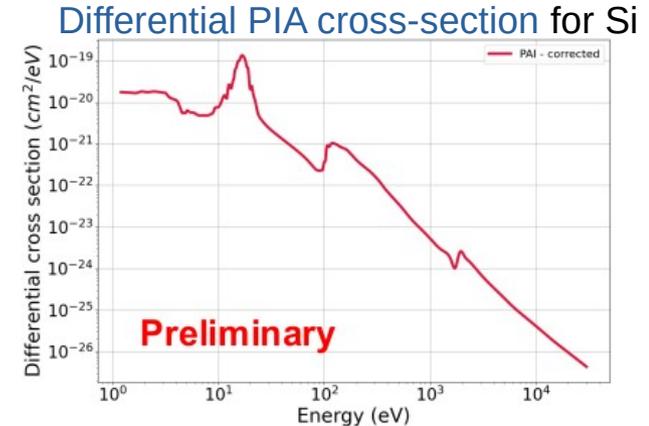


- Espectro On-Off puede dar **limites** en producción de χ_q en reactores.
- Nuevo (preliminar)** Búsqueda de χ_q en los datos de baja E de CONNIE.

TEXONO collab., PRD 99, 032009 (2019)

Búsqueda de partículas milicargadas

- Interacción con silicio del modelo de Ionización por Foto-Absorción (PIA – Photo Absortion Ionization).
- Límite del 90% CL en la producción de χ_q en reactores se extrae, para cada masa y acoplamiento, usando el bin de 100-150 eV en los datos de 2019.
- Comparable a TEXONO. Se actualizará con más datos.

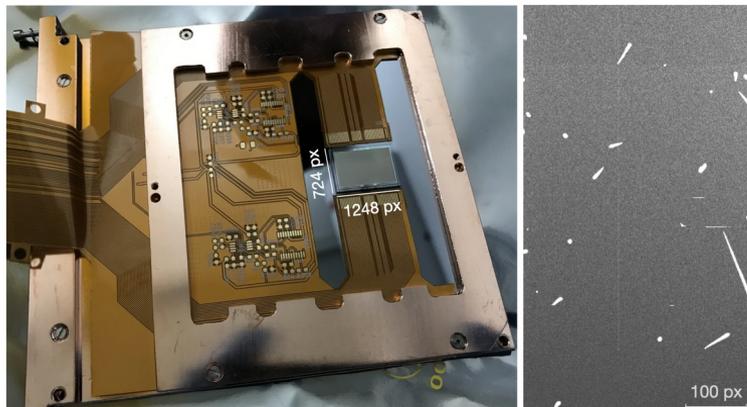


Plots by
Santiago Pérez &
Darío Rodríguez

CONNIE con Skipper-CCD's

Dos Skipper CCDs instaladas en el crióstato de CONNIE en julio de 2021.

- 0.5k x 1k pixeles c/u, grosor de 675 μm , ~ 0.5 g de masa total.
- Nueva electrónica de lectura LTA “*Low Threshold Acquisition*”.
- Nueva interfaz de vacío (VIB - “Vacuum Interface Board”).



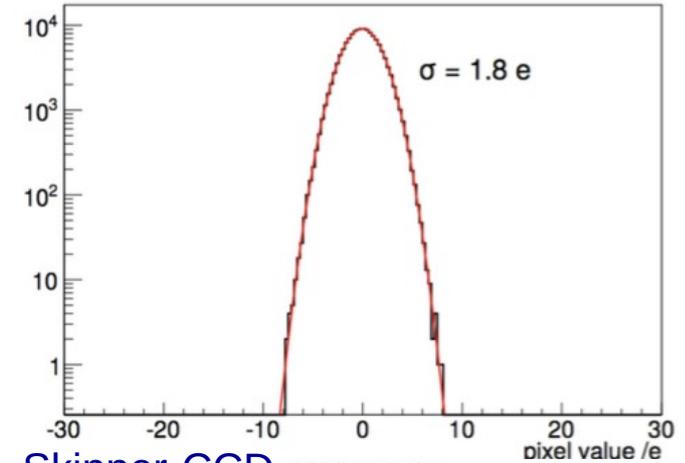
Electrónica LTA



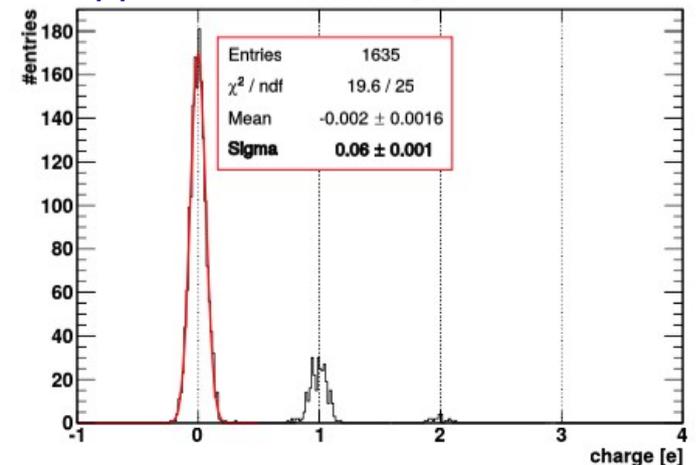
Skipper CCD

- Idénticas a CCDs convencionales en cuanto a:
 - substrato, estructura de compuertas, channel stops.***Diferente etapa de lectura.***
- Circuito de lectura modificado para permitir:
 - Medición no destructiva y repetida de la carga.
 - Reducción en el ruido electrónico.
 - Conteo de electrones de ionización individuales.
- Tecnología prometedora para experimentos de MO y neutrinos, y otras aplicaciones:
 - Experimentos OSCURA, SENSEI, DAMIC-M...
 - Óptica cuántica, astronomía, física nuclear.

Estándar



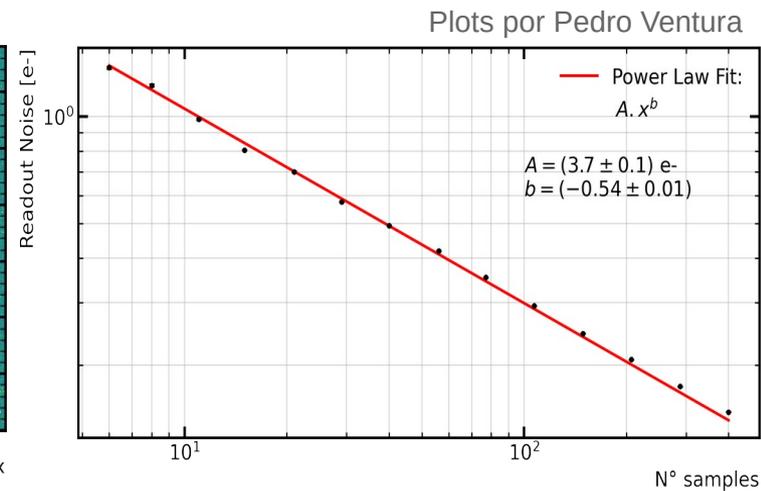
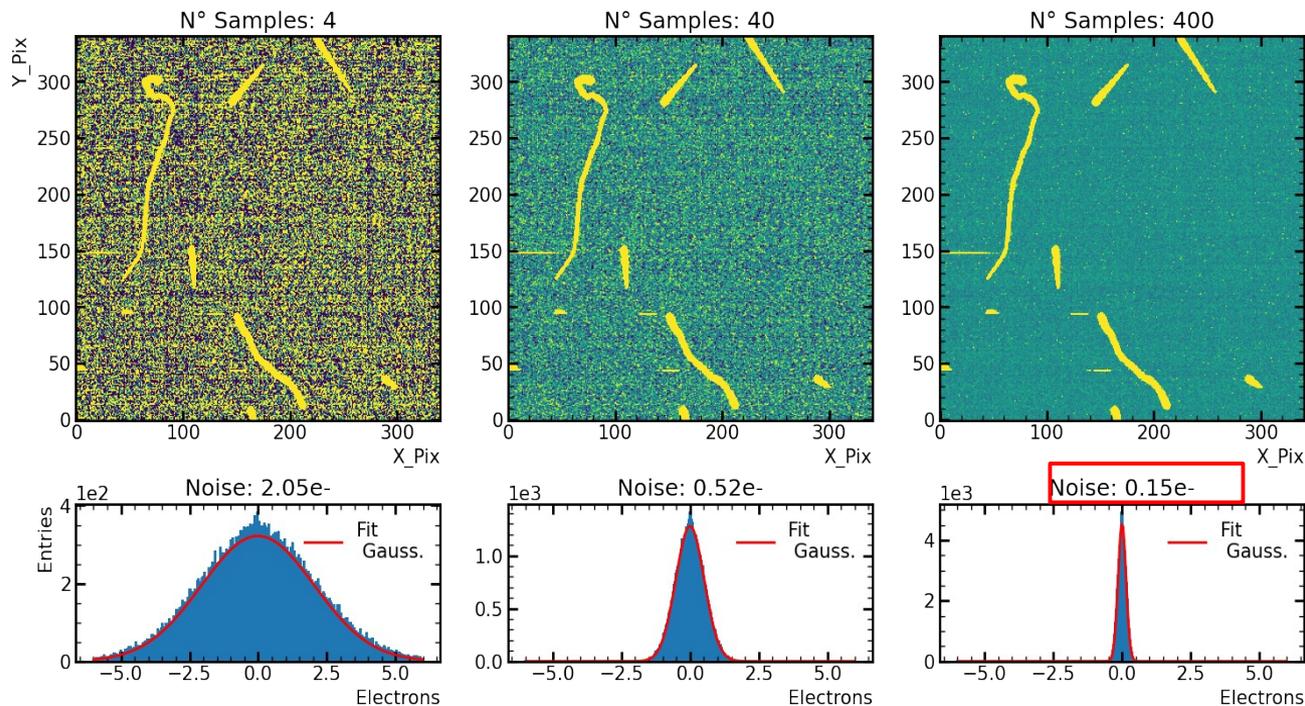
Skipper-CCD 4000 samples



Skipper-CCD desempeño

Preliminary

- Toma de datos en curso para caracterizar desempeño y nivel de ruido.
- Pruebas de la electrónica LTA y modo de lectura para Skipper CCDs.
- Ruido de lectura se reduce con N muestras por pixel:

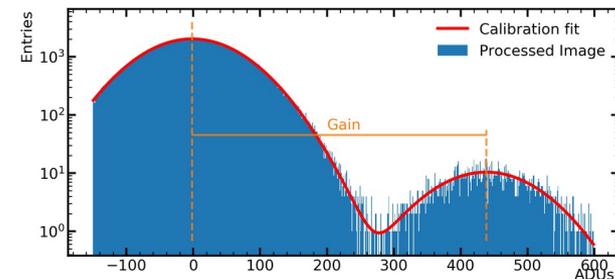
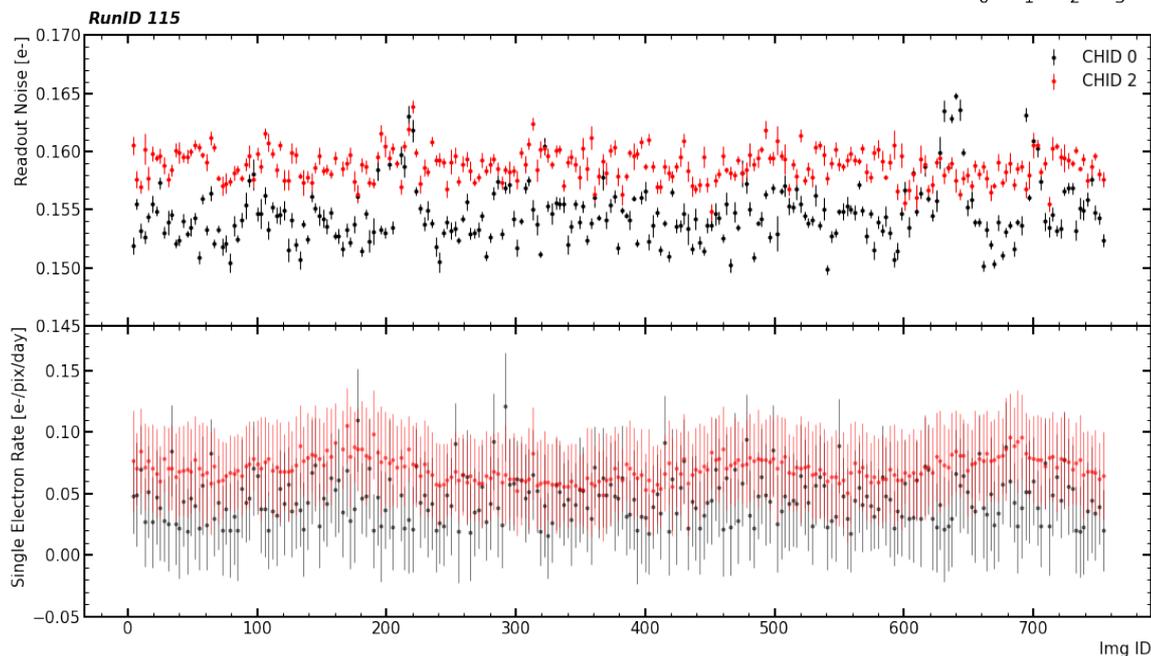
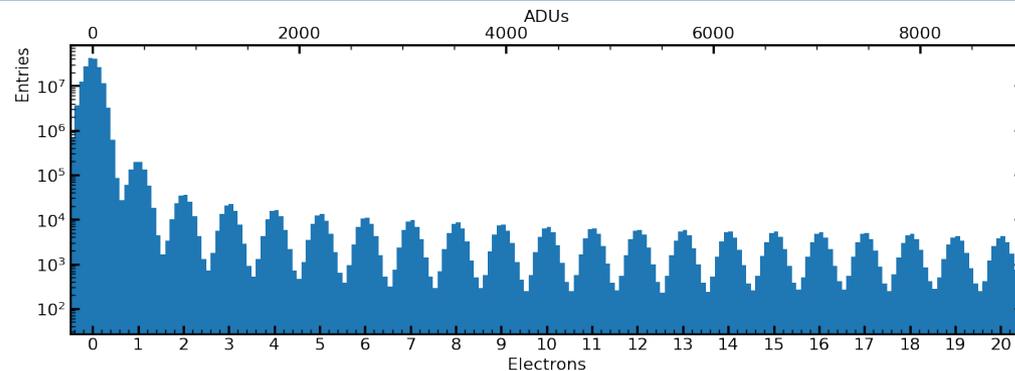


$$\sigma = \frac{\sigma_1}{\sqrt{N}}$$

Skipper-CCD desempeño

Preliminary

- Calibración de energía y linealidad
- Mediciones de corriente oscura y ruido.
- Nuevos algoritmos de extracción de eventos.



Preliminary:

Noise = 0.16 e-

Single-electron rate = 0.05

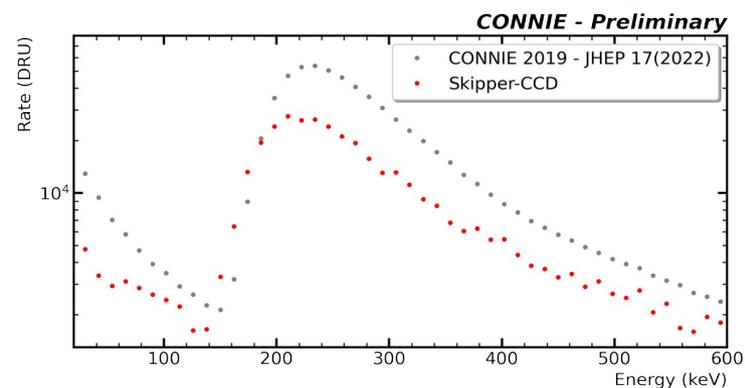
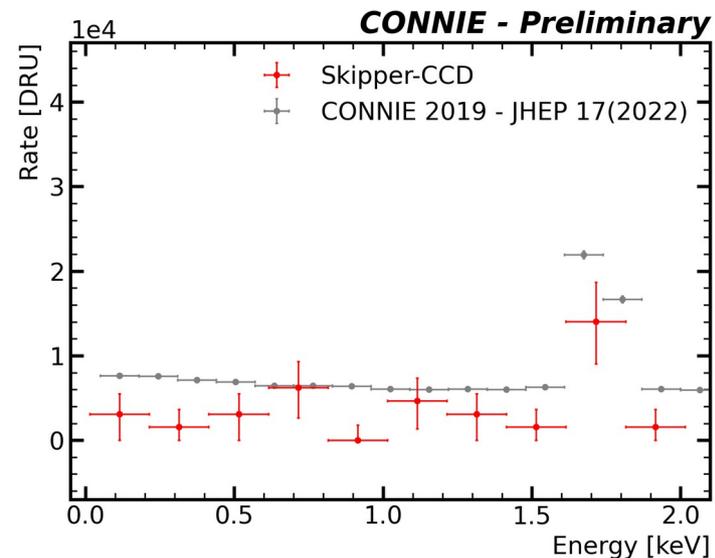
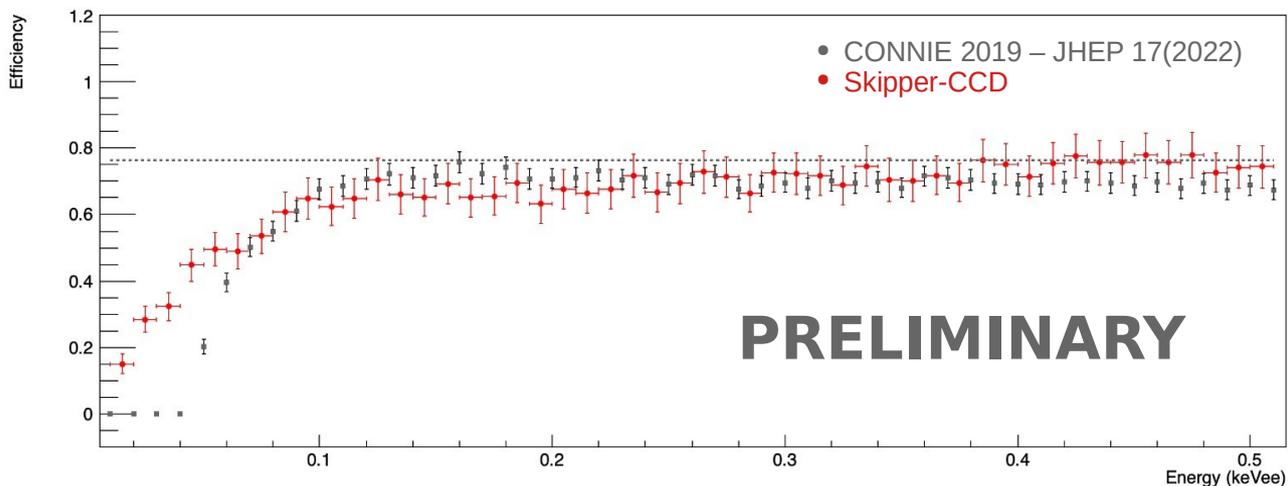
e-/pix/day

Plots by Pedro Ventura

Skipper-CCD desempeño

Plots by Pedro Ventura & Carla Bonifazi

- Determinación de la **eficiencia**.
- Obtención de **espectros de energía del background** a nivel del mar con escudo pasivo.
- Datos con **Reactor-OFF**, período de ~ 20 días.
- Exposición total de 0.0028 kg-día con masa de ~ 0.5 g.
- Low Energy background level: ~ 3.2 kdr. Threshold = 15 eV

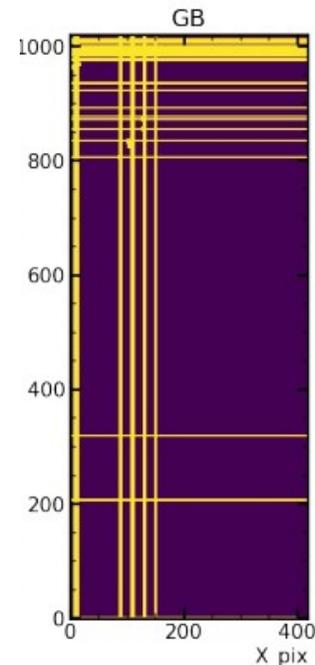
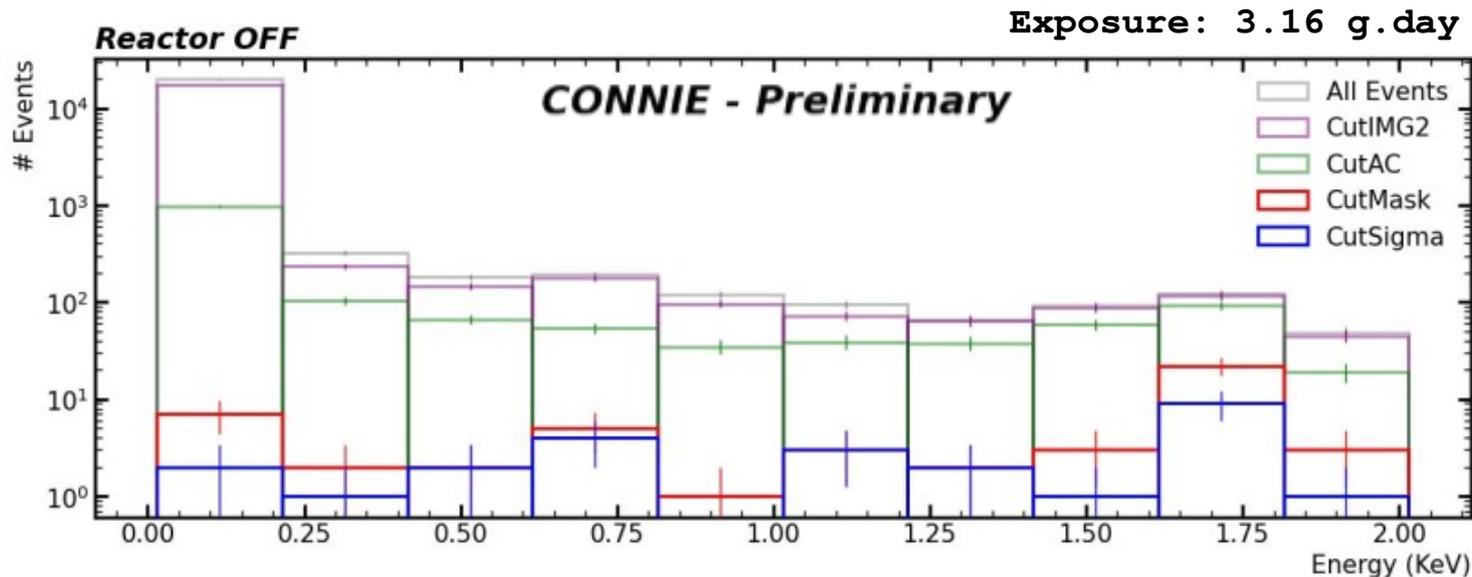


Spectrum at high energy, no cuts

Selección de eventos con Skipper-CCD

Cortes de selección para datos **Reactor-OFF**:

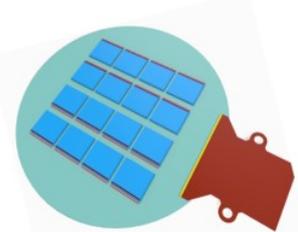
- All Events: Umbral de energía de 15 eV; **SER: Single Electron Rate**
- CutIMG2: Ruido < 0.164 e⁻ y SER < 0.1 e⁻/pix/day (Corte de desempeño);
- CutAC: Borde de 10 pixeles en la Región Activa;
- CutMask: Global (Serial Register Evt Mask + HotPix Mask) + MasterHot_RC + MasterHot Pix;
- CutSigma: $X|Y$ sigmaFit = 0.2 - 0.95 pixel.



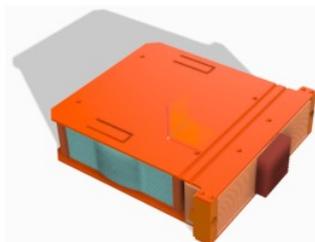
Perspectivas a futuro

- Con un umbral de 20 eV, se espera una tasa de **CEvNS** **2.2 times mayor** a la de 2019.
- Detector de 1 kg en el sitio de CONNIE, con tasa de bkgd de 4 kdrd observaría CEvNS a 90% C.L. en 11 días (Lindhard QF) ó ~2 meses (Chavarria QF).
- Planes para aumentar masa de Skipper CCDs en marcha.
- En negociaciones con la planta nuclear de Angra para ubicar el detector más cerca del núcleo (dentro del domo).

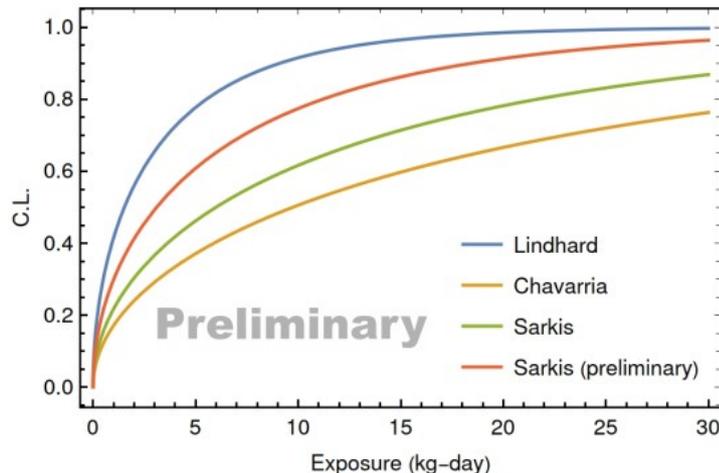
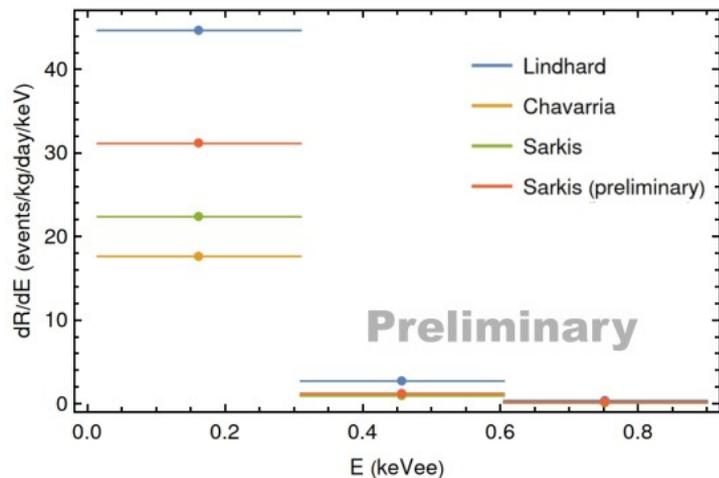
Multi-Chip Module
(16 CCDs → 8 g)



Super Module
(16 MCMs → 100 g)



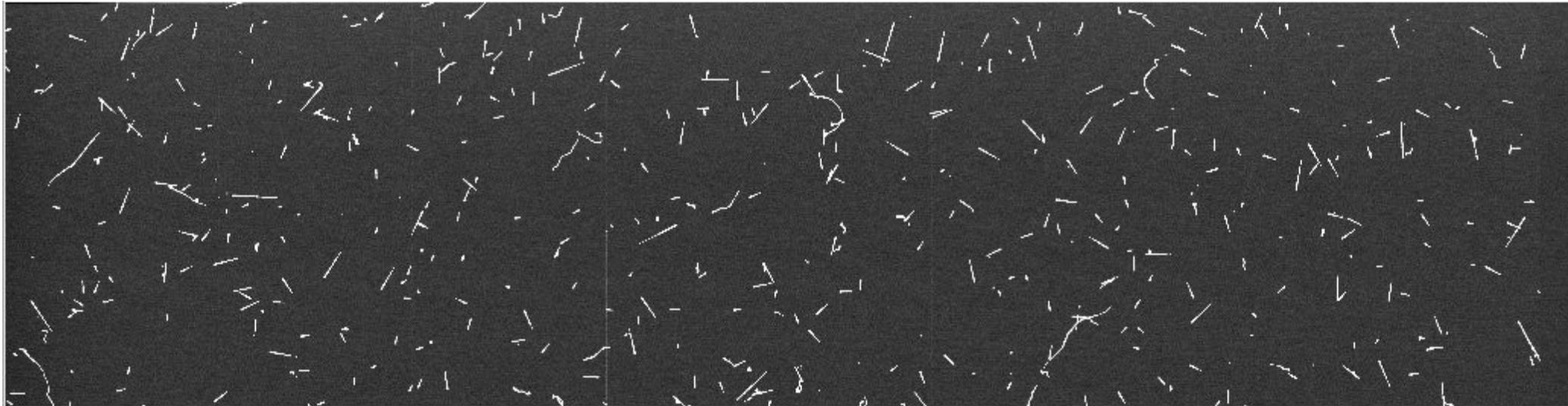
Oscura experiment design [arXiv:2304.04401]



Resumen

- Las CCD son una tecnología prometedora para detectar CEvNS a bajas energías.
- Resultados preliminares de CONNIE con datos de 2019 imponen límites competitivos para partículas milicargadas. Se actualizarán con conjunto de datos completo.
- CONNIE fue el primer experimento en instalar Skipper-CCD en un reactor en 2021.
- Excelente desempeño de las Skipper-CCD con mejoras en eficiencia y niveles de background.
- Planes para incrementar la masa de Skipper-CCDs y mover el detector dentro del domo del reactor Angra-2 en marcha.

¡Gracias por su atención!



Agradecemos el apoyo de CONACYT proyecto
CF-2023-I-1169 y DGAPA-UNAM proyectos
PAPIIT-IN106322 y PAPIIT-IN104723.

BACKUPS

The CONNIE Collaboration

COherent Elastic Neutrino Nucleus Interaction Experiment



Argentina

Centro Atómico Bariloche
 Universidad de Buenos Aires
 Universidad del Sur / CONICET
 ICAS / ICIFI / UNSAM



Mexico

Universidad Nacional Autónoma de México



Switzerland

University of Zurich



Brazil

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



Paraguay

Universidad Nacional de Asunción



USA

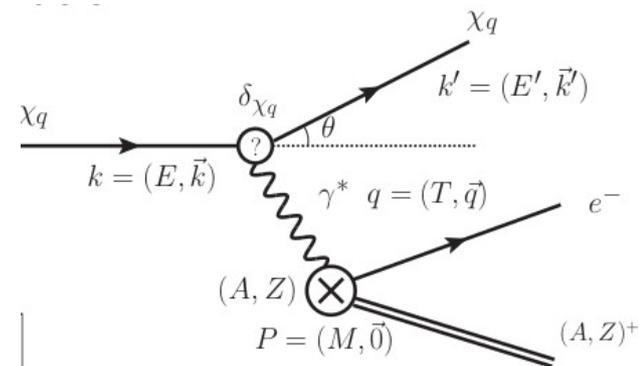
Fermi National Accelerator Laboratory

14 institutions, 6 countries ~30 people

Search for Millicharged particles

- Detection: interaction with silicon via atomic ionisation (t-channel)
- Semiclassical Photo Absorption Ionization (PAI) model.

$$\frac{d\sigma_R}{dE} = \underbrace{z^2 \frac{2k_R}{\beta^2} \left(\frac{1 - \beta^2 E/E_{max}}{E^2} \right)}_{ze \rightarrow \epsilon e} \quad \frac{d\sigma_{mcp}}{dE} = \epsilon^2 \frac{d\sigma_R}{dE} \quad \rightarrow \quad \frac{d\sigma_{mcp}}{dE} = \epsilon^2 |F(E)|^2 \frac{d\sigma_R}{dE}$$



Modeling the Form Factor with the Photo Absorption Ionisation model:

$$\frac{d\sigma_{PAI}}{dE} = \underbrace{\frac{\alpha}{\beta^2 \pi} \frac{\sigma_\gamma(E)}{EZ} \ln[(1 - \beta^2 \epsilon_1)^2 + \beta^4 \epsilon_2^2]^{-1/2}}_{\text{Transverse}} + \underbrace{\frac{\alpha}{\beta^2 \pi} \frac{1}{N_e \hbar c} \left(\beta^2 - \frac{\epsilon_1}{|\epsilon|^2} \right) \Theta}_{\text{Cherenkov}} + \underbrace{\frac{\alpha}{\beta^2 \pi} \frac{\sigma_\gamma(E)}{EZ} \ln\left(\frac{2mc^2 \beta^2}{E}\right)}_{\text{Resonance absorption at atomic energy levels}} + \underbrace{\frac{\alpha}{\beta^2 \pi} \frac{1}{E^2} \int_0^E \frac{\sigma_\gamma(E')}{Z} dE'}_{\text{Longitudinal}} + \underbrace{\frac{\alpha}{\beta^2 \pi} \frac{1}{E^2} \int_0^E \frac{\sigma_\gamma(E')}{Z} dE'}_{\text{Rutherford quasi free scatterings}}$$

Relativistic rise in e. deposition

Cherenkov

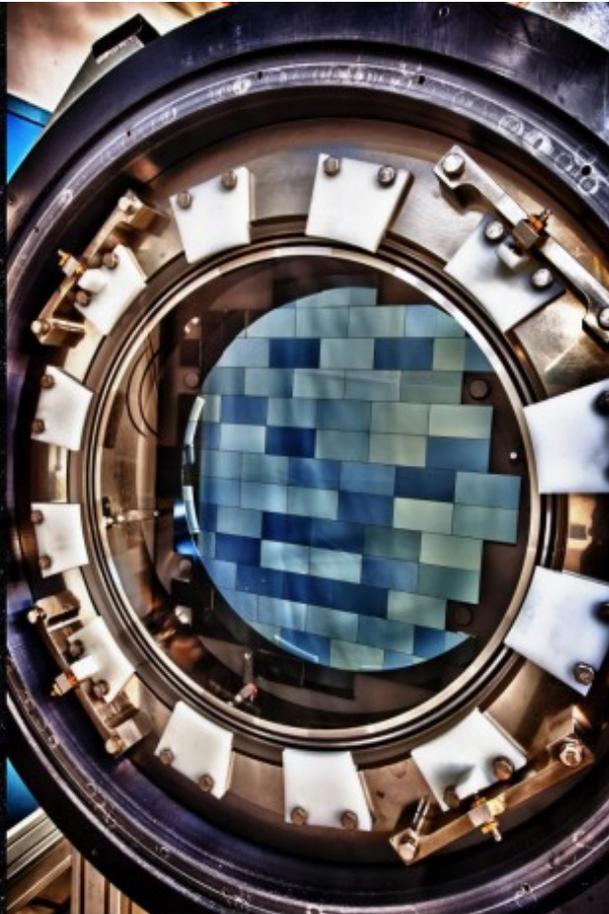
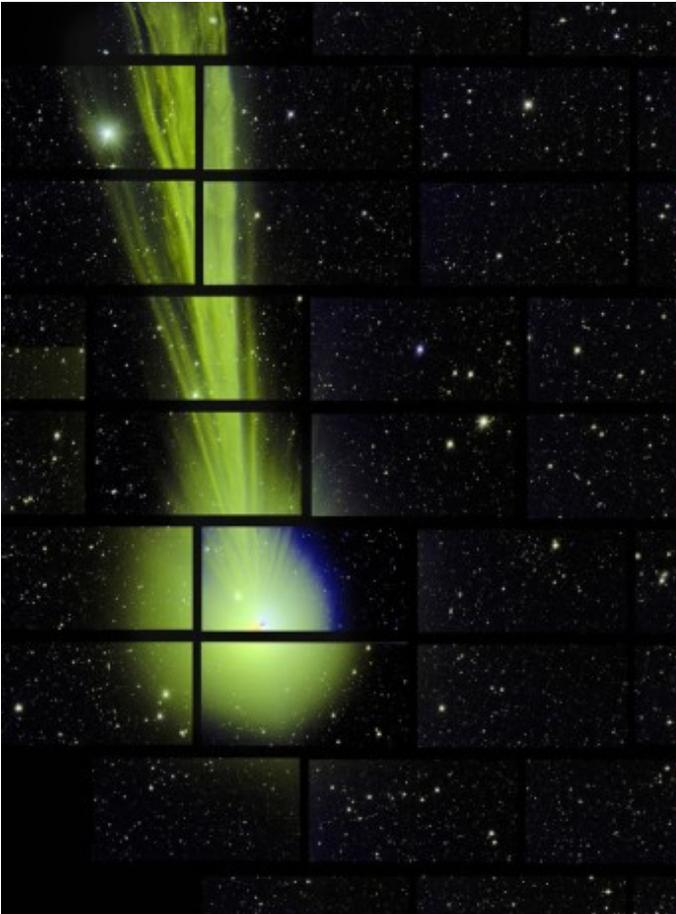
Resonance absorption at atomic energy levels

Rutherford quasi free scatterings

$$\frac{d\sigma_{mcp}}{dE} = \epsilon^2 \frac{d\sigma_{PAI}}{dE}$$

Limit setting: search for the lowest coupling compatible with observed rate in the 100-150 eV bin.

CCDs en cámaras astronómicas



Usadas ampliamente en astronomía desde su invención en 1970.

Lab. de Microsistemas de LBNL desarrolló CCDs gruesas para DECam (~100s μm de grosor).

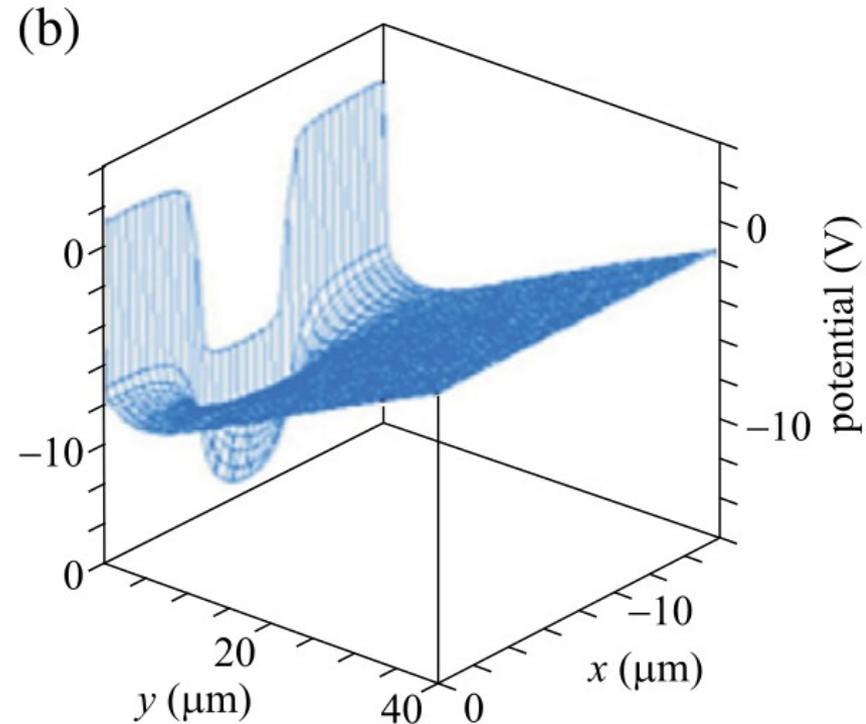
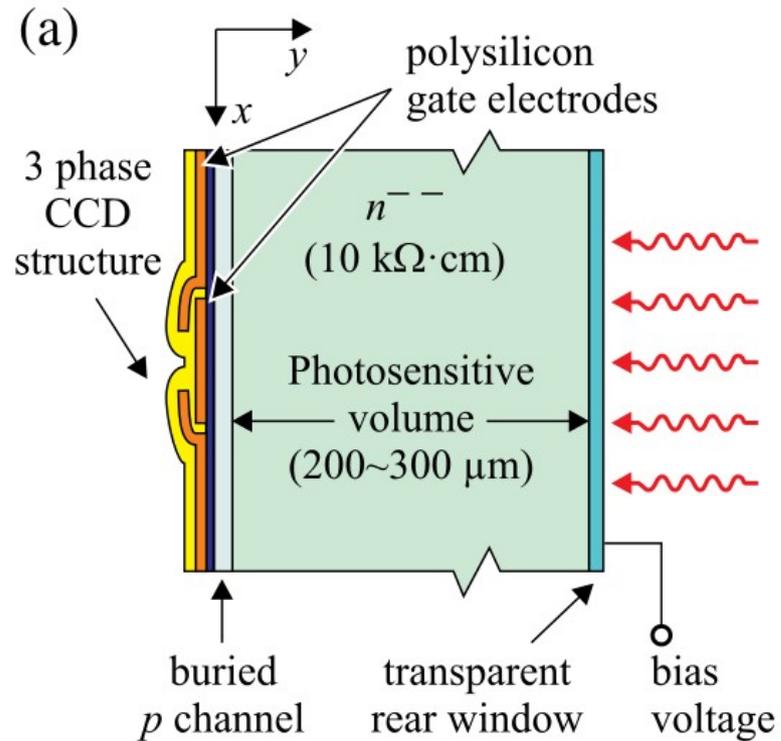
[10.1109/TED.2002.806476]

- Gran resolución espacial (pixel 15 μm)
- Alta eficiencia de transporte de carga
- **Bajo umbral de energía (~40 eV)**
- **Bajo ruido de lectura (~2 e⁻)**
- **DC de sólo algunos e⁻ /pix/day**

Ahora empleadas en física de partículas.

www.darkenergysurvey.org

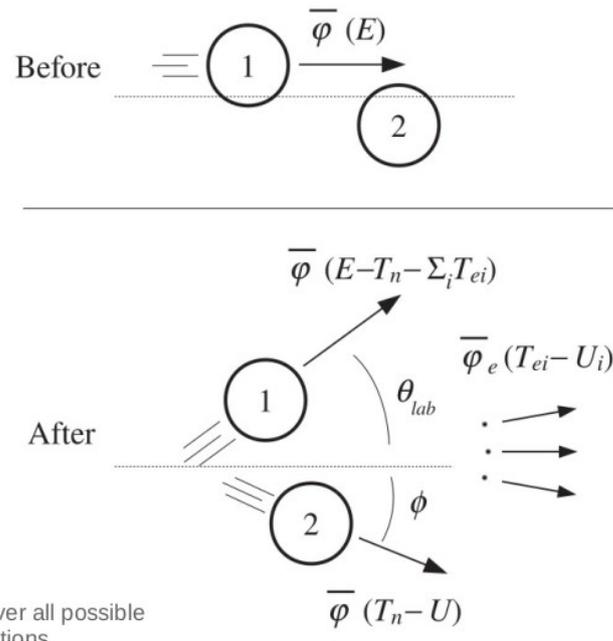
Pixel de un CCD



Quenching Factor (retr. nucleares)

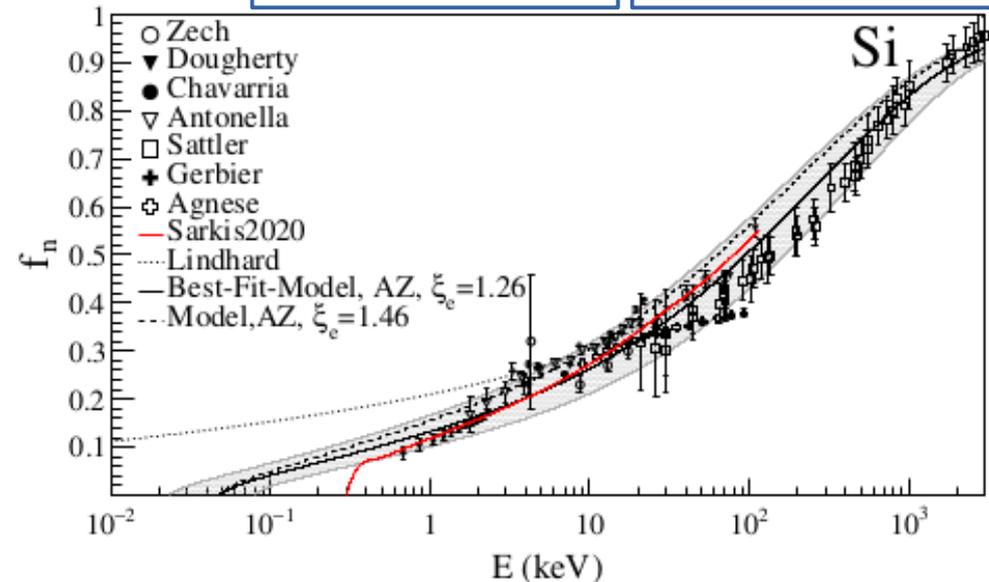
- Y. Sarkis desarrolló un modelo para la eficiencia de ionización de retrocesos nucleares en cristales puros (Si & Ge), extendiendo el modelo de Lindhard para incluir la energía de amarre.
- Crucial para calcular límites en experimentos de búsqueda directa de MO.
- Modelo también parece funcionar para líquidos nobles.

Ver charla de Y. Sarkis



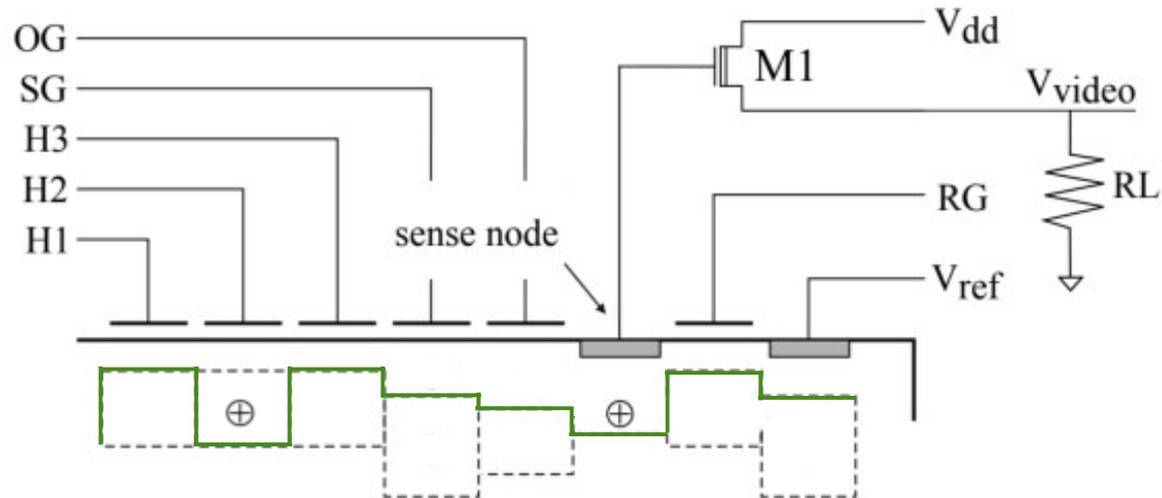
PRD101(2020)102001

PRA107(2023)062811



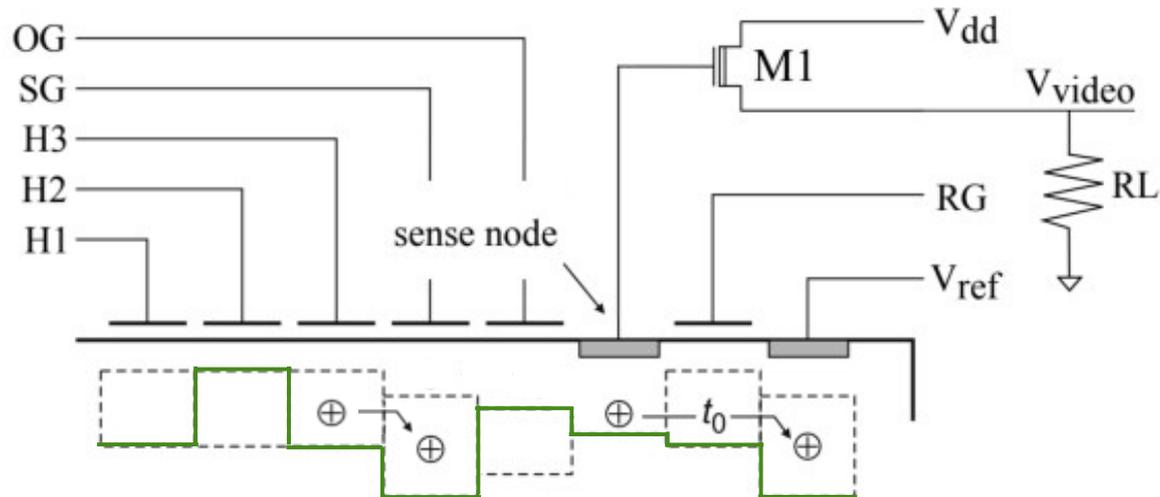
Skipper CCDs

Standard CCD readout



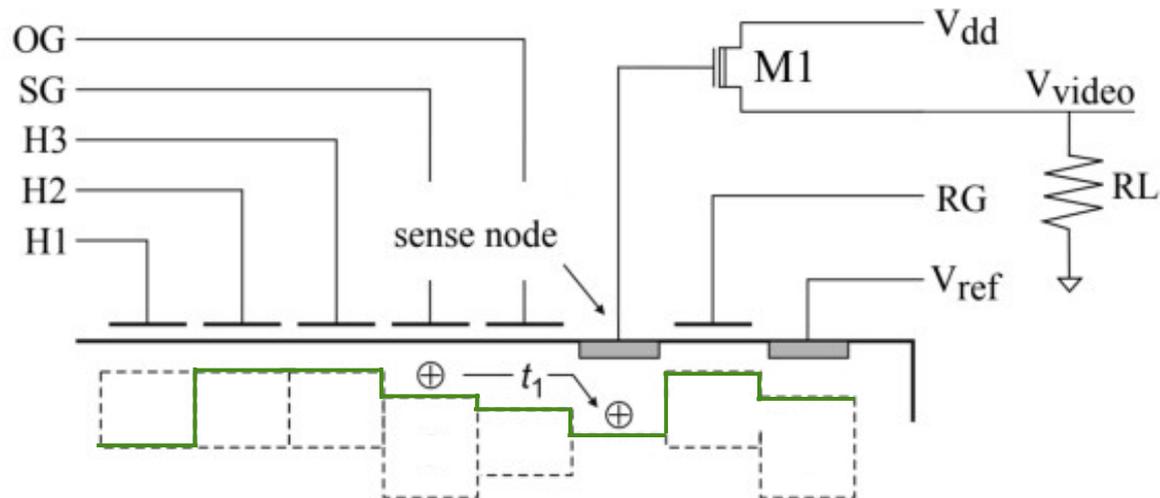
- Se quiere leer la carga en el último pixel del registro horizontal.
- Posible carga residual en SN (*sense node*)

Standard CCD readout



- La carga en el SN se drena y el voltaje de SN se pone en V_{ref} con un pulso en RG (*reset gate*)
- La carga de interés es movida al SG (*Summing-well Gate*)

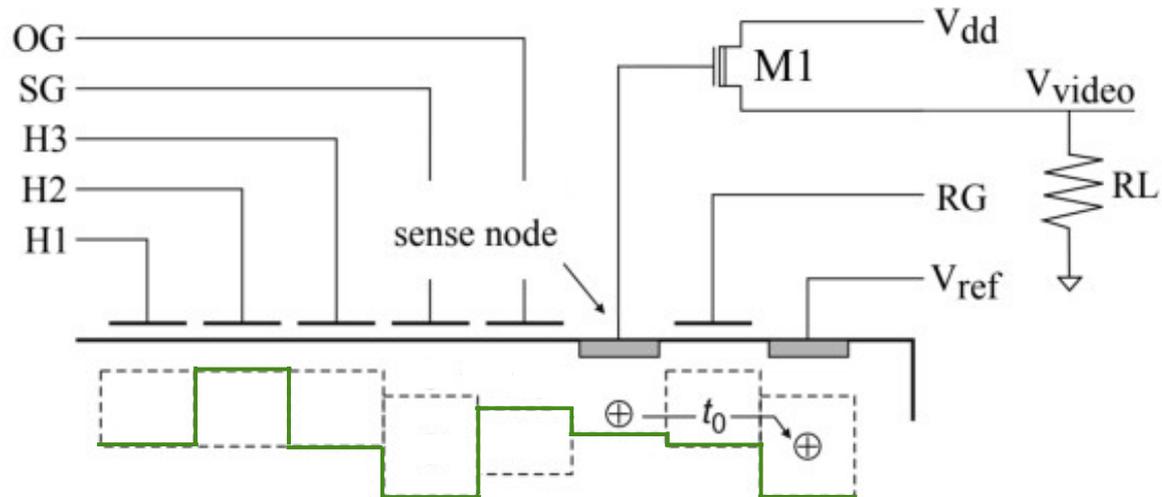
Standard CCD readout



- La carga de interés es movida al SN donde es leída.

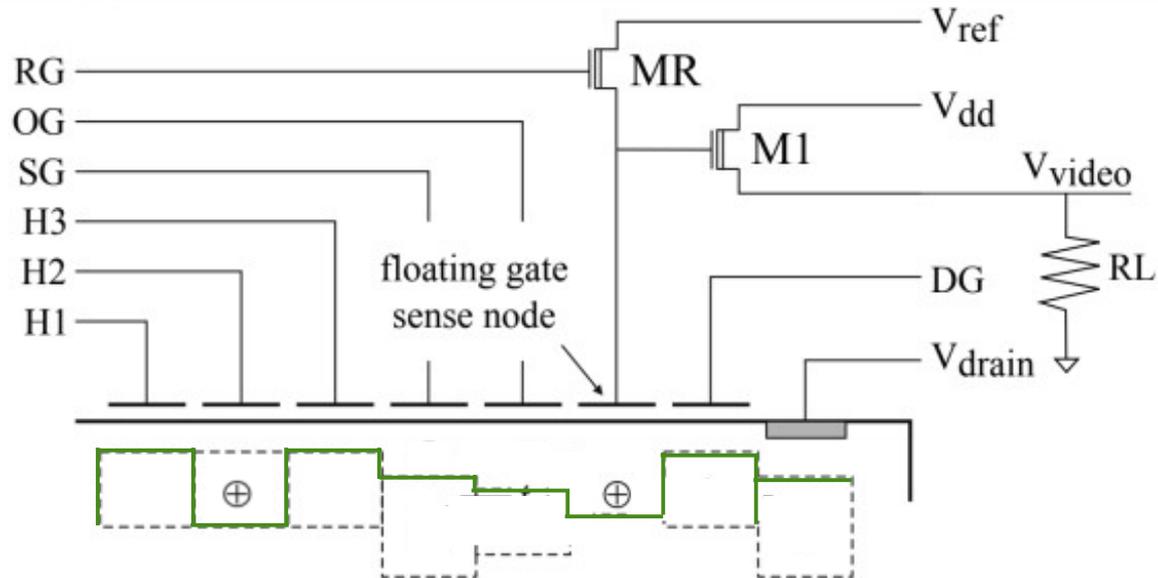


Standard CCD readout



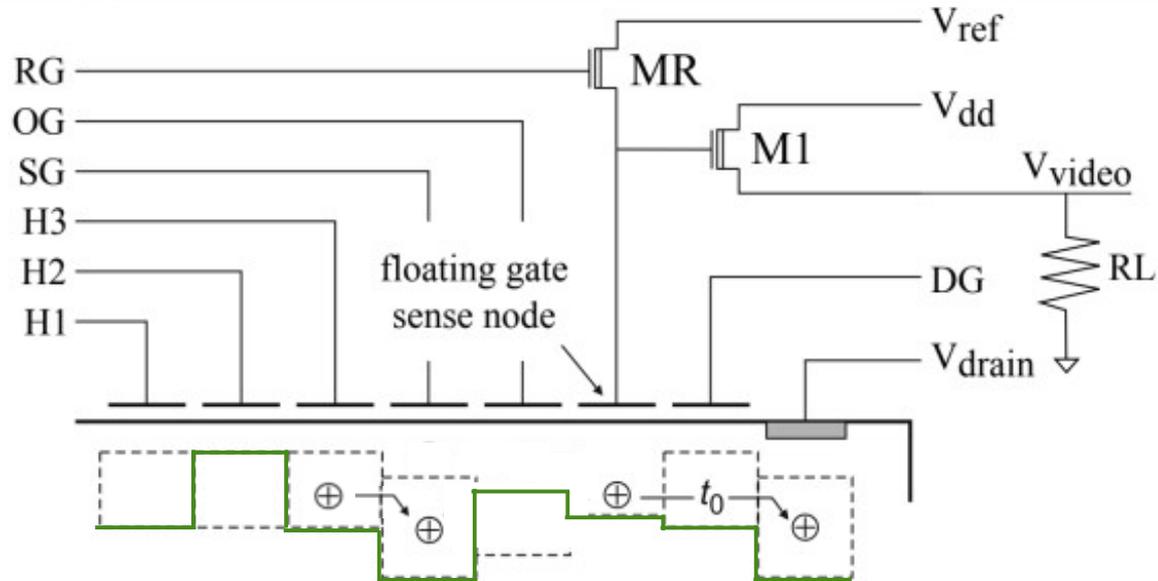
- Una vez leída, la carga es drenada y se pierde.

Skipper CCD readout



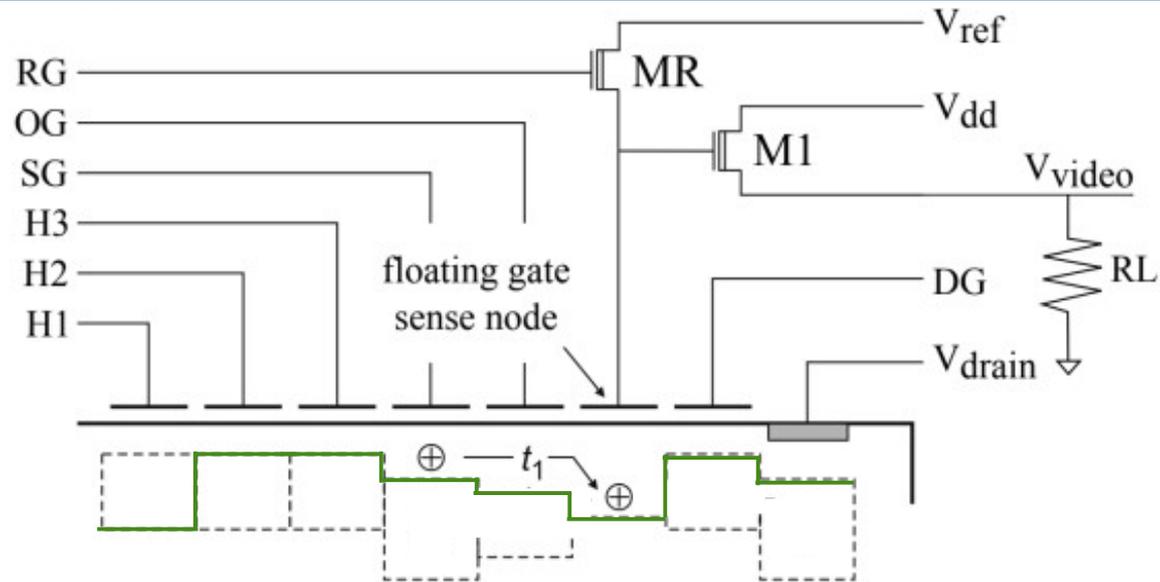
- Se quiere leer la carga en el último pixel del registro horizontal.
- Posible carga residual en SN

Skipper CCD readout



- La carga en SN se drena y su voltaje se fija en V_{ref} con un pulso en RG. [→ ahora a través de MR].
- La carga de interés es movida a SG

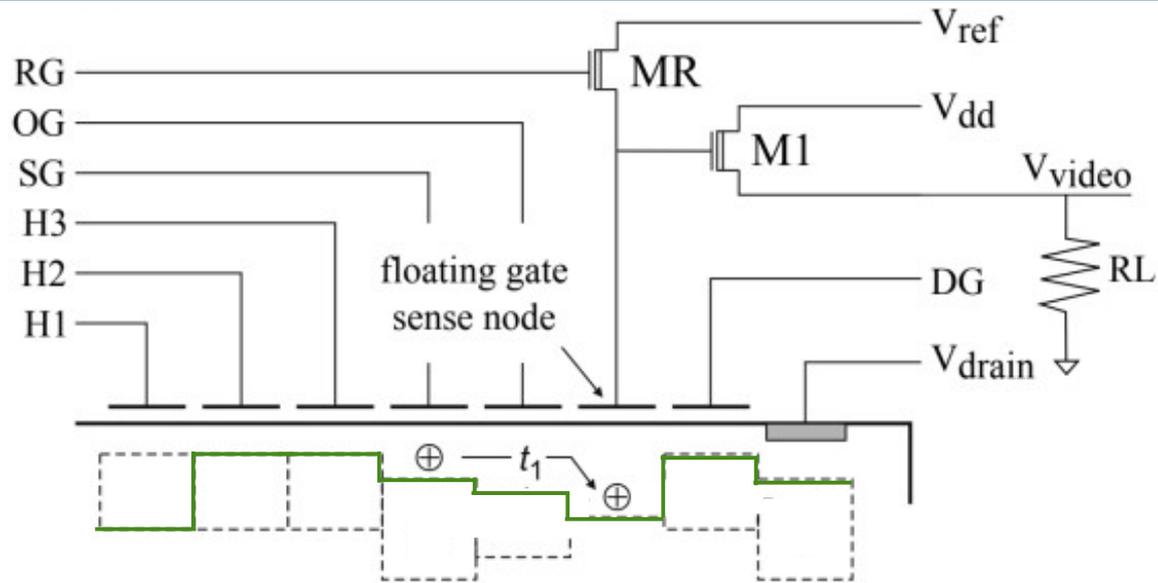
Skipper CCD readout



- La carga de interés es movida al SN donde es leída.



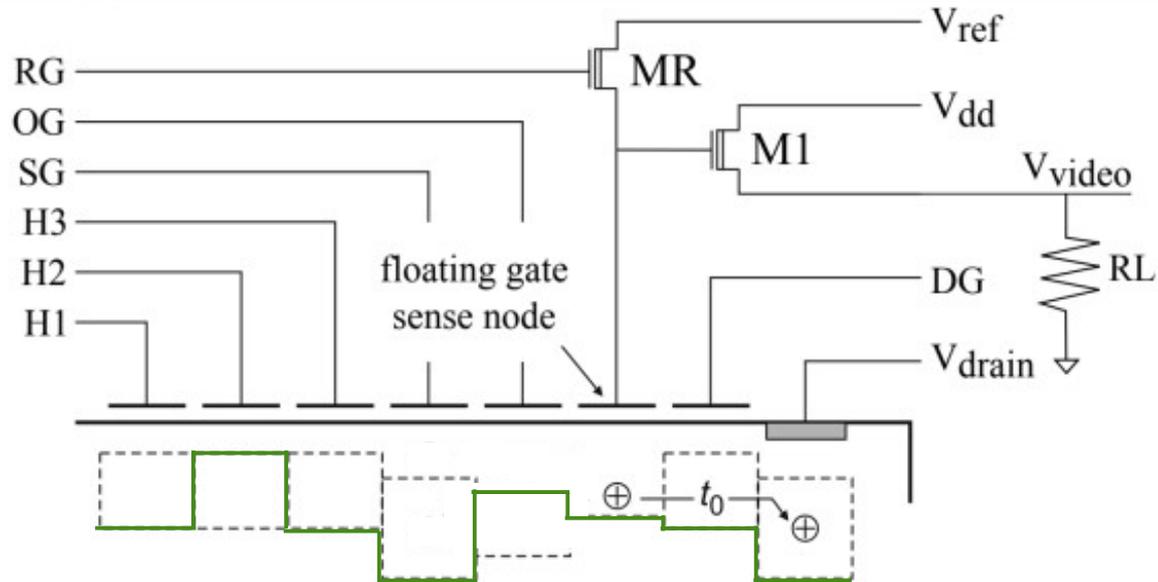
Skipper CCD readout



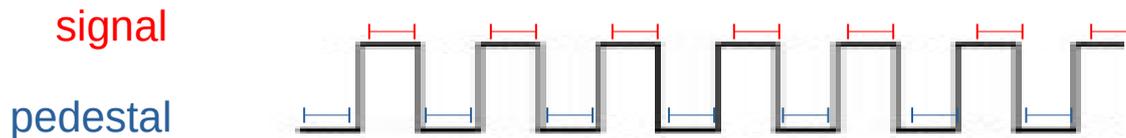
- La carga es movida nuevamente al SN donde es leída.



Skipper CCD readout

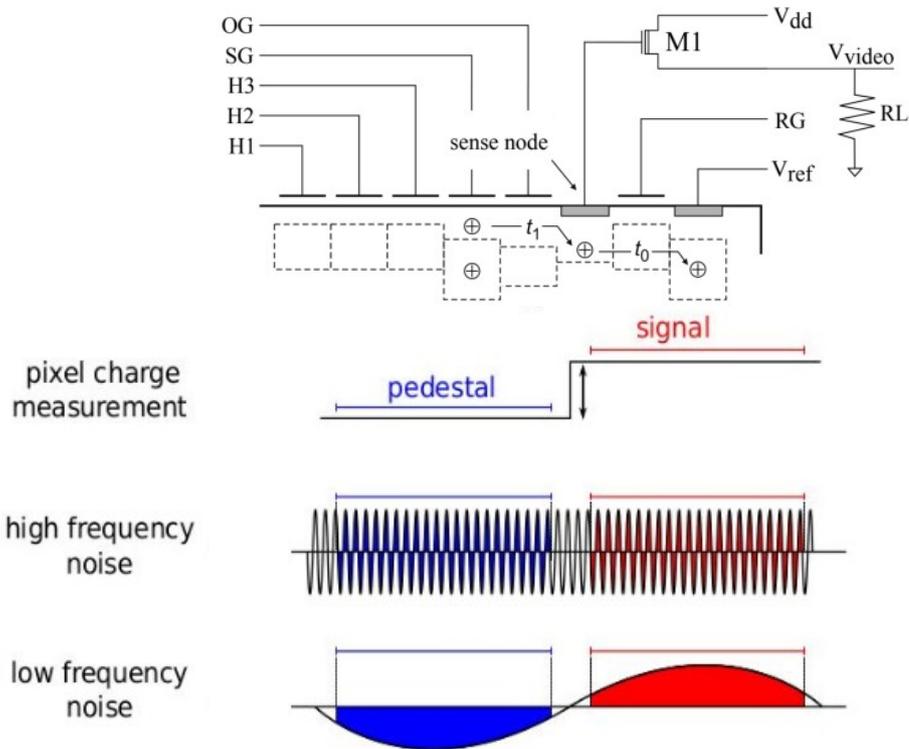


- Una vez leída N_{samp} veces, la carga es drenada y se pierde.

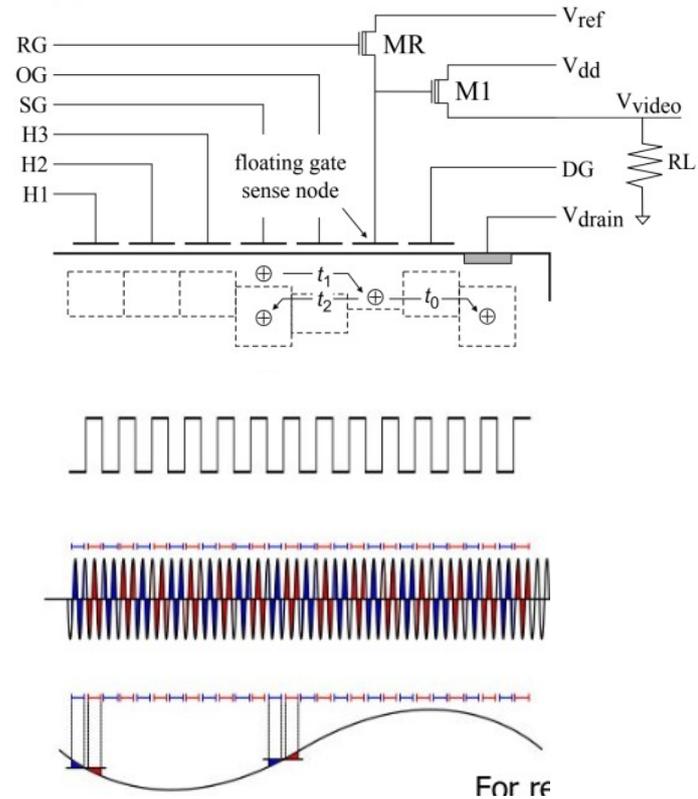


Standard vs skipper CCD readout

Standard



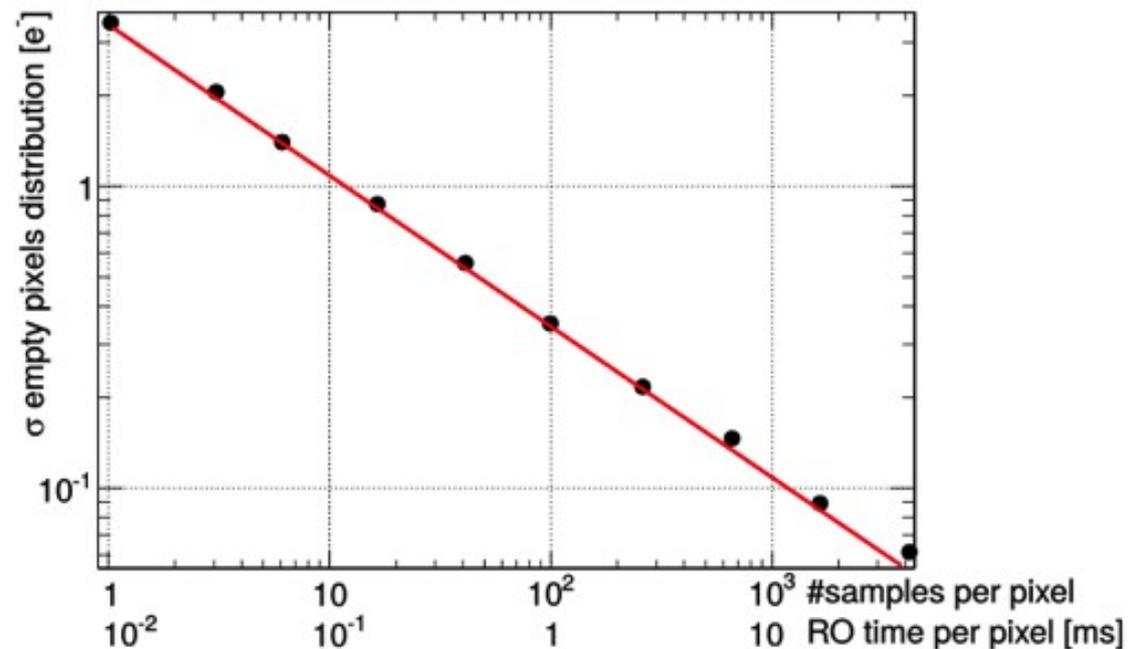
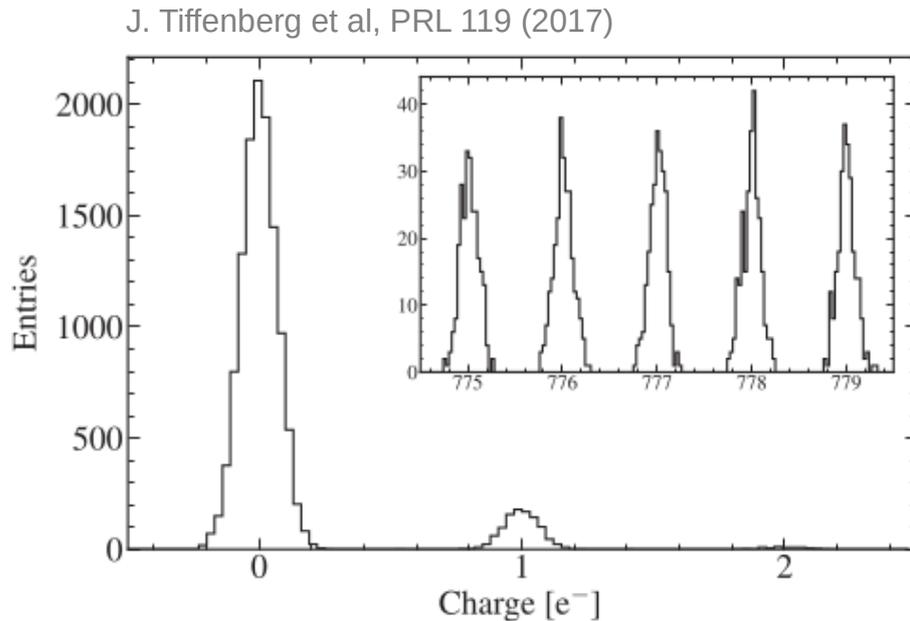
Skipper



- Skipper: ruido de baja frecuencia se reduce significativamente en cada medición.
- Muchas mediciones → promedio preciso.

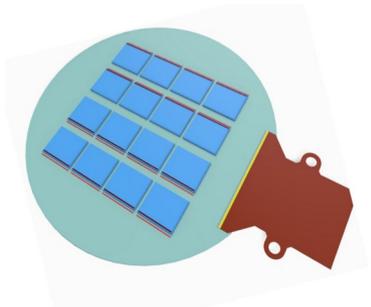
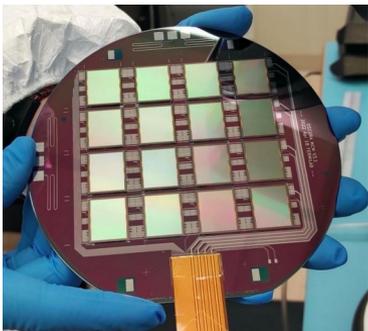
Ruido de lectura sub-electrónico

- El ruido de lectura de las Skipper CCD se escala con $1/\sqrt{N_{\text{samp}}}$
Compromiso entre: **velocidad** vs. **resolución**.
- Pueden contar electrones individuales: medición de carga *autocalibrada* .

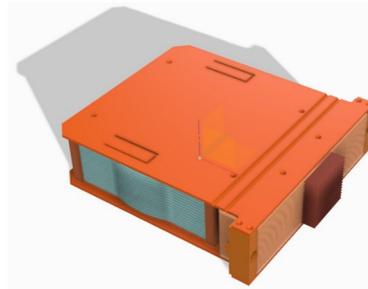


Oscura

- Experimento de siguiente generación con CCD
- 10 kg de skipper-CCD (28 gigapíxeles) sumergidas en Nitrógeno líquido a $p \approx 450$ psi (120 – 140 K).
- Planeado para instalarse en SNOLAB. Meta actual es iniciar construcción en 2025.
- Sensibilidad sin precedentes a interacciones de MO sub-GeV con electrones en el rango de m_χ de 1 MeV - 1 GeV.



Multi-Chip Module
(16 CCDs \rightarrow 8 g)



Super Module
(16 MCMs \rightarrow 100 g)



Oscura experiment
(100 SMs \rightarrow 10 Kg)