

Búsquedas directas de materia oscura y física experimental de neutrinos desde el ICN



Alexis A. Aguilar Arévalo
Departamento de Física de Altas Energías
ICN-UNAM

10 de junio de 2026



Seminario de Promoción a Inv. Tit. B

Departamento de Física de Altas Energías, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM

Contenido

- Materia Oscura y Neutrinos (CEvNS)
- El experimento Coherent CAPTAIN-Mills (CCM)
- Dispositivos de carga acoplada (CCD): Standard vs. Skipper
 - El experimento DAMIC
 - El experimento CONNIE
- Experimentos en el ICN con Skipper-CCD
- Resumen

Grupo de Neutrinos y MO del ICN

Investigadores:

- Dr. Juan Carlos D'Olivo
- Dr. Alexis Aguilar Arévalo

Técnico Académico:

- Ing. Mauricio Martínez Montero

Postdoctorado:

- Dr. Youssef Sarkis Mobarak (SECIHTI)
- Dr. Gabriel Zapata (DGAPA)
- Dr. Mario A. Alpízar Venegas (DGAPA) ¡próximamente!



Estudiantes:

Licenciatura (Tesis y Servicio Social)

- Mauricio Sánchez Ramírez -TL (FC-UNAM)
- Stephane Magaña Cailly -TL (FC-UNAM)
- Daniel Eduardo Salinas - SS (FES-Cuautitlán)
- Balam D. Román Irigoyen-TL (FC-UNAM)
- Miguel Angel Martínez Reveles- SS (FI-UNAM)

Maestría

- Cristian Macías Acevedo (PCF-UNAM)

Doctorado

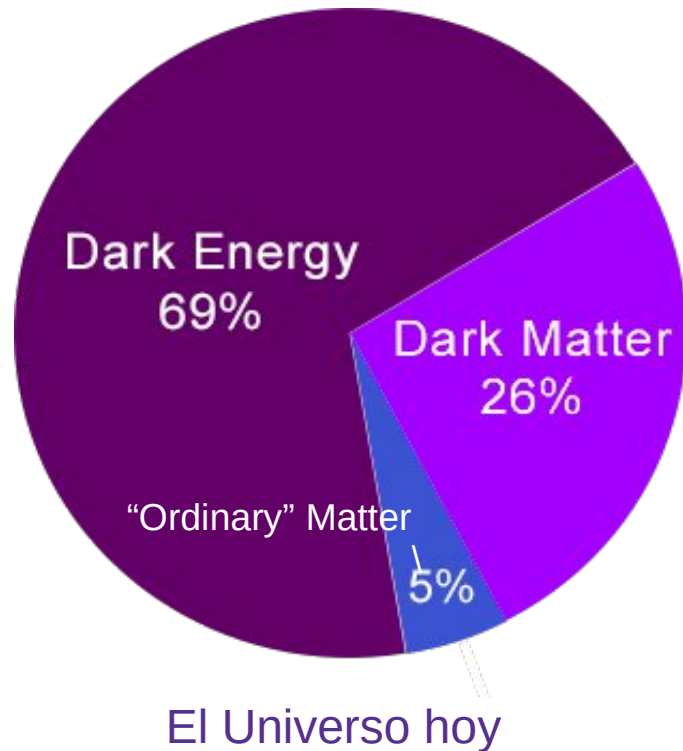
- Marisol Chávez Estrada (PCF-UNAM)

Colaboradores externos:

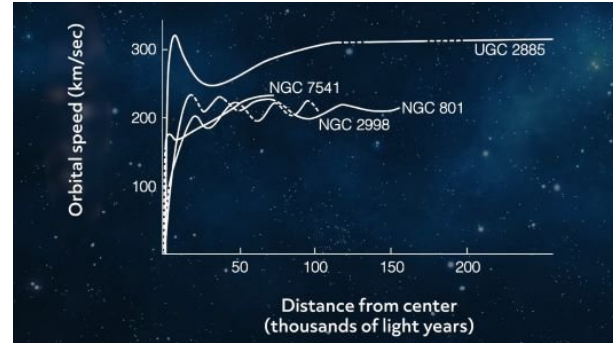
- Dra. Brenda Cervantes Vergara (Fermilab)
- Dr. Jaime Octavio Guerra Pulido (FC-UNAM)
- Dr. José A. Herrera Lara

Materia oscura

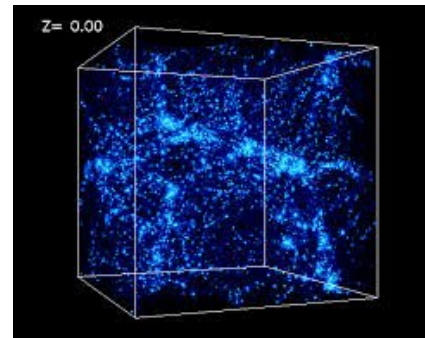
Vivimos en un Universo Oscuro. La evidencia observacional de la Materia Oscura abarca un amplio rango de escalas de tiempo y de distancia.



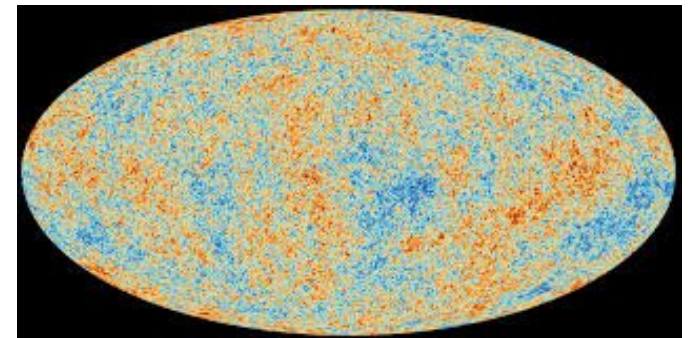
Curvas de rotación de galaxias



Colisiones de cúmulos

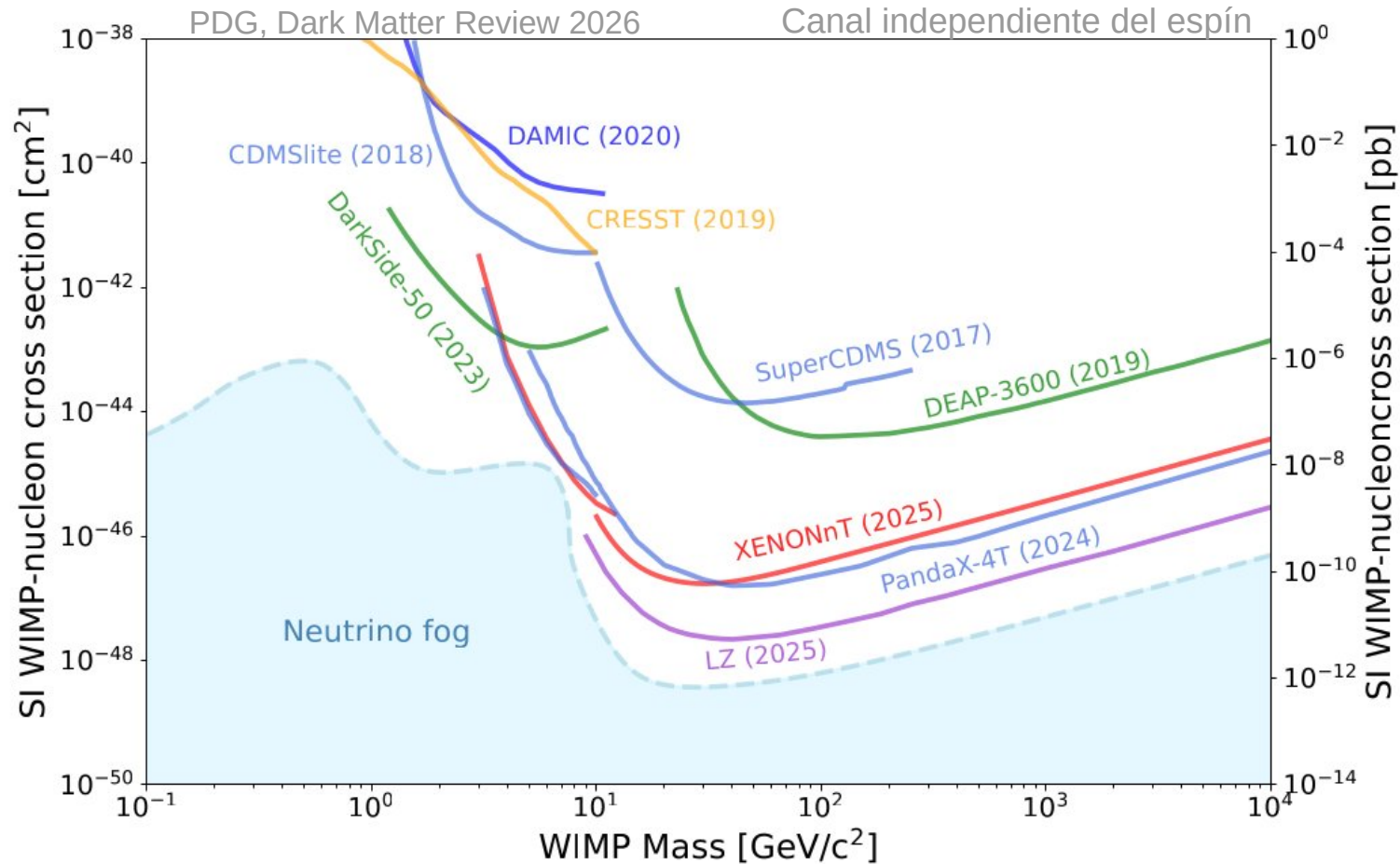


Formación de estructura



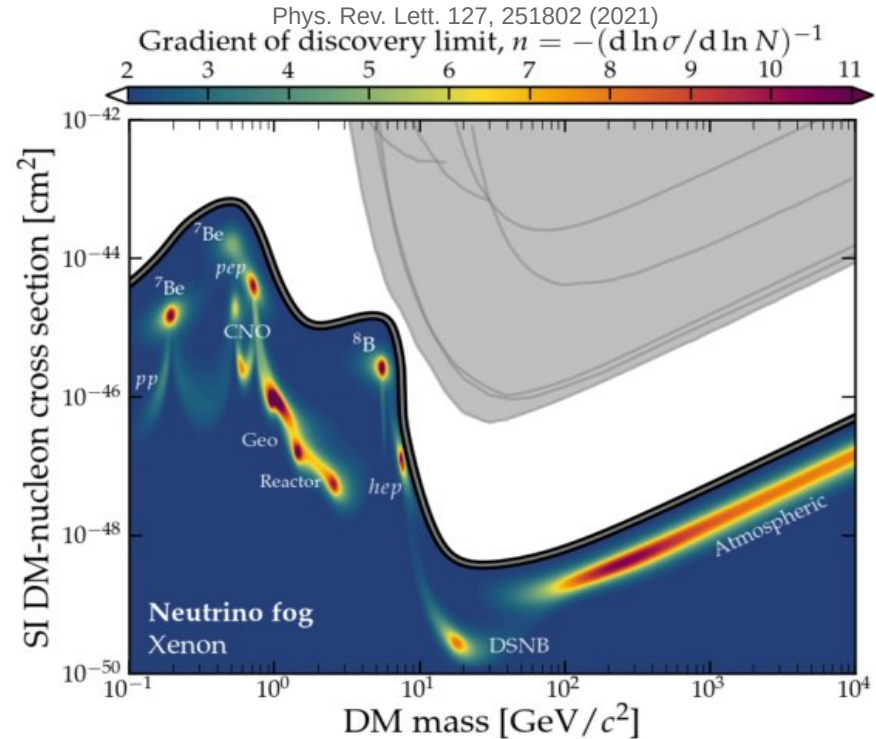
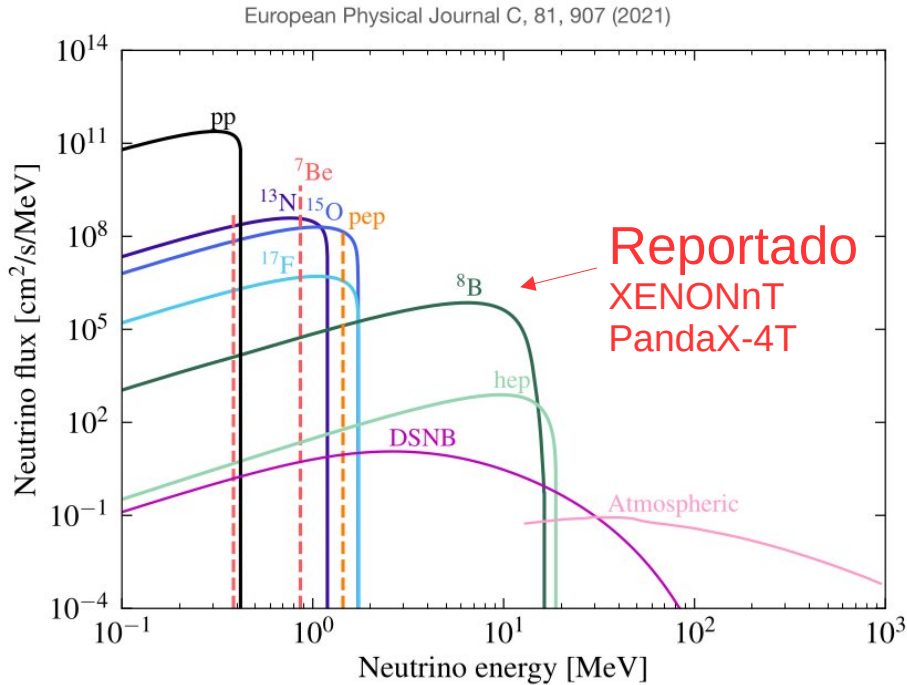
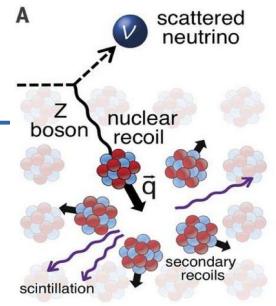
Anisotropías del CMB

Estatus de búsquedas de MO



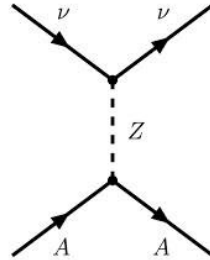
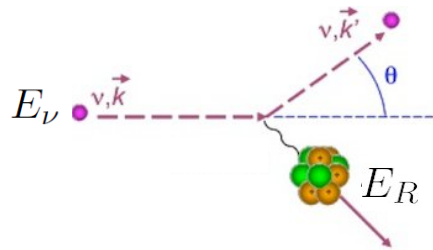
Neutrinos y búsquedas de MO

- CEvNS produce la misma señal que las WIMP en un detector.
- Los neutrinos solares son un background irreducible para la MO.



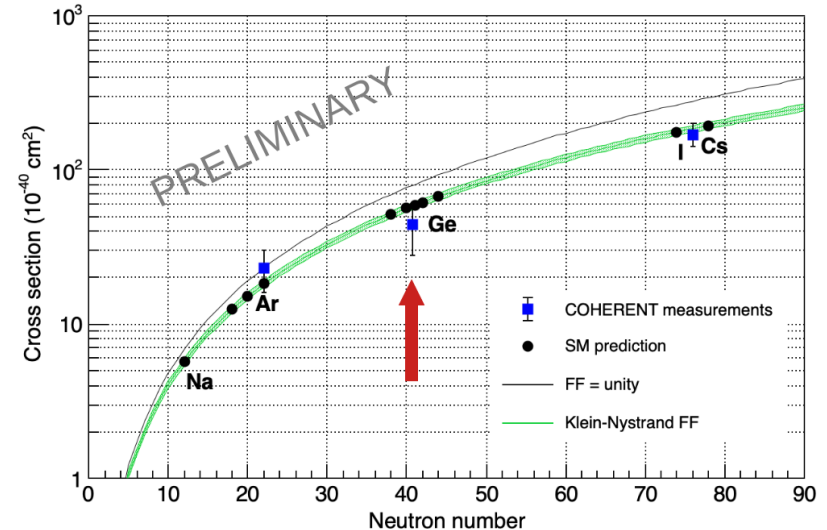
CE ν NS: “Coherent Elastic ν -N Scattering”

Interacción de corriente neutra donde un neutrino (cualquier sabor) se dispersa de un núcleo



Weak nuclear charge $Q_W^2 \sim N^2$

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



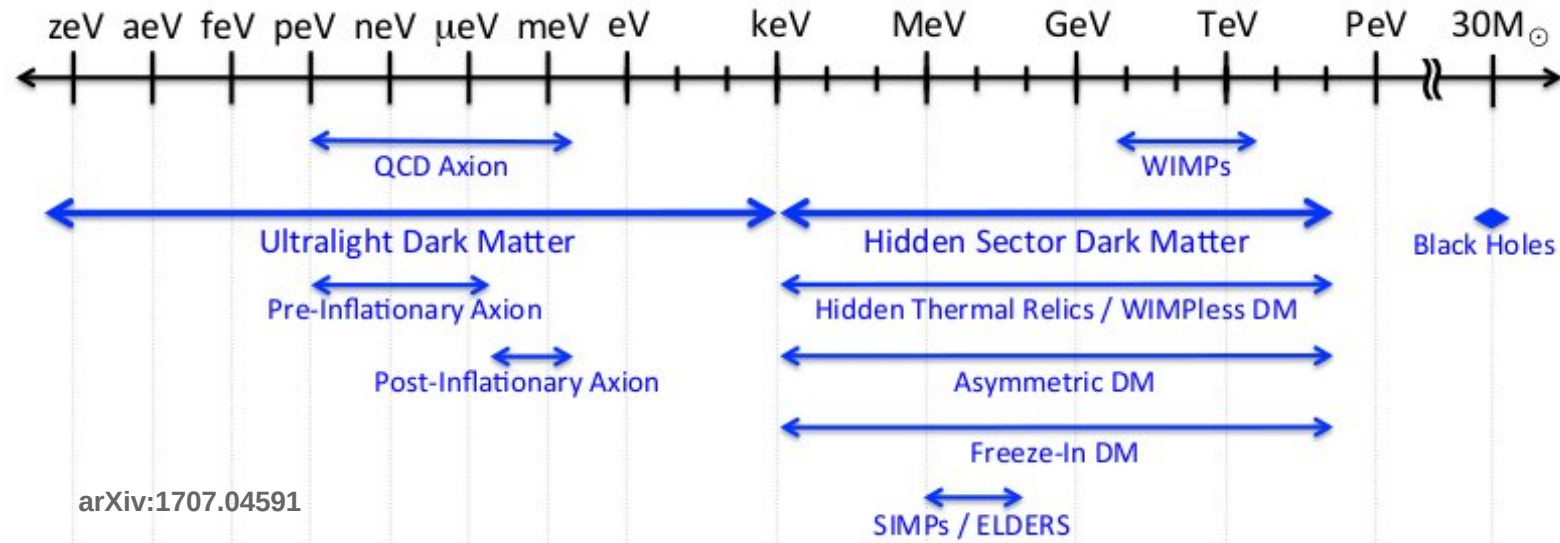
- 1^a observación: [Colaboración COHERENT](#) con ν 's con $E \sim 16-53$ MeV en detectores de CsI (Science 357, 1123, 2017), Argón Líquido (PRL, 126, 012002, 2021) y Germanio (arXiv:2406.13806, 2024).
- Recientemente “detectado” por [CONUS+](#) (3.7σ) con antineutrinos de reactores con un detector de Germanium (Nature, 643, 1229-1233, 2025).
- Evidencia por [XENONnT](#) (2.37σ) y [PandaX-4T](#) (neutrinos solares del ^8B) en detectores de Xenón líquido (PRL.134, 111802, 2025 y PRL 133, 19, 191001, 2024).
- **Nuevo canal para el estudio de física de neutrinos, accesible a todos los sabores ν_e, ν_μ, ν_τ .**

Candidatos a Materia oscura

Propiedades:

- **Atractiva gravitacionalmente**
- **Neutra** electromagnéticamente (... o casi)
- **Débilmente auto-interactuante** (no colisional)
- **Estable** a escalas de tiempo cosmológicas
- No relativista en la formación de estructura (**fría**)

Los candidatos a MO barren un amplio rango de masas:

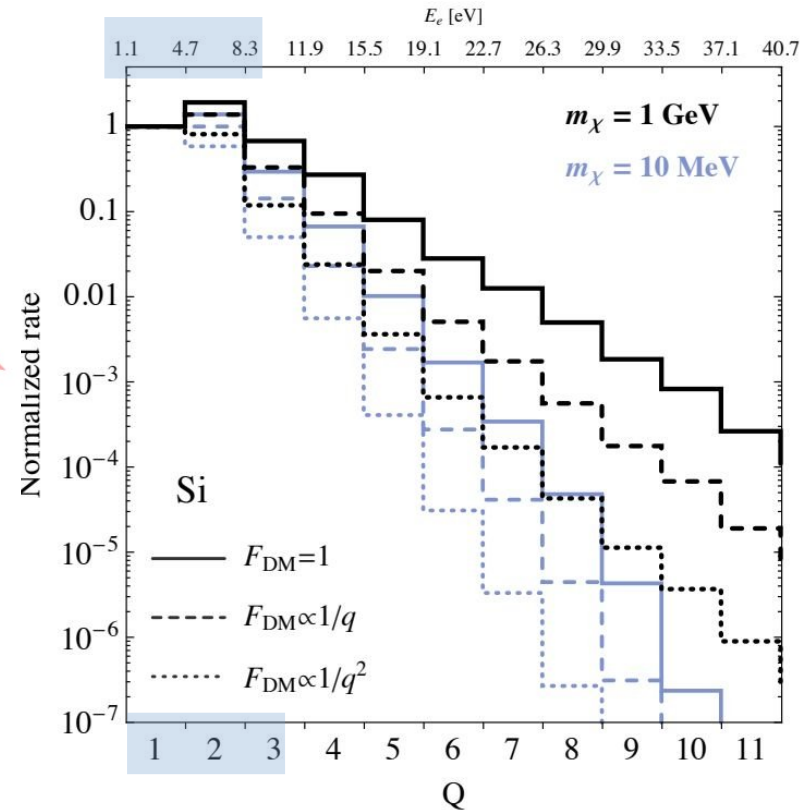
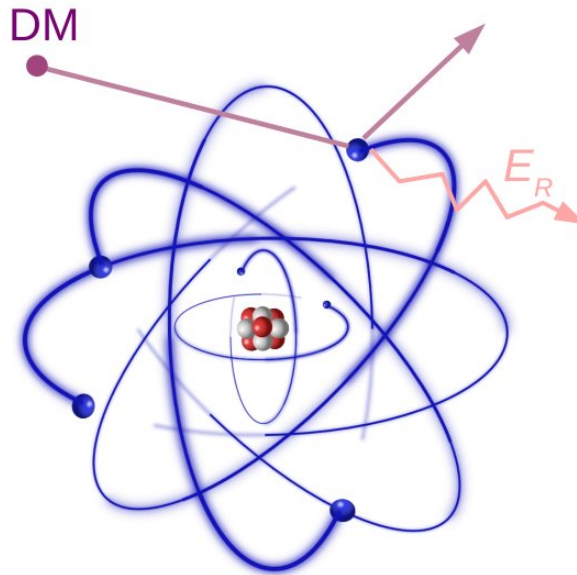


Materia oscura Liviana: dispersión con e-

Una fracción grande de la energía cinética es transferida al electrón.

Umbrales de \sim eV permiten acceder a **masas de MO de fracciones de MeV**, dejando señales de **1 a algunos electrones** en detectores de Si.

Halo de MO

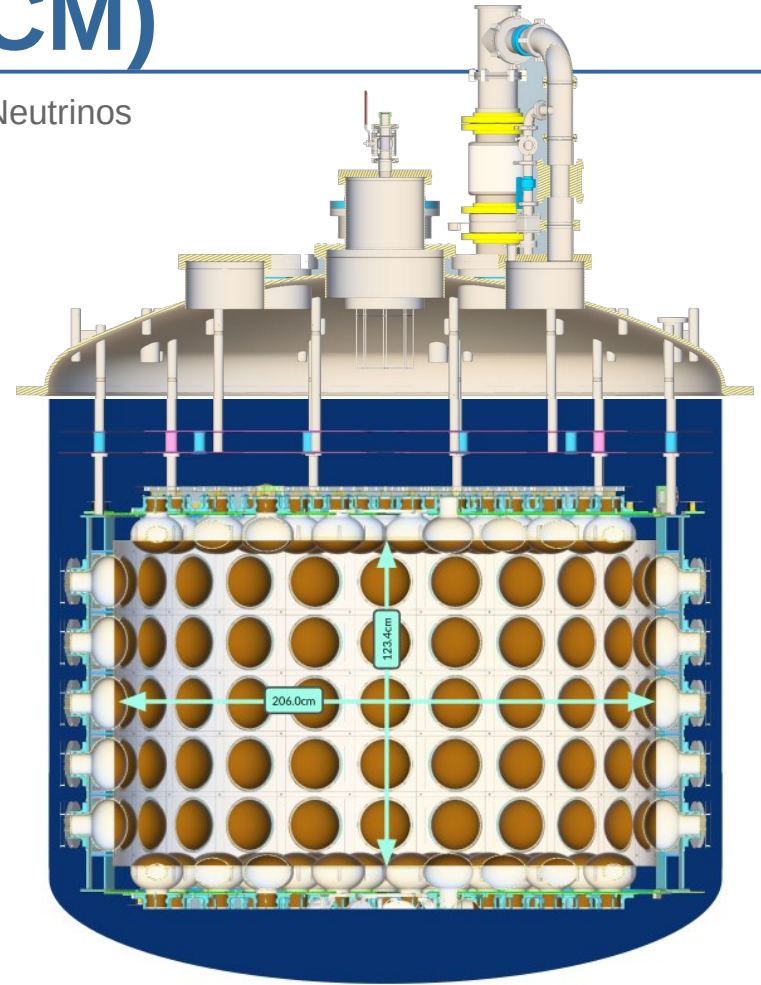


Coherent CAPTAIN-Mills (CCM)

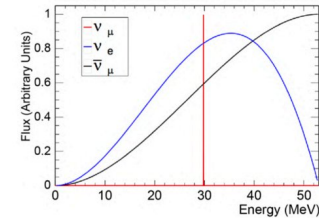
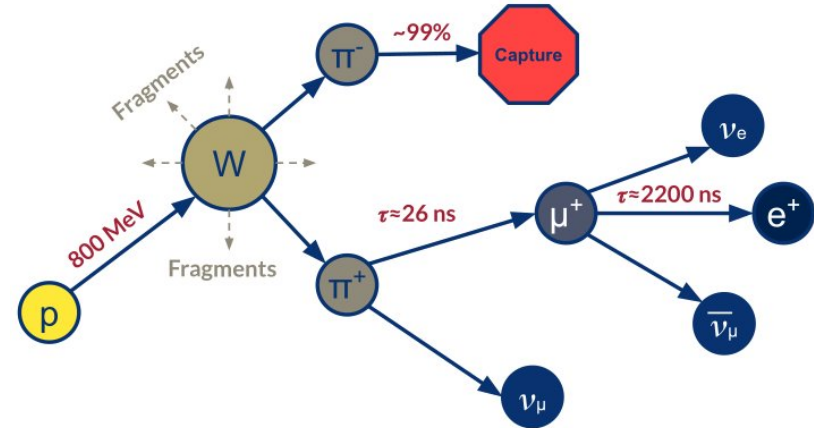
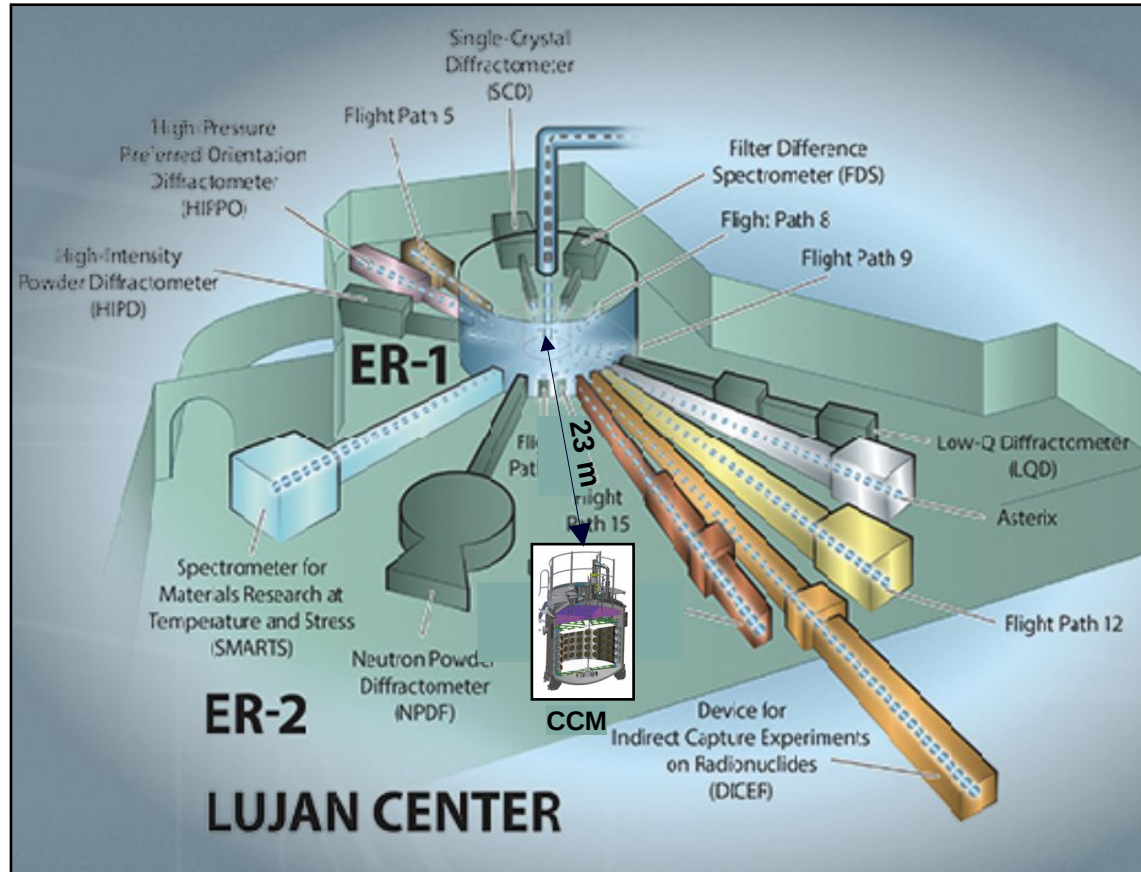
Coherent CAPTAIN-Mills (CCM)

CAPTAIN: Criogenic Apparatus for Precision Tests of Argon Interactions with Neutrinos

- Detector de argón líquido (LAr) de 10 ton: Centelleo + Cherenkov
- 200 PMTs de 8" proveen foto-cobertura de 50% del volumen activo (5 ton).
- La mayor cobertura de fotocátodos de cualquier detector de LAr basado en luz.
- Región de veto activo de 3 ton
- Electrónica rápida. tasa de muestreo de **2ns**.
- Sensible entre ~ 10 keV y ~ 200 MeV.
- 80% de PMTs cubiertos con TPB para correr la longitud de onda de la luz de centelleo del LAr.
- Láminas de TPB cubren las paredes del detector.
- Ubicado en el Laboratorio de Los Alamos
- Fuente de espalación Lujan
- Proyectó acumular 2.25×10^{22} POT en corrida de 3 años



CCM en el Centro Lujan



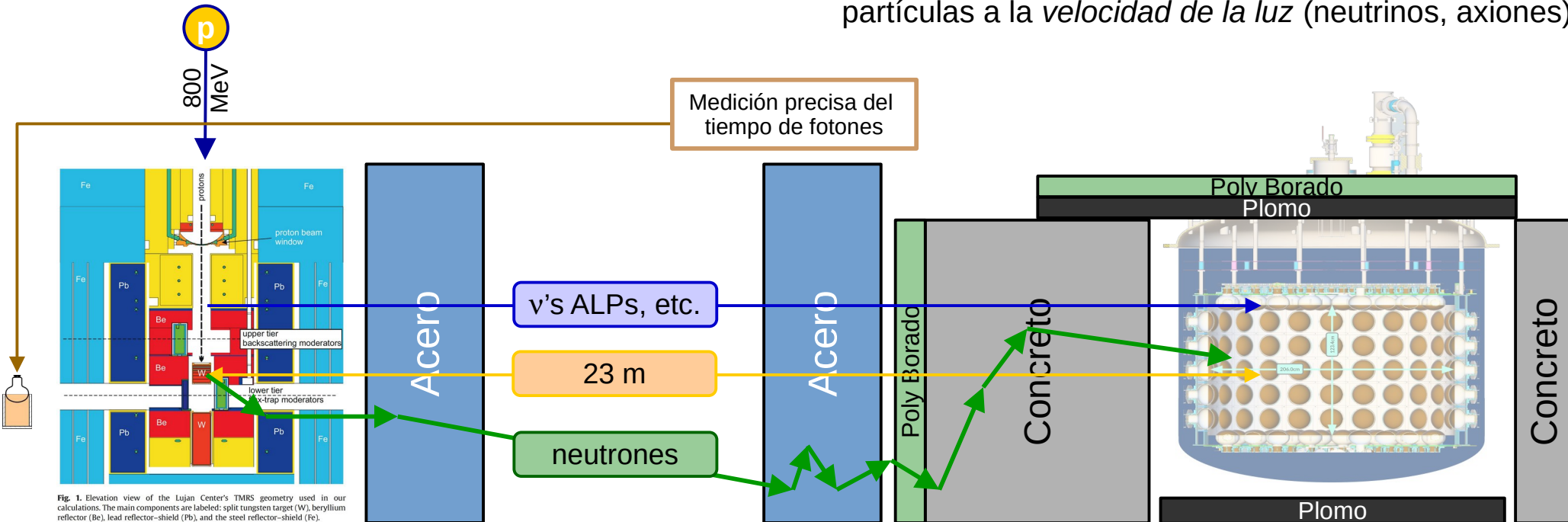
- CCM a 90° respecto al haz.
- Señal pronta de ν_μ a 30 MeV
- Señal retrasada de ν_e y $\bar{\nu}_\mu$.
- Ambiente del blanco tiene intenso flujo de: piones cargados, piones neutros, rayos gamma, muones, neutrinos y neutrones.
- Perfecto para producción del sector oscuro.

Escudamiento de CCM en Lujan

- Línea 90° respecto al haz de protones
- No backgrounds decayendo en vuelo
- Producción isotrópica de señales
- Background dominante: neutrones del blanco

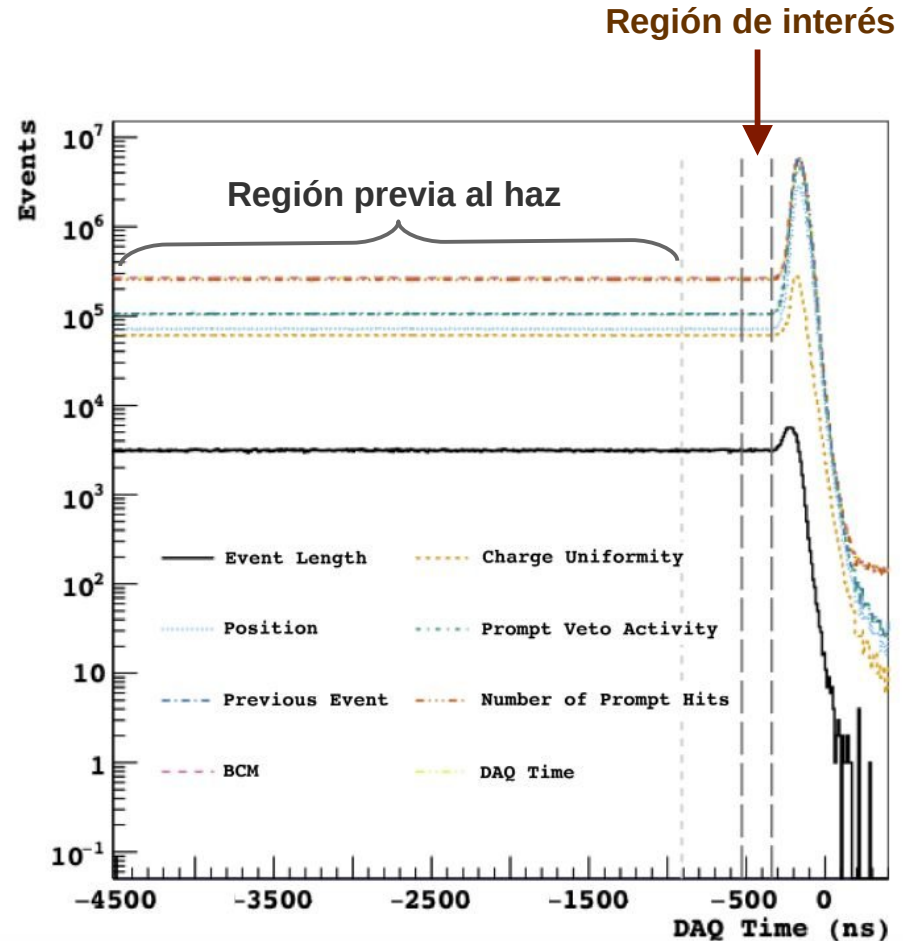
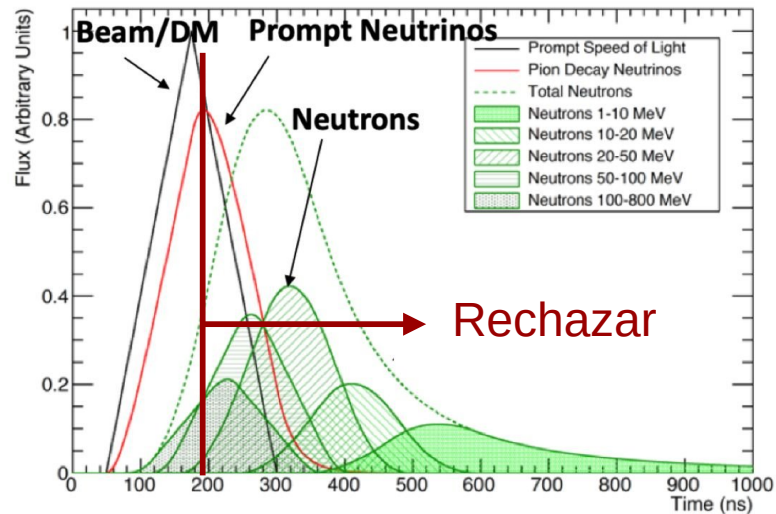
3 formas de eliminar neutrones del fondo

- Escudamiento atenúa y alenta neutrones
- Veto activo etiqueta neutrones entrantes
- **Tiempo preciso:** rechaza neutrones lentos, acepta partículas a la *velocidad de la luz* (neutrinos, axiones)



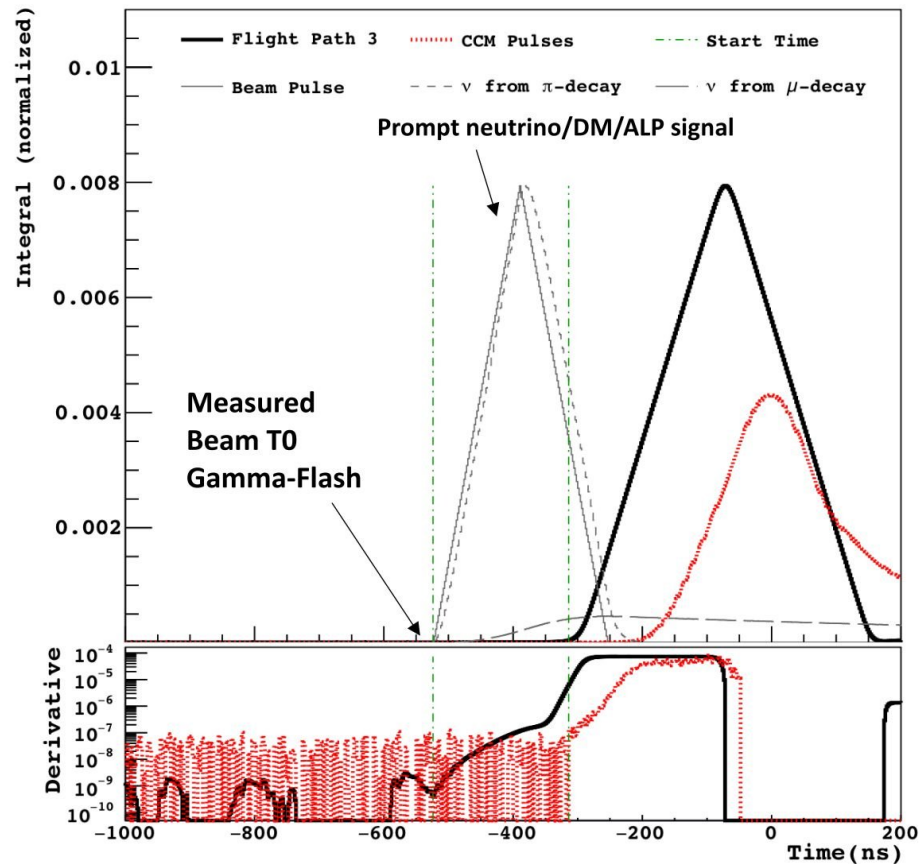
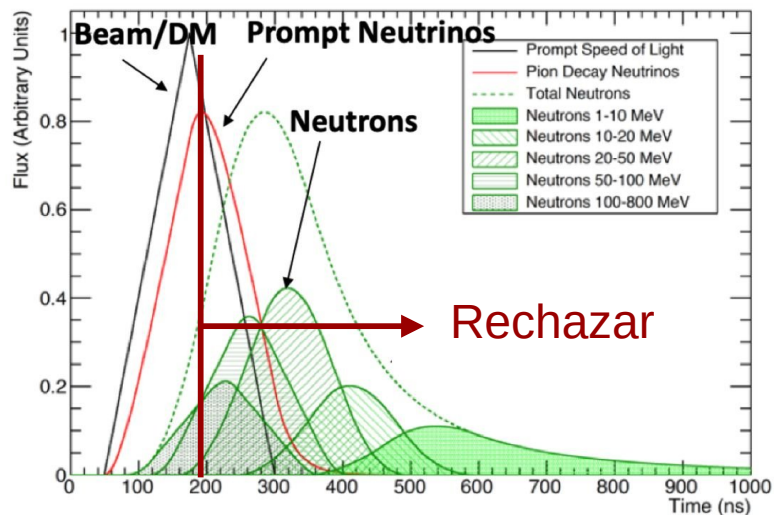
Tiempo y backgrounds en CCM

- Señales (neutrinos, APLs, MO, otros) llegan prontamente.
- Background dominante son neutrones del blanco
 - Escudamiento atenúa y alenta neutrones
 - Neutrones de fondo eliminados casi totalmente por cortes de tiempo.
- Backgrounds medidos con datos previos al haz (pre-beam)



Tiempo y backgrounds en CCM

- Señales (**neutrinos, APLs, MO, otros**) llegan prontamente.
- Background dominante son neutrones del blanco
 - Escudamiento atenúa y alenta neutrones
 - Neutrones de fondo eliminados casi totalmente por cortes de tiempo.
- Backgrounds medidos con datos previos al haz (pre-beam)



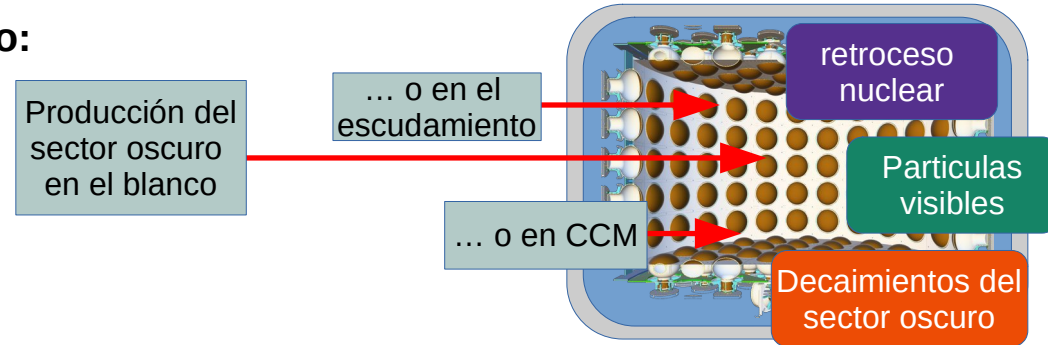
Programa de física de CCM

Amplio programa de búsquedas del sector oscuro:

- Materia oscura leptofóbica en escala de MeV. [Phys.Rev.Lett. 129, 021801 (2022)]
- Materia oscura liviana (Sub-GeV) [PhysRevD. 106, 012001 (2022)]
- Axion de QCD en escala de MeV y de Axion-Like-Particles [Phys.RevD.107.095036 (2023)]
- Soluciones del Portal de Mesones a la anomalía de MiniBooNE [Phys.Rev.D 109,095017 (2024)]

Otros análisis de interés:

- Búsqueda de la partícula ATOMKI X17
- Búsqueda de Leptones neutros pesados



Mediciones críticas del Modelo Estándar

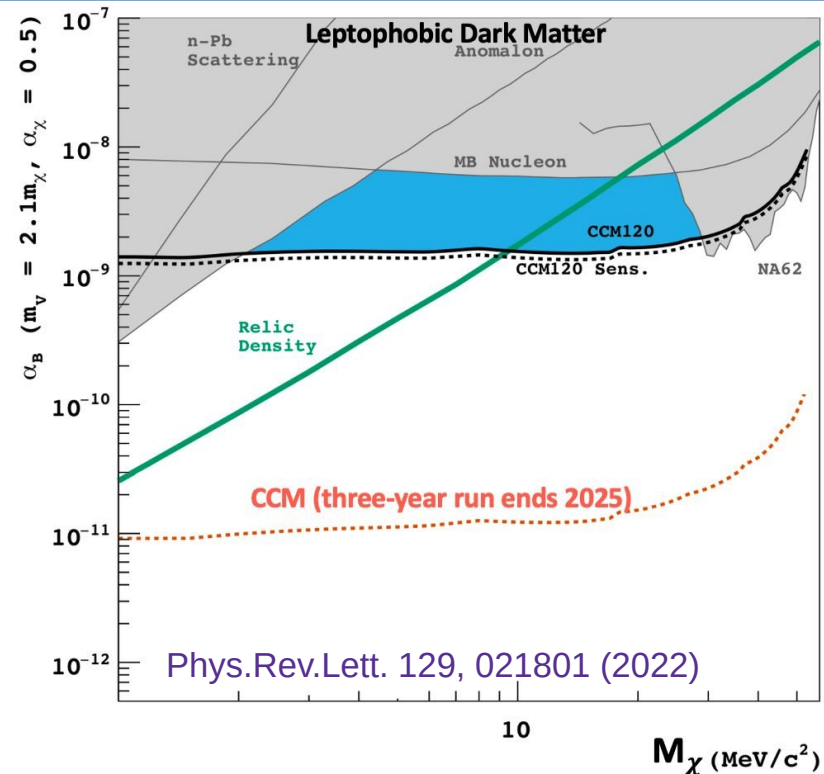
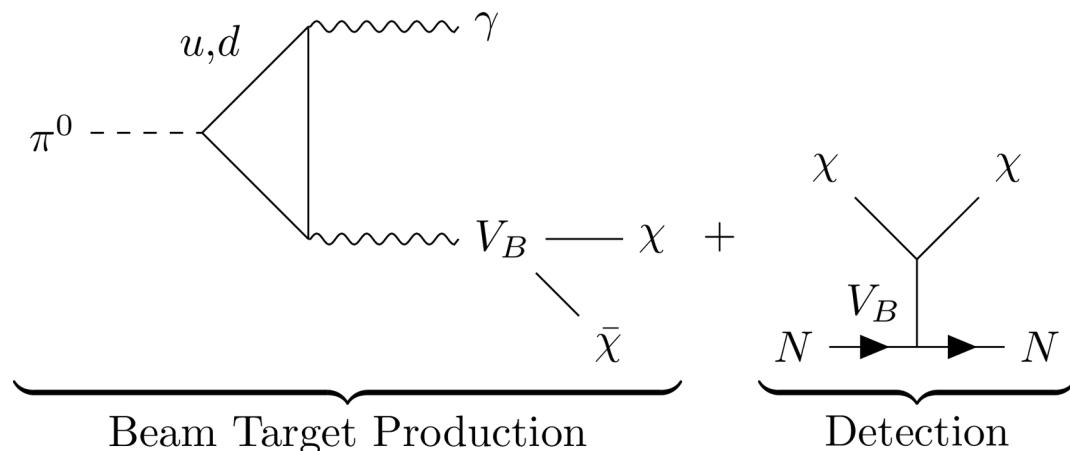
- Sección eficaz de CEvNS en el rango de 10 keV a 100 keV.
- Medición de secciones eficaces de CC y NC de ν 's en Argon en el rango de ~ 1 a ~ 50 MeV.

Desarrollo de nuevas técnicas

- Detección de luz Cherenkov (detector Híbrido)
- Ajuste de parámetros ópticos con simulación diferencial.

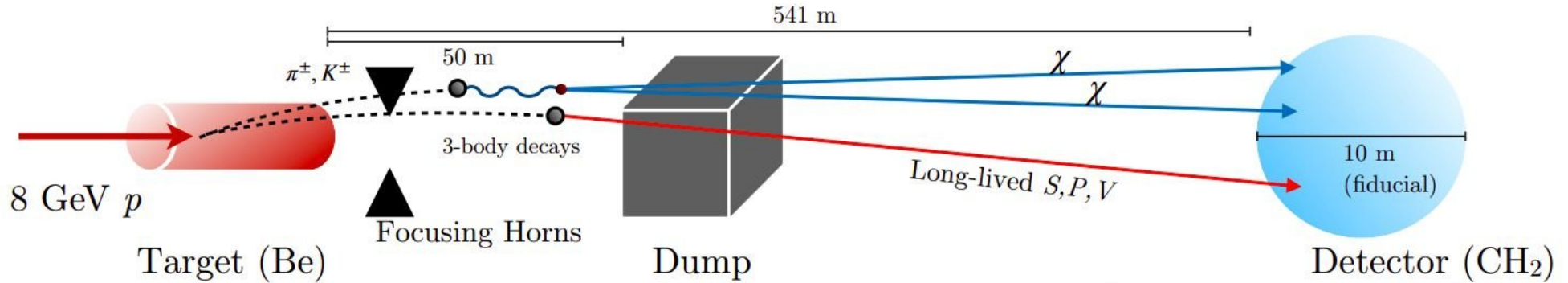
Materia oscura Leptofóbica

- Modelo con un candidato escalar χ a MO.
- Portal vectorial comunicado con los quarks del ME por número bariónico promovido a simetría local de norma.
- Producción en un decaimiento raro del π^0 en el blanco.
- Detección por dispersión coherente en núcleos de Argón (\rightarrow retroceso nuclear de baja energía)



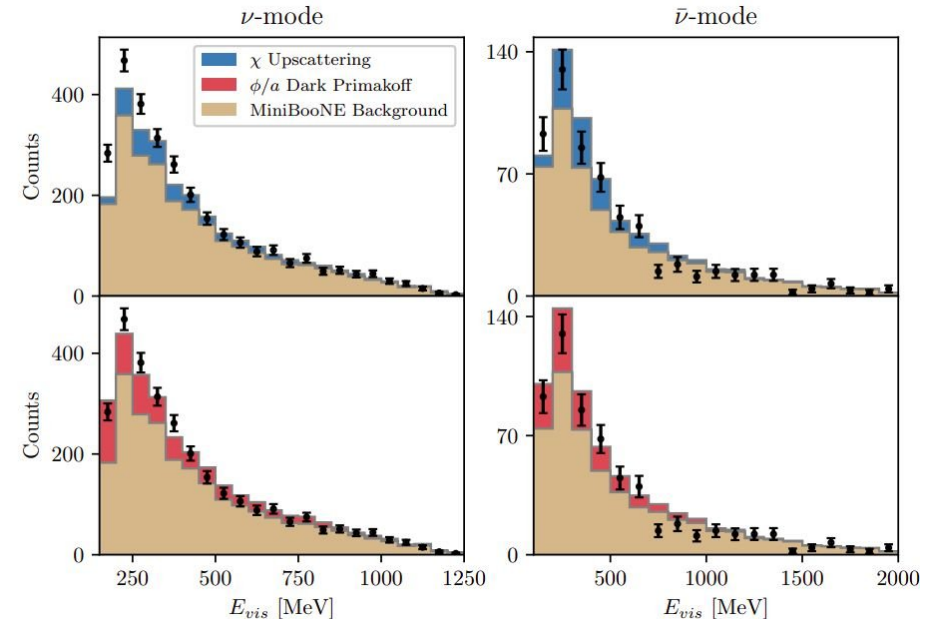
- CCM explora MO relativista producida en un acelerador ($m_V \sim 10$ MeV -rango poco explorado-
- No limitado por abundancia y masa del mediador (como en búsquedas directas de reliquias térmicas)

Explicaciones del Sector oscuro al exceso de MiniBooNE



Dutta B. et al. PRL 129 (2022) 11, 111803

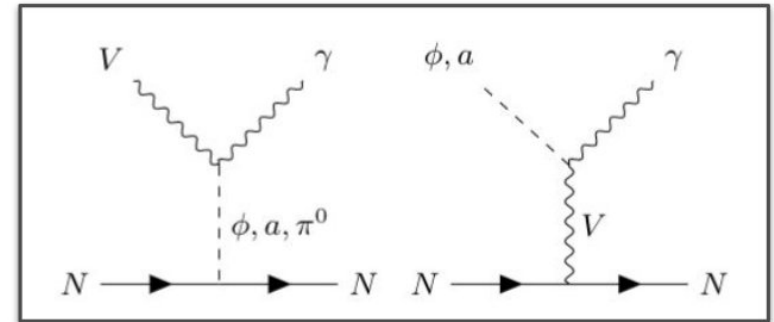
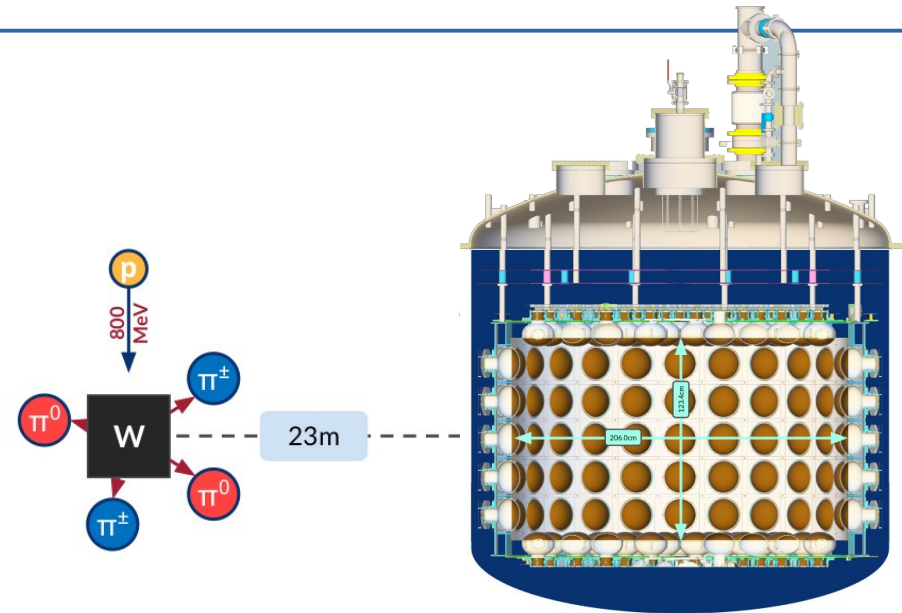
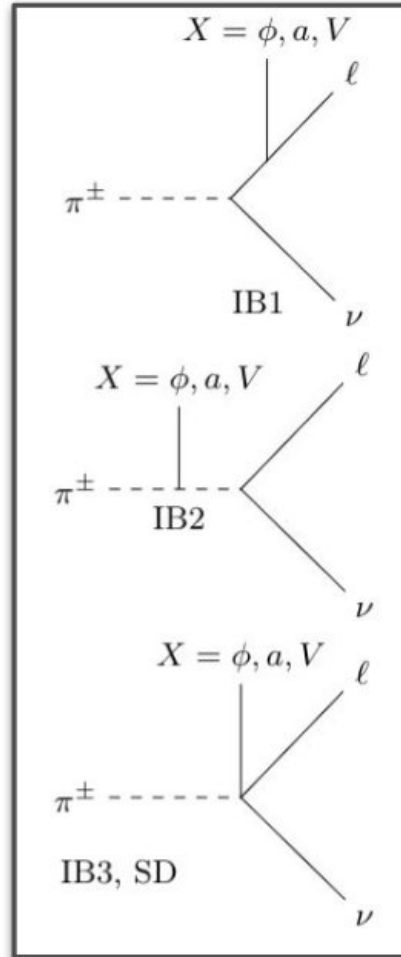
- **Exceso de 4.8σ** en corridas de ν y $\bar{\nu}$ de MiniBooNE
- **No exceso** en corrida de vertedero (*beam dump*)
- Si el exceso está correlacionado al decaimiento de mesones, podría deberse a nuevas partículas de larga vida (**LLPs**) o materia oscura liviana (**LDM**).
- CCM puede poner a prueba esta posibilidad.



Dark Sector Coupling to Meson Decay (DSCMD)

Idea general: muchos posibles operadores para explicar el exceso de MiniBooNE.

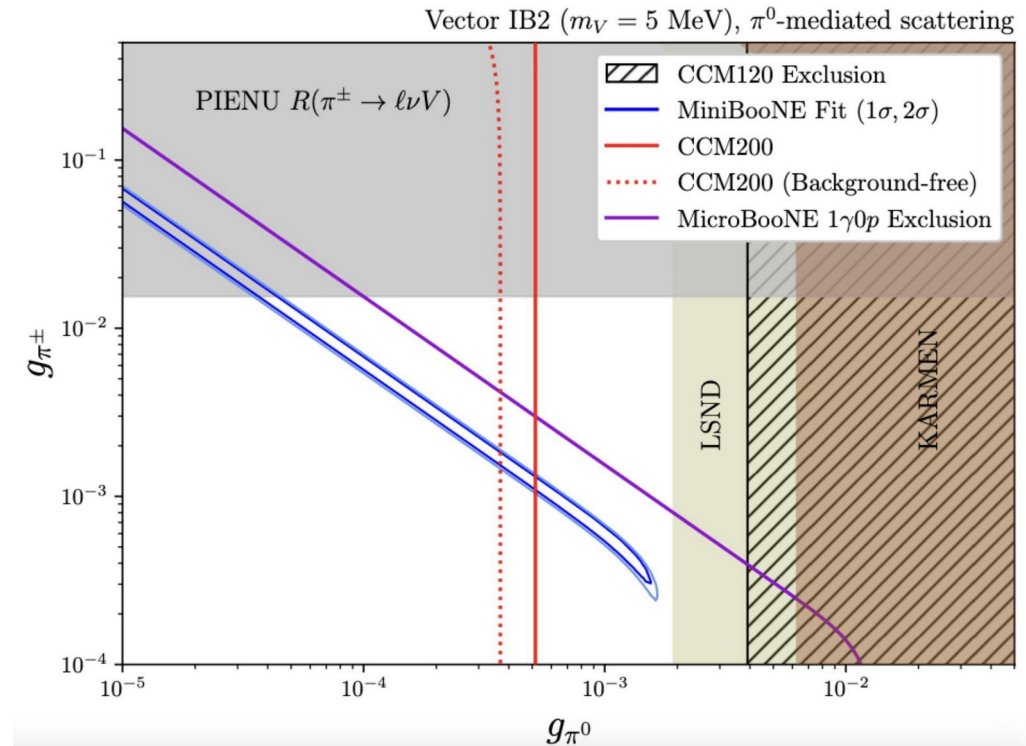
CCM puede probarlos sistemáticamente con decaimientos de piones **cargados** y neutros.



DSCMD en CCM

- Explicación propuesta para el exceso de bajas energías de MiniBooNE (MB).
- Decaimiento de mesones a tres cuerpos, produciendo un escalar (o pseudoescalar)
- 3 body meson decay producing scalar (or pseudo-scalar)
- Interactúa visiblemente en el detector
- CCM puede constreñir el espacio de parámetros de MB (curva azul) con las proyecciones actuales del background.
- Medición puede romper posibles degeneraciones entre modelos con otros experimentos.

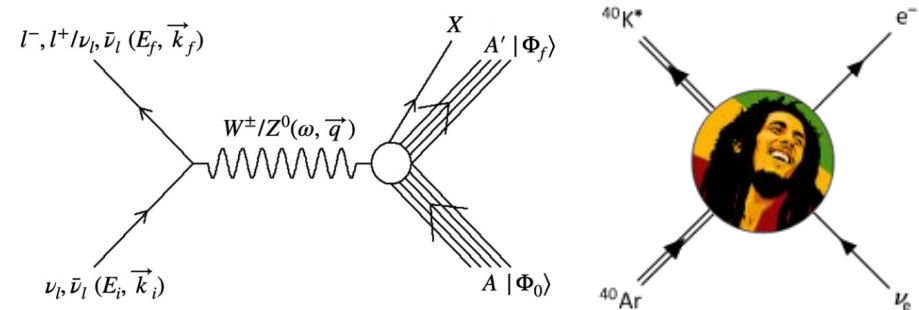
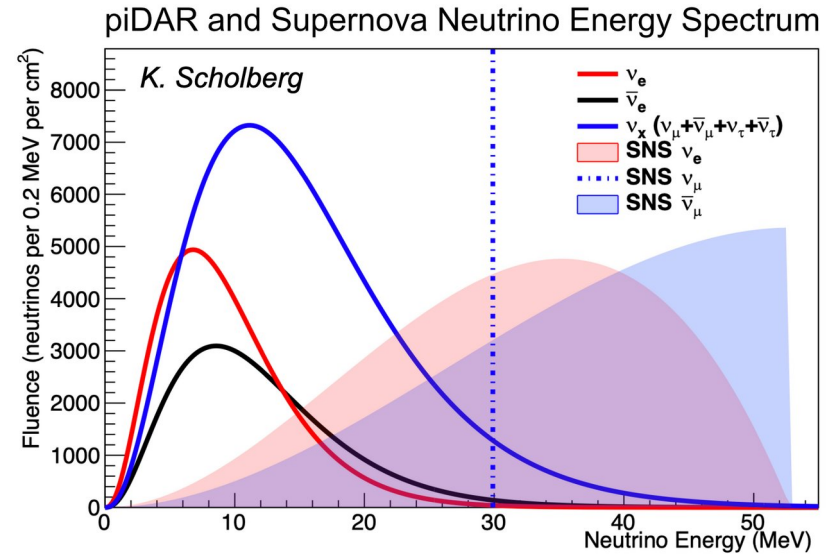
Phys.Rev.D 109,095017 (2024)



Conexión interesante:PIENU: PRD 103 (2021) 5, 052006

Sección eficaz de Corriente cargada

- Primera medición de interacciones de CC en argón $E_\nu < 50$ MeV.
- Espectro de energías de π DAR traslapa con el espectro esperado de supernovas.
- **Principal canal para la física de supernovas de DUNE**
- Física modelada con SIREN y MARLEY, propagación de estados finales en el detector basada en Geant4
- Se espera una medición con incertidumbre de $\sim 20\%$
- Medición de $CC\nu_e$ en Ar ($\nu_e + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow {}^{40}\text{K}^* + e^-$) a cargo de **Marisol Chávez Estrada** (asesor J.C. D'Olivo).



Contribuciones del grupo del ICN a CCM

- J. Plata Salas (Física, 2022, asesor Aguilar).
 - Pruebas de los PMT y sistema de fotodetección de CCM120 (Private Pyle)
 - Simulación preliminar del detector (Rat Pack / Geant4)
 - Instalación de los PMTs en CCM120.
- Marisol Chávez Estrada (PCF, Doctorado, asesor D'Olivo)
 - A cargo de la medición de CCv_e en Ar.
 - En estancias en Los Alamos ha estado a cargo de operaciones in situ, llenado de argón, experto on-call.
 - Desarrollo de herramientas diversas para el CCM AnalysisFramework.
 - Estudio de calibración de electrones michel (background para XS CCv_e)
- Cristian Macías Acevedo (PCF, Maestría, asesor Aguilar).
 - Inyector de partículas cosmogénicas (muones, neutrones, etc),
 - Estudios de calibración del detector con muones cosmogénicos en escala de 10-200 MeV.
 - Implementación del “quenching factor” en simulación de neutrones.

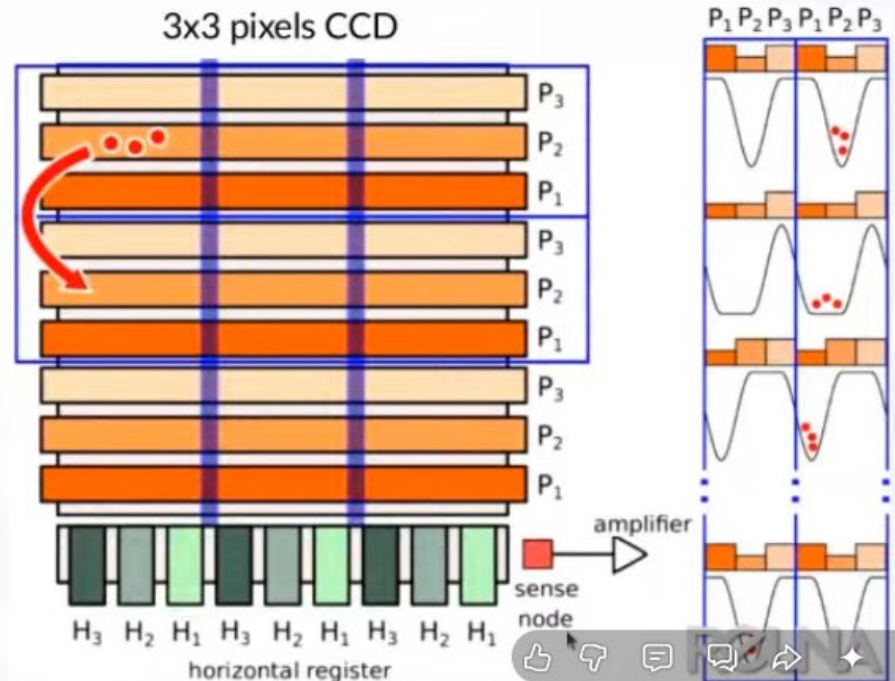
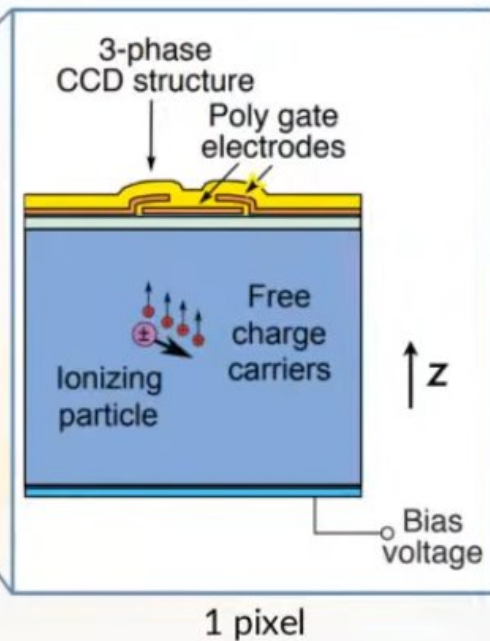
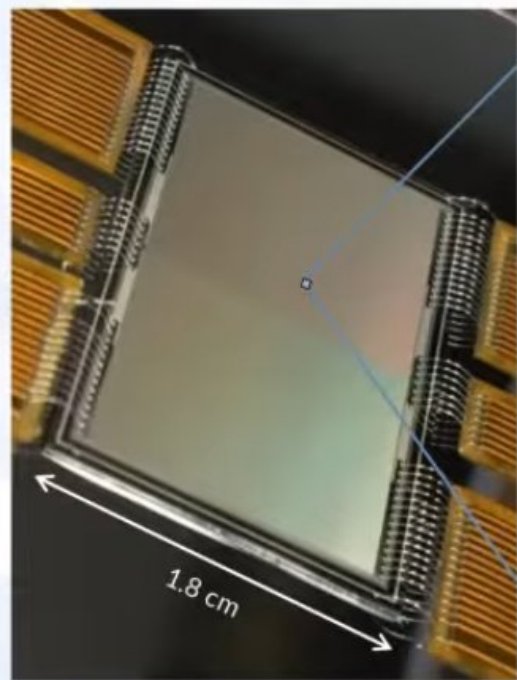
Charge Coupled Devices (Dispositivos de Carga Acoplada)

Dispositivos de carga acoplada (CCD)

Los CCD son **detectores de ionización pixelados**.

Radiación ionizante produce pares electrón-agujero en la región sensible.

La carga se colecta cerca de la superficie y se transporta a lo largo de la CCD hasta la etapa de lectura .



Dispositivos de carga acoplada (CCD)

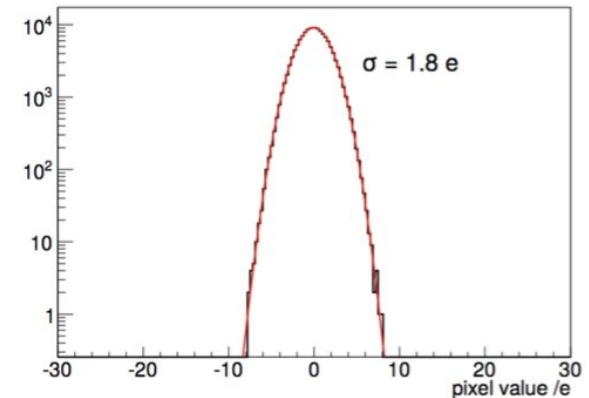
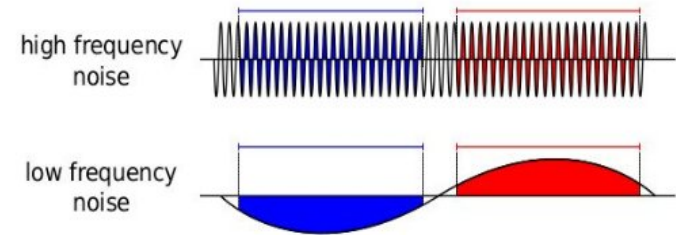
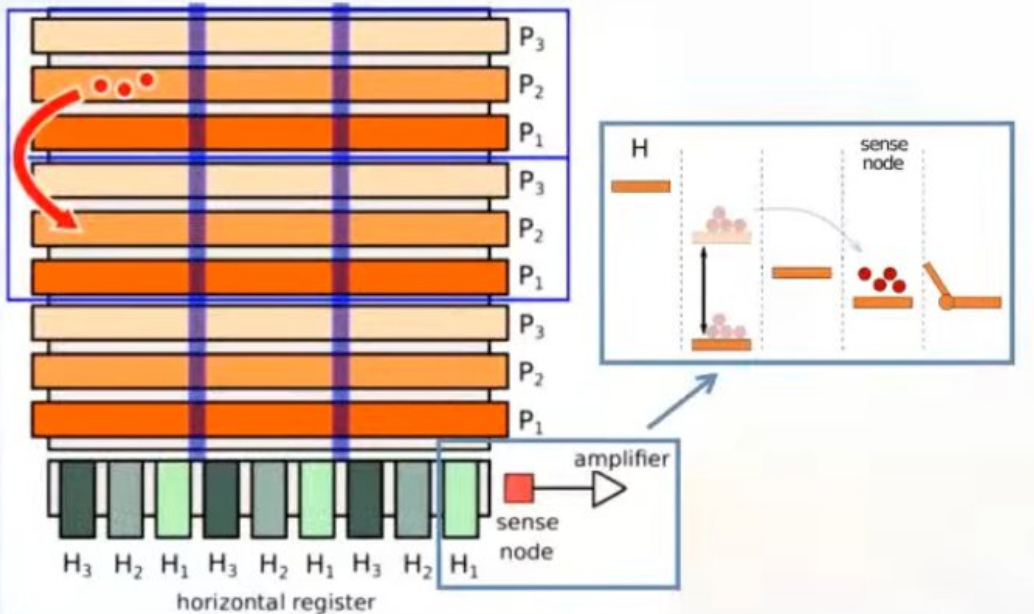
Carga medida por **muestreo doble correlacionado**:

- Integración de **Pedestal** (nodo sensor vacío) $\times 1$
- Integración de **Señal** (nodo sensor con carga)

valor de carga = **Señal** - **Pedestal**

El ruido de baja frecuencia no promedia a cero.

CCD de 3 x 3 pixeles



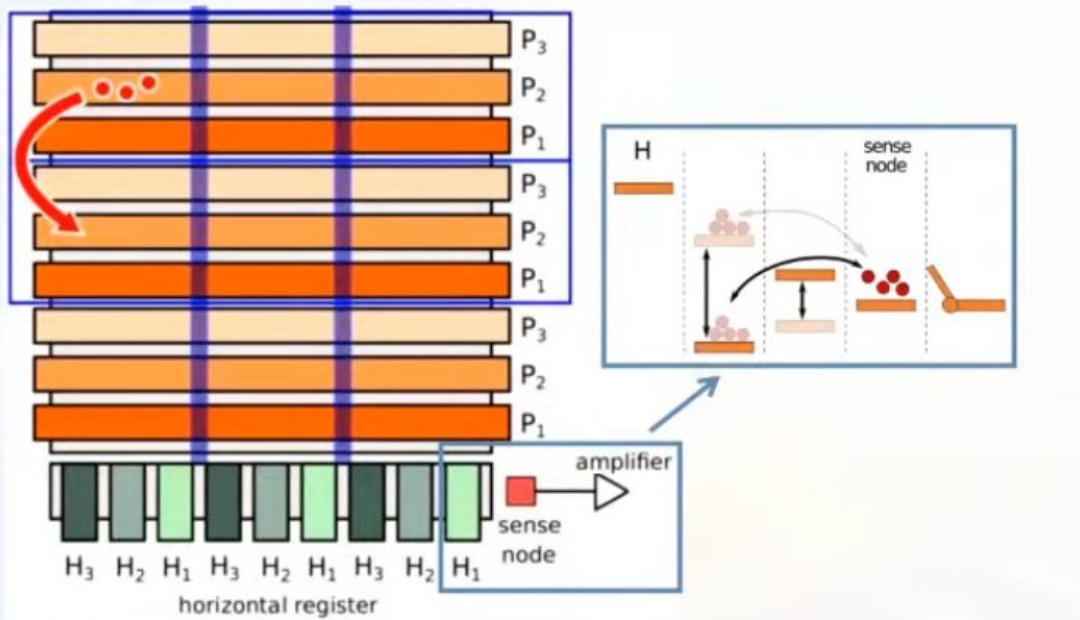
Skipper-CCD: dispositivos de conteo de e-

Etapa de lectura de Skipper-CCDs permite **múltiples mediciones de cada carga**.

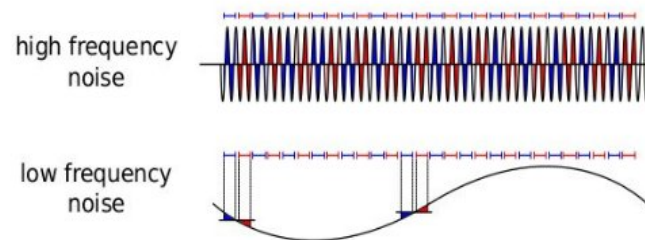
- Integración de **Pedestal** (nodo sensor vacío) $\times N$
- Integración de **Señal** (nodo sensor con carga)

$$\text{valor de carga} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{Señal}_i - \text{Pedestal}_i)$$

CCD de 3 x 3 pixeles



El ruido de baja frecuencia promedia a cero!



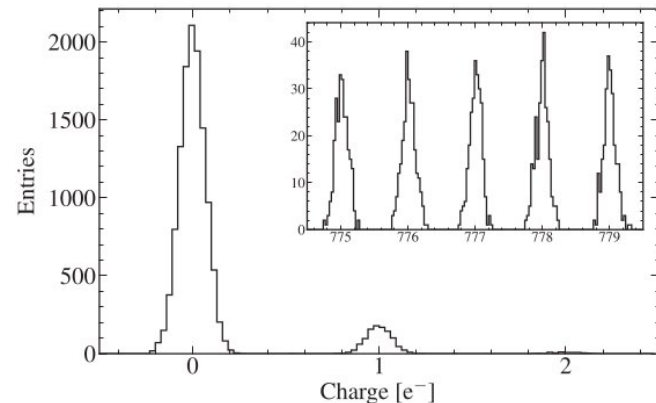
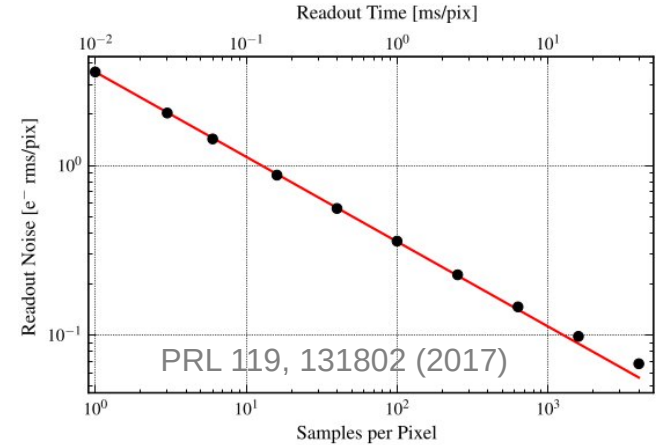
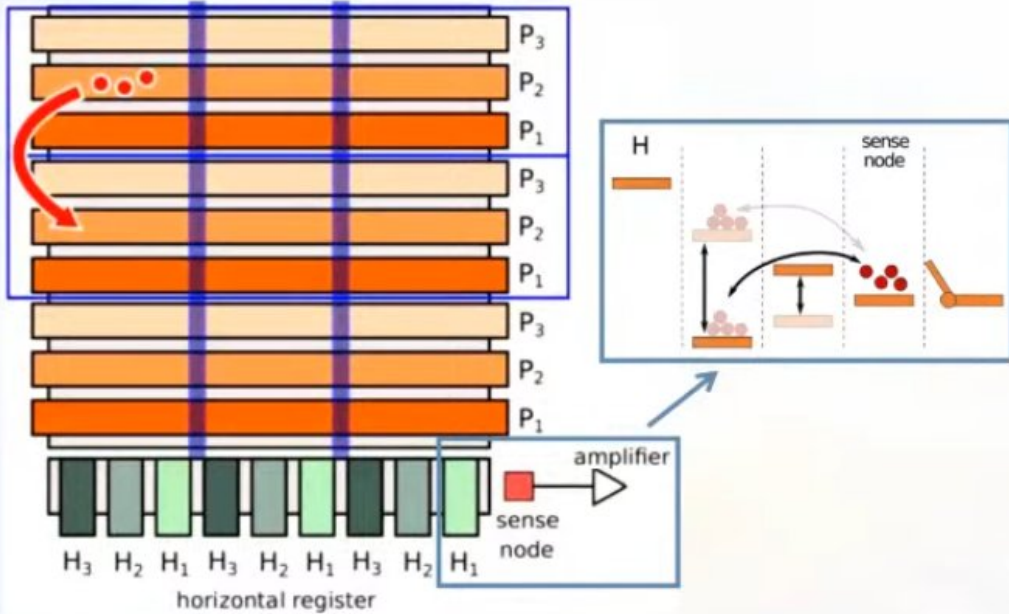
Skipper-CCD: dispositivos de conteo de e-

Etapa de lectura de Skipper-CCDs permite **múltiples mediciones de cada carga**.

El ruido decrece como $\sigma = \frac{\sigma_1}{\sqrt{N}} \rightarrow$ **conteo preciso de e-**

Precio a pagar: *mayor tiempo de lectura*

CCD de 3 x 3 pixeles



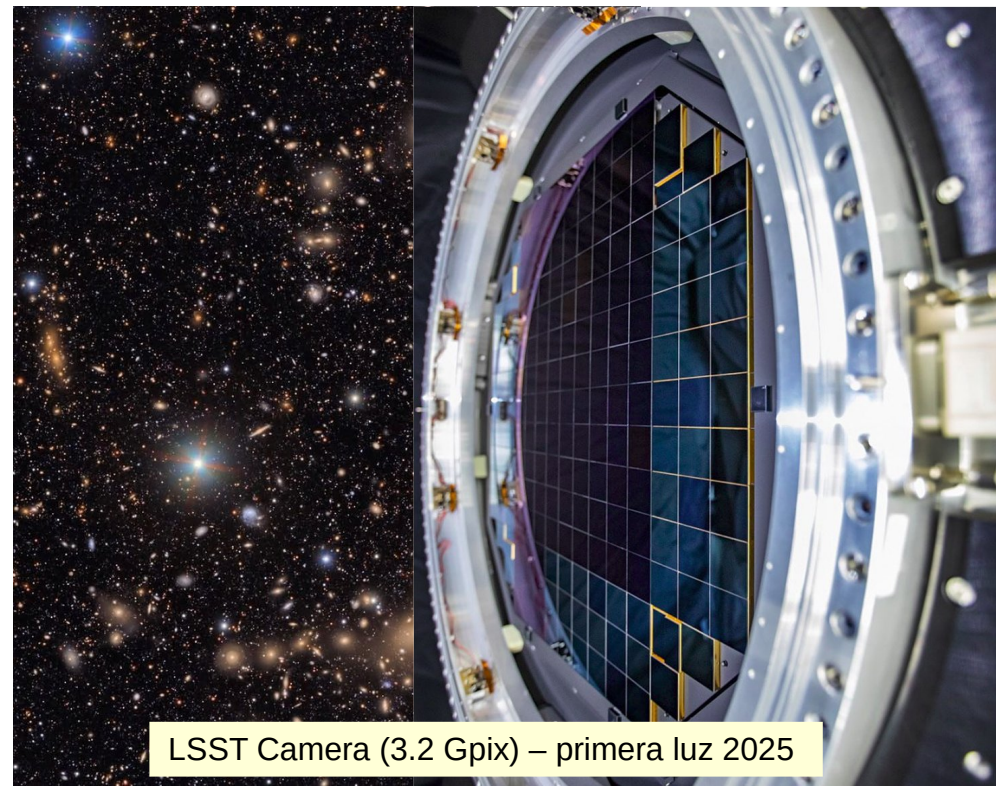
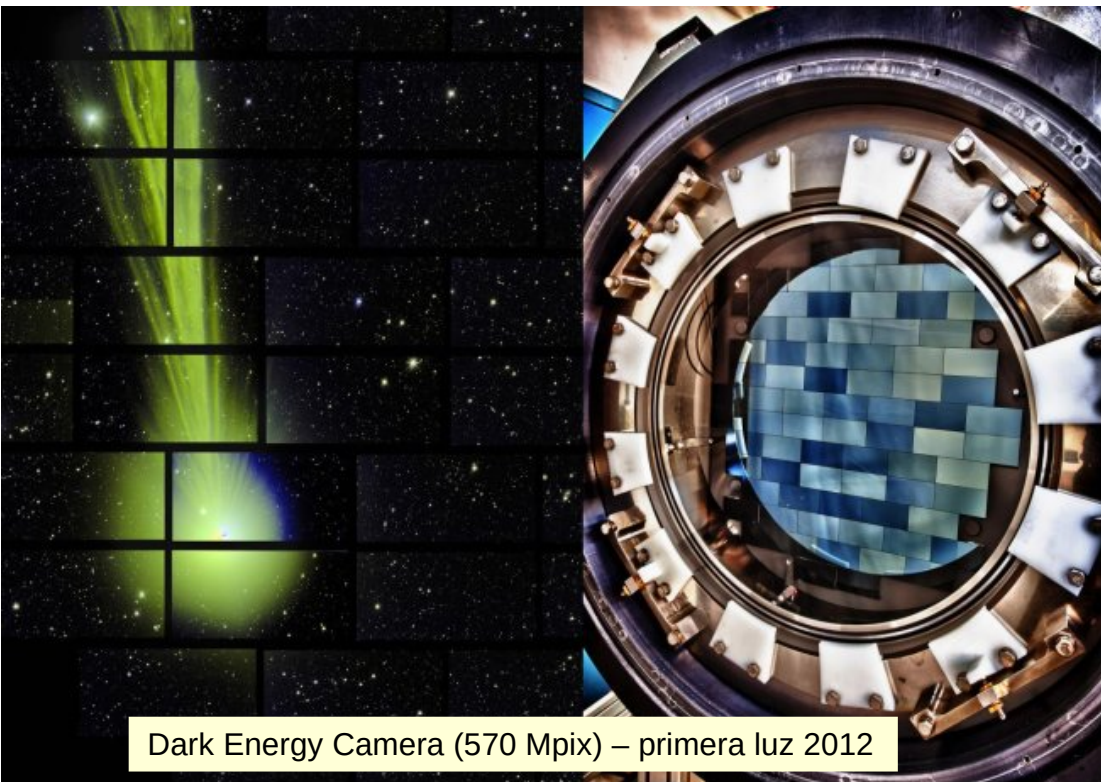
CCDs en cámaras astronómicas

Usados en astronomía desde su invención en 1970 por sus excelentes cualidades:

Gran resolución espacial ($\mu\text{m}/\text{pix}$)

bajo ruido de lectura ($<3e^-$)

baja corriente oscura ($\sim e^-/\text{pix}/\text{hr}$)

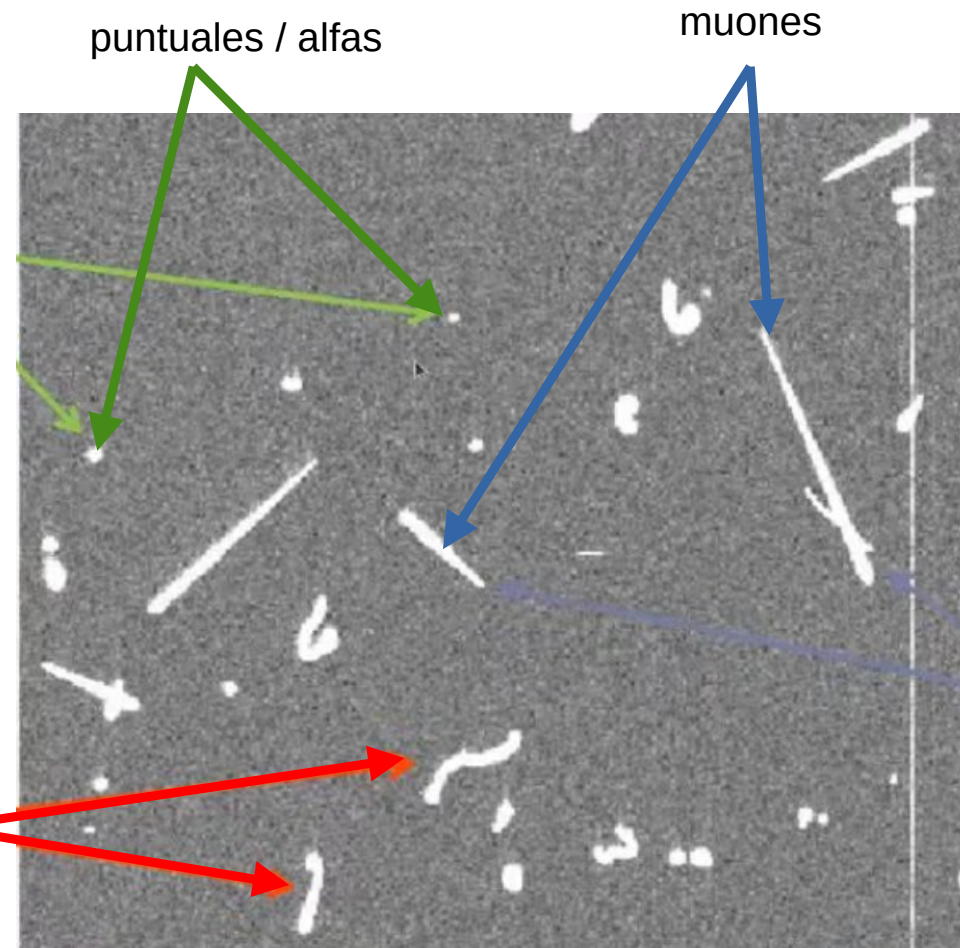


CCD Científicas: detectores de partículas

Los CCD no solo son sensibles a fotones sino a partículas ionizantes.



Rayos cósmicos ensuciando una imagen astronómica

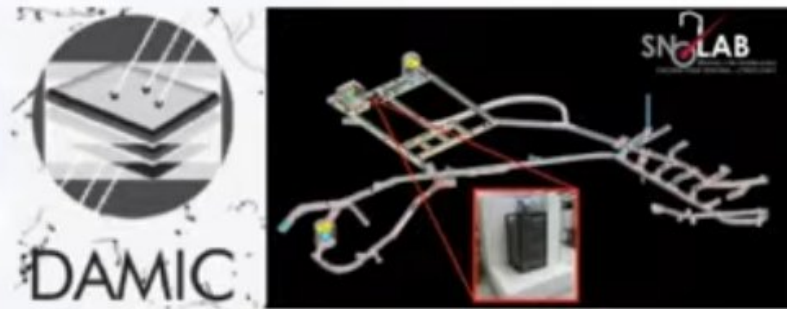


Materia Oscura y Neutrinos con CCDs

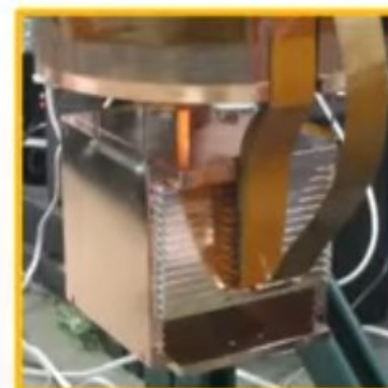
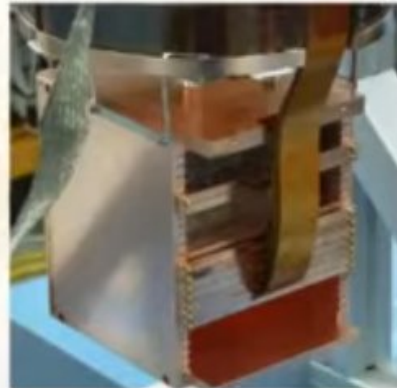
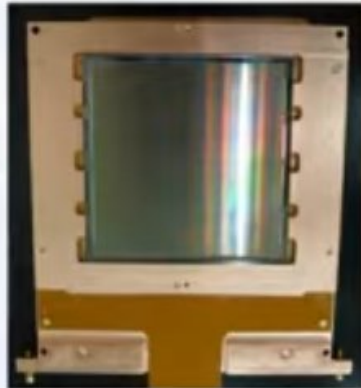
CCDs gruesas, inicialmente para sensibilidad IR \rightarrow suficiente masa para experimentos de física de partículas.

Sensibles a bajas deposiciones de energía por su bajo umbral (eV) y baja corriente oscura (e-/pix-día)

Dark Matter



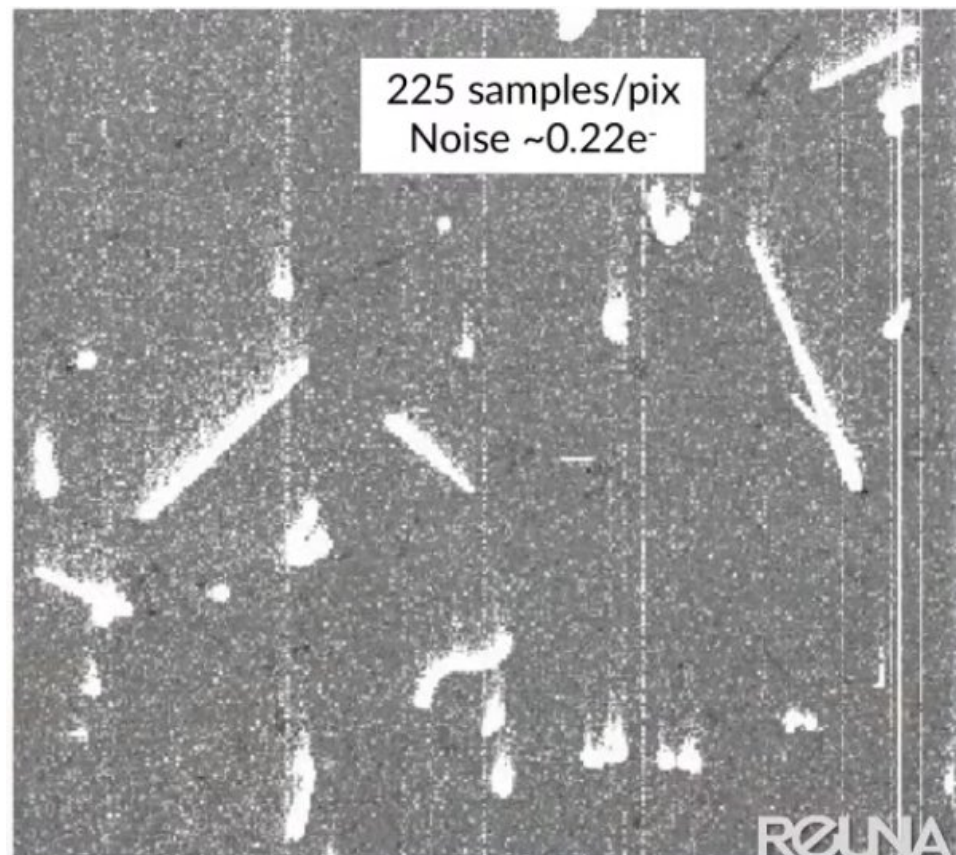
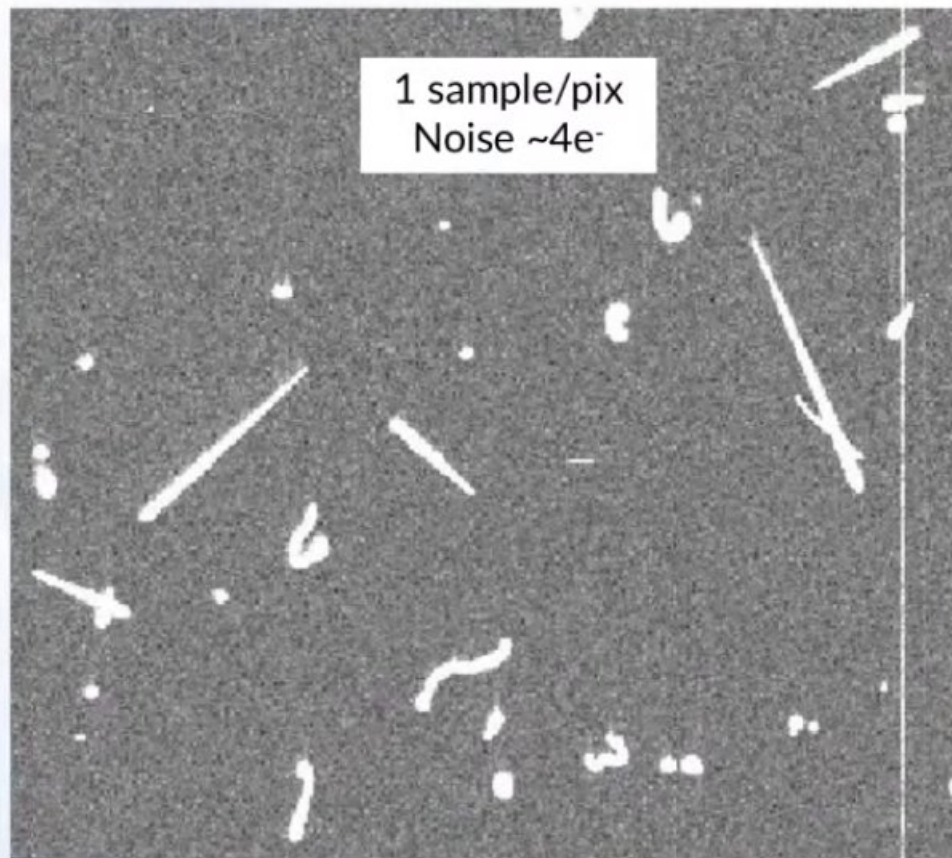
Neutrinos



ICUNA

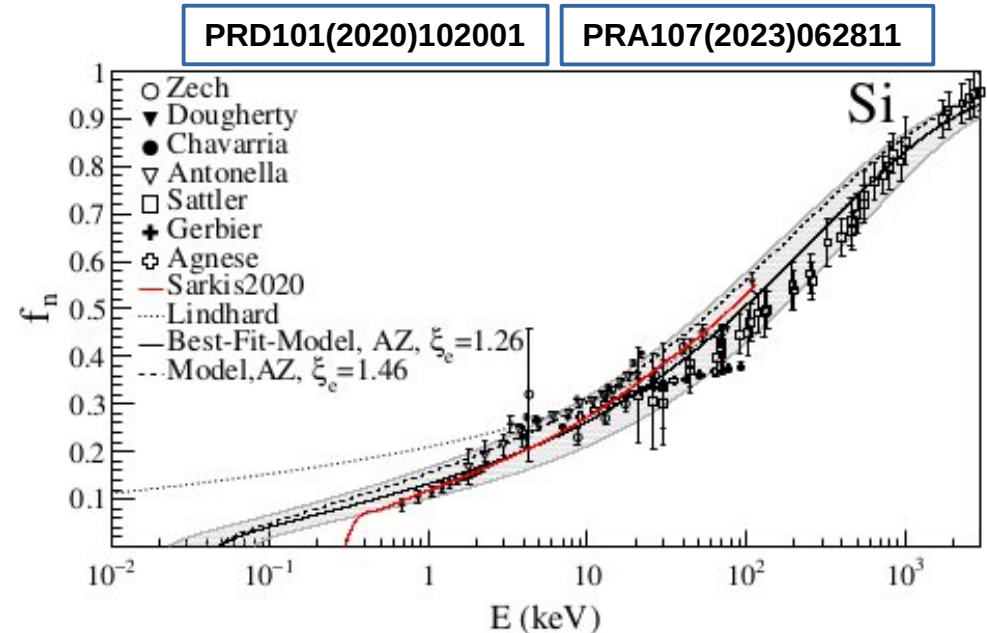
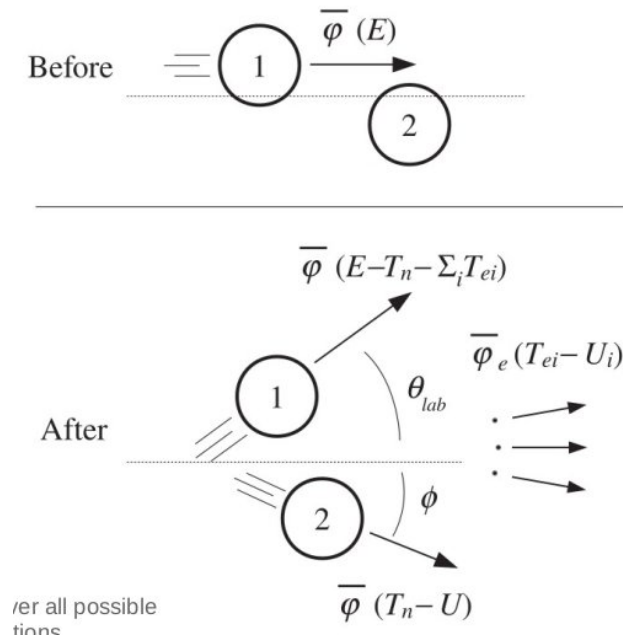
Skipper-CCD científicas (gruesas)

Nivel de ruido sub-electrónico **permite explorar lo que es invisible** en CCDs estándar



Quenching Factor (retr. nucleares)

- Y. Sarkis desarrolló un modelo para la eficiencia de ionización de retrocesos nucleares en materiales puros (Si & Ge), extendiendo el modelo de Lindhard para incluir la energía de amarre.
- Crucial para calcular tasas de eventos en experimentos de búsqueda directa de MO y CEvNS.



DAMIC

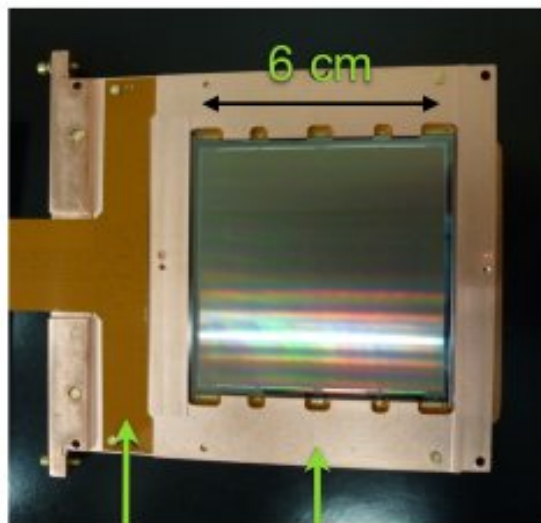
Colaboración DAMIC@SNOLAB

11 institutions
from 6 countries



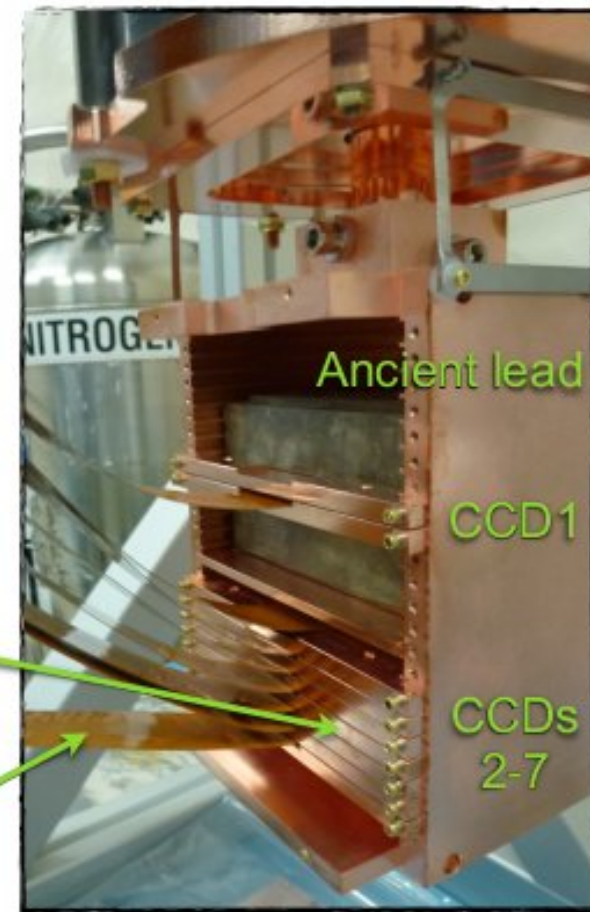
DAMIC @ SNOLAB

- Ubicado en SNOLAB (6000 m.w.e. bajo tierra).
- 7 CCDs (6.0 g, 16 Mpix) enfriado a 140 K.
- Escudo pasivo: 20 cm de plomo (interior de Pb antiguo 5 cm) y 40 cm de polietileno.
- Background total: ~ 10 d.r.u. (cuentas/d kg keV)
- Bajo ruido de pixel $< 2 e^-$.
- Extremadamente baja corriente de fuga $2 \times 10^{-22} \text{ A cm}^{-2}$.



Copper trays
(EF for CCD1)

Kapton signal flex



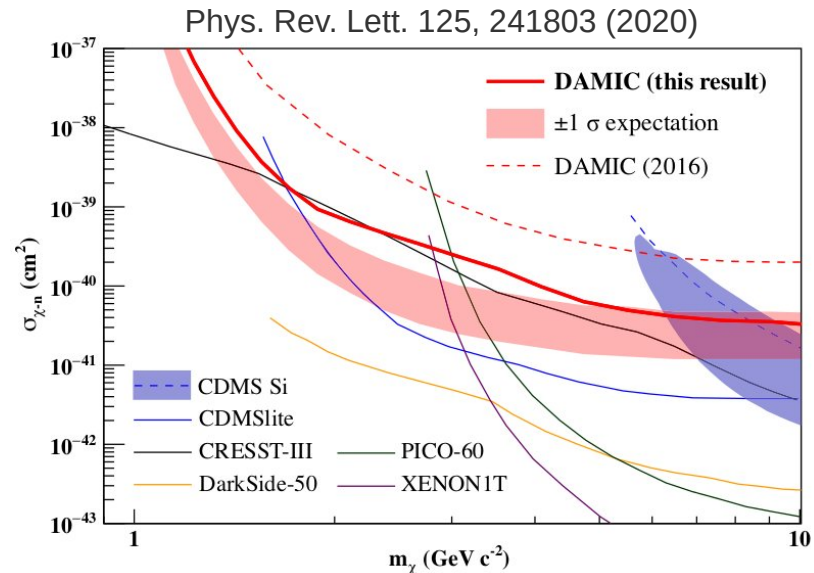
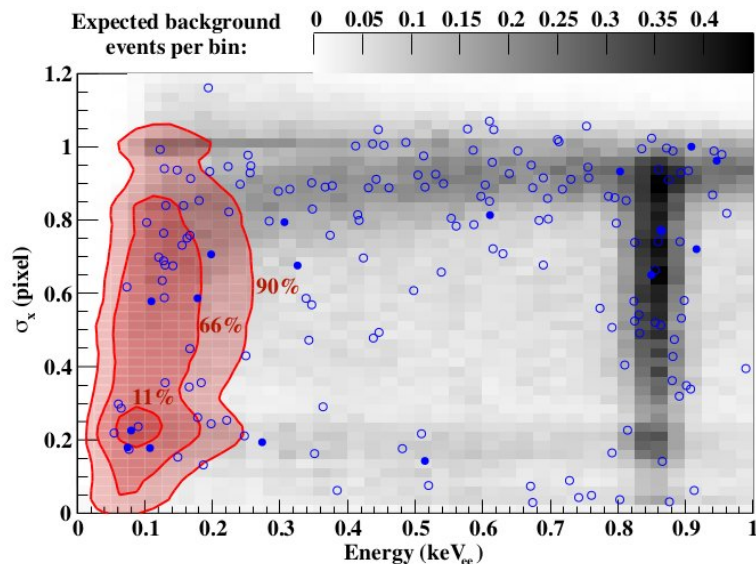
Ancient lead

CCD1

CCDs
2-7

Resultados: búsqueda de WIMPs.

- 11 kg-day de exposición con arreglo de 7 CCD y umbral de energía de 50 eV_{ee} .
- 1^{er} modelo completo del background en CCDs. Phys. Rev. D105, 062003 (2022)

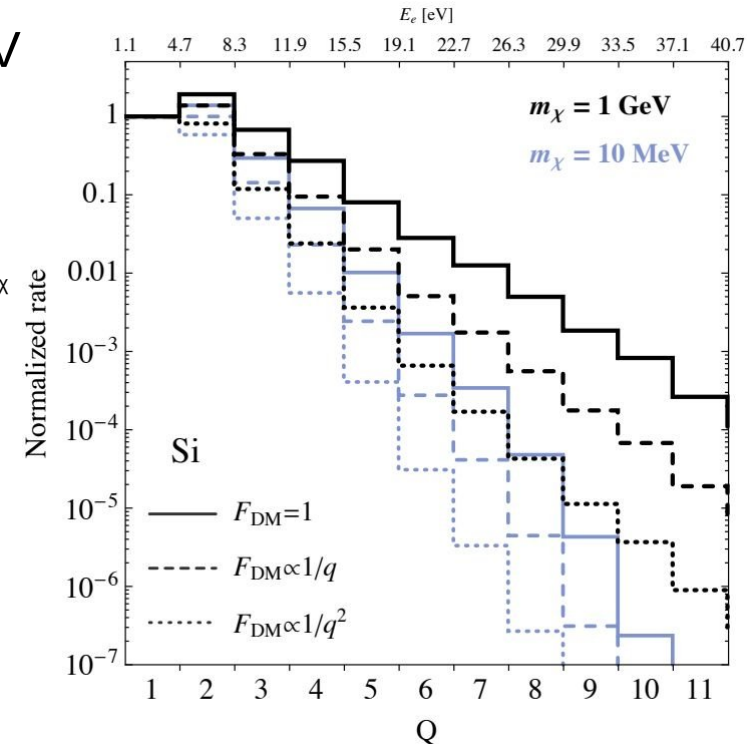
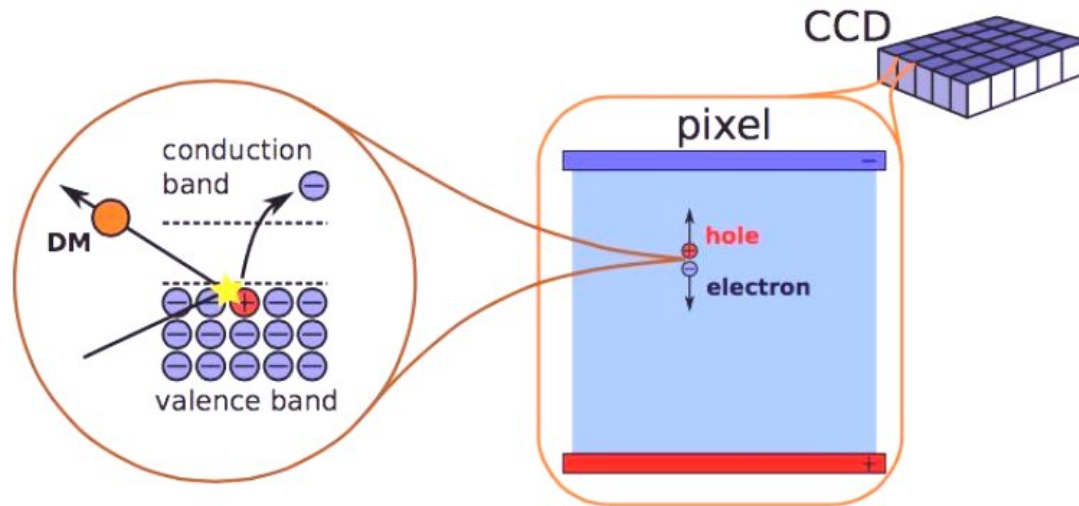


Exceso de 17.1 ± 7.6 eventos de baja energía ($67 \pm 37 \text{ eV}_{ee}$)

- Parecen estar en el “bulto”. No se puede reproducir exceso con población de superf.
- Ninguna de las componentes conocidas del background pueden explicar el exceso.
- Fuente de ruido no identificada? Modelación imperfecta de la respuesta al bkgd. superficial?

Retrocesos electrónicos en Si

- **Dispersión MO- e^-** : MO con m_χ en el rango de MeV-GeV puede transferir algunos eV de energía a e^- ($\sim E_{gap}$ en semiconductores).
- **Absorción de MO**: Transferencia de energía igual a m_χ
- Transferencia de energía crea ionización y se pueden medir el número de pares electrón agujero ($e-h$).



(R. Essig *et al.*, arXiv:1509.01598)

$$Q = 1 + \text{int}[(E - E_{gap}) / \epsilon_{e-h}]$$

$$E_{gap} = 1.1 \text{ eV},$$

$$\epsilon_{e-h} = 3.7 \text{ eV}$$

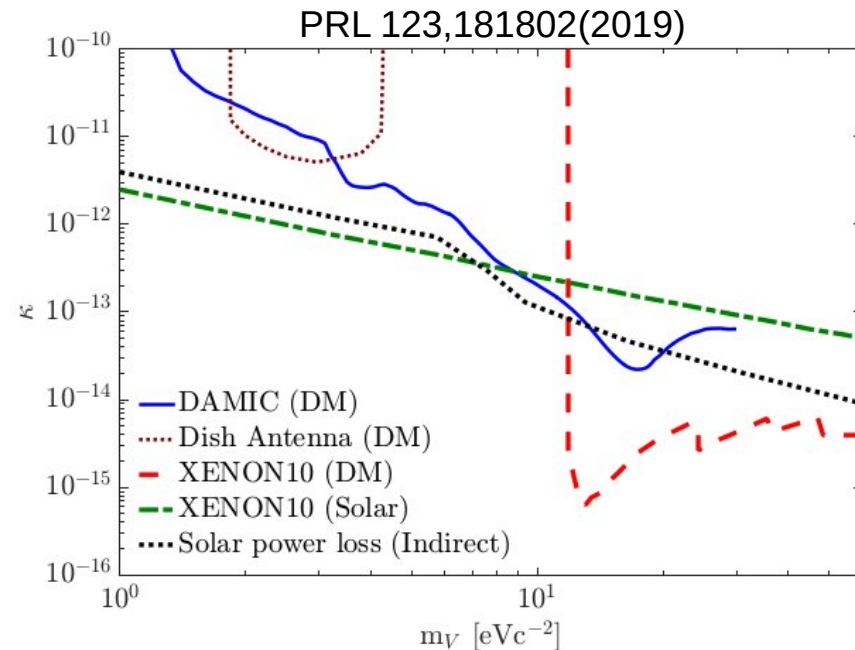
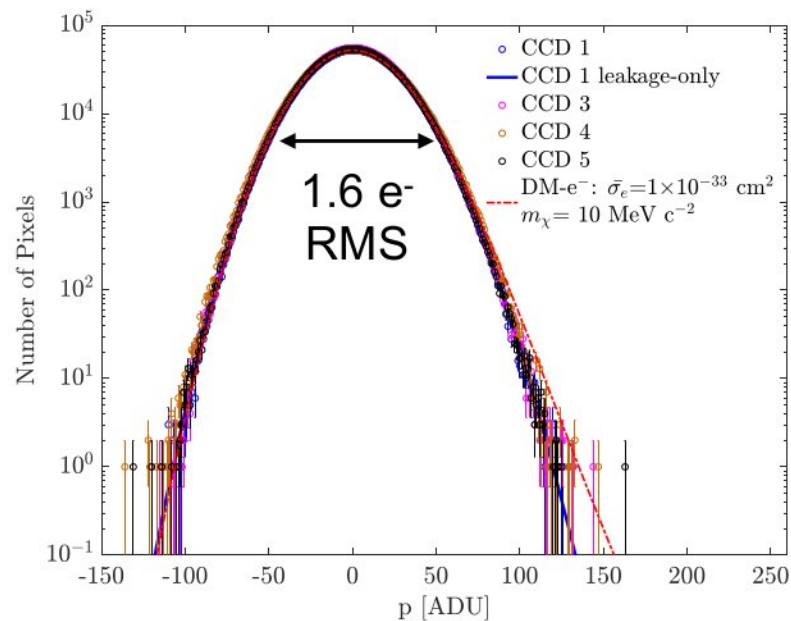
Silicio

DAMIC resultados recientes

Interacciones MO- e^- :

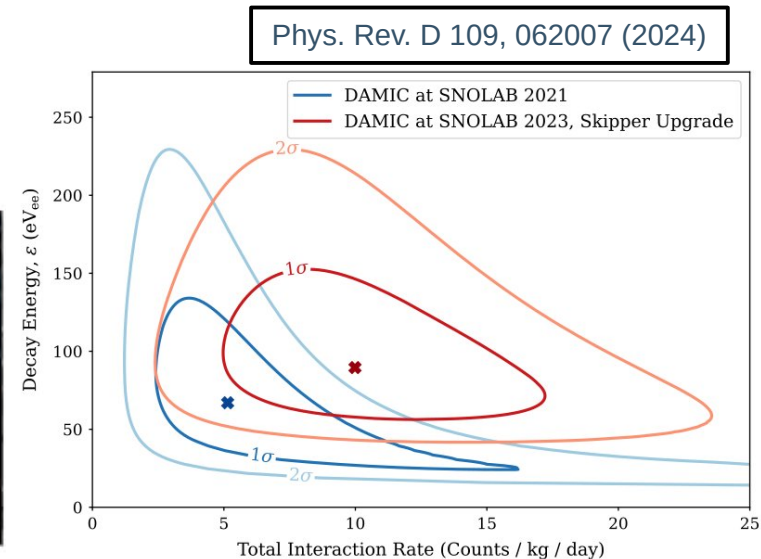
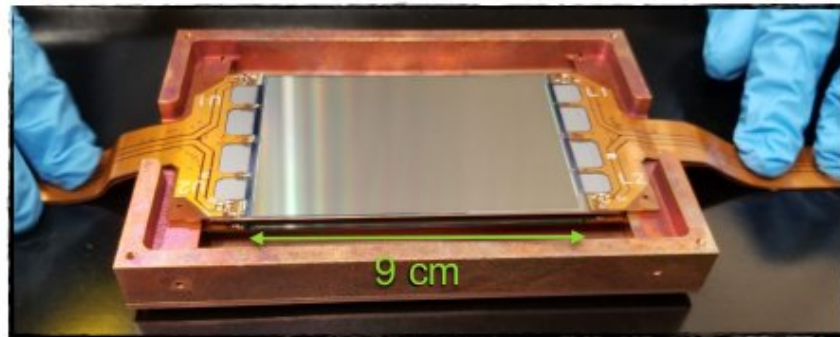
US Cosmic Visions 2017 arXiv:1707.04591

- En el contexto de modelos con “Sector Oculto” con portal vectorial, destacados en 2017.
- Resultados de búsqueda de MO en señales de ionización de O(\sim eV)



DAMIC@SNOLAB con Skipper CCD

- Dos Skipper CCDs de **DAMIC-M** (blanco de Si de 18 g) empaquetados y probados en la U.Washington. Instalados en Oct-Nov 2021.
- Resolución a $1 e^-$ ($\sigma_{\text{pix}} = 0.16 e^-$) y baja corriente de fuga ($2.4 \times 10^{-3} e^- / \text{pix}/\text{day}$).
- Exceso consistente con el observado con CCD estándar.



Contribuciones a DAMIC (NuMO-ICN)

Hasta mayo de 2015 ...

- Herramienta *Fast Tester Tool* para CCDs de DESI, CONNIE y DAMIC (A. Castañeda y P. Hernández Torres, asesor D'Olivo).
- Sistema de monitoreo para CCDs de DAMIC en SiDet, Fermilab (C. Salazar, asesor D'Olivo)
- Participación en pruebas de activación de CCDs con haz de protones en Fermilab y 1as pruebas de agotamiento total en CCD gruesas (Y. Sarkis, asesor Aguilar).
- Cálculos de sensibilidad de detectores tipo DAMIC (Y. Sarkis, asesor Aguilar).
- Análisis térmicos de paquetes de CCDs (F. Trillaud IIUNAM, Aguilar, D'Olivo)
- Análisis de Eventos anómalos, y medición de backgrounds en CCD de SNOLAB (G. Moreno, asesor Aguilar)

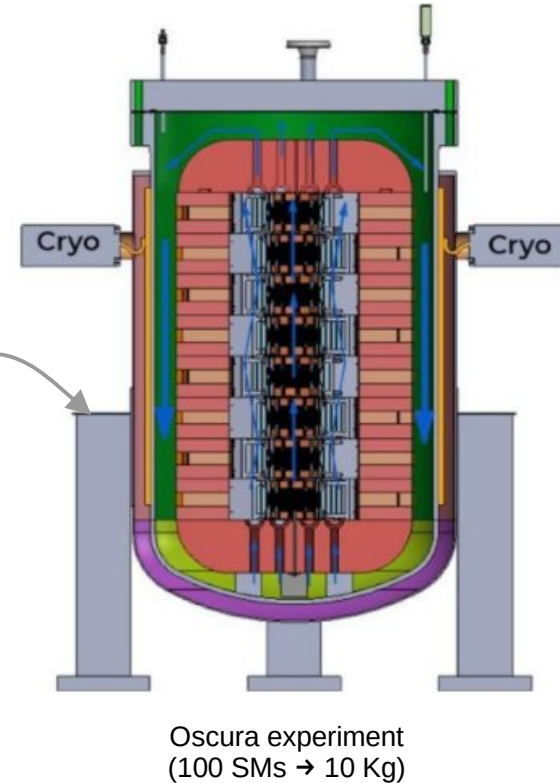
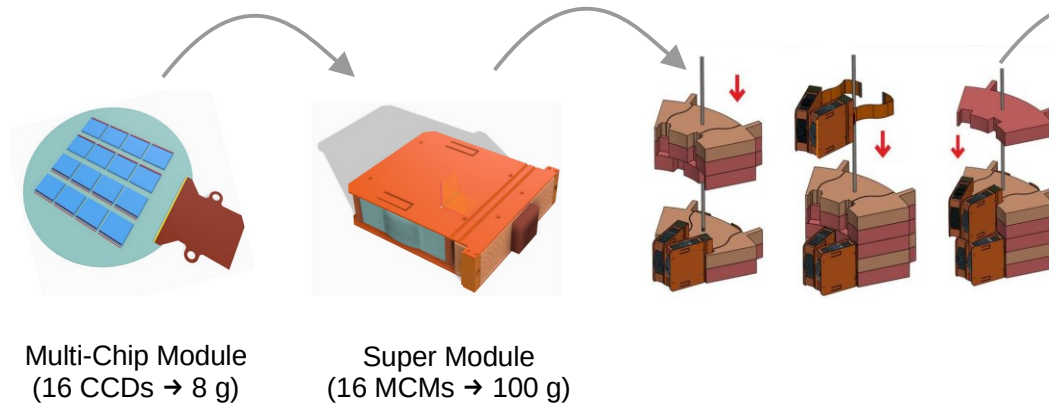
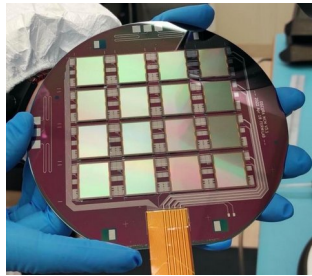
Posterior a mayo de 2015 ...

- Cables flexibles, sustratos de Si y conectores para la construcción de los CCDs para DAMIC@SNOLAB (2015 y 2017, D'Olivo, Aguilar).
- Participación en el diseño inicial de la electrónica de bajo ruido LTA para CCDs (A. Castañeda, asesor D'Olivo)
- Estudio de simulación de alfas de ^{210}Po entre la región activa y la "capa muerta" en las CCD (posdoc F. Favlea, asesor Aguilar)
- Estudios de corriente de fuga a diferentes temperaturas con los datos de SNOLAB (A. Aguilar)
- Estudios de direccionalidad con CCDs (B. Cervantes, asesor D'Olivo)
- Calibración de energía de retrocesos nucleares del exceso en Skipper-CCDs con el quenching factor de Sarkis-2023 (posdoc Y. Sarkis, asesor D'Olivo).
- Búsqueda de correlaciones entre eventos candidatos a MO y defectos generadores de carga en el bulbo de las Skipper-CCD en exposiciones a altas temperaturas (A. Aguilar).

OSCURA / DarkBeaTS

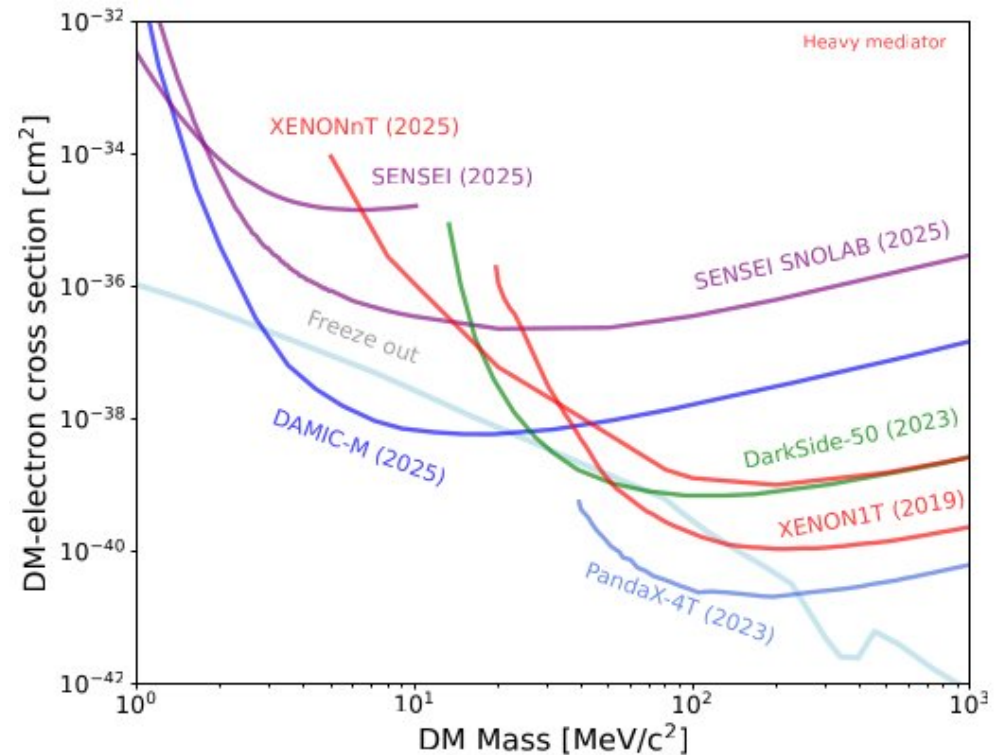
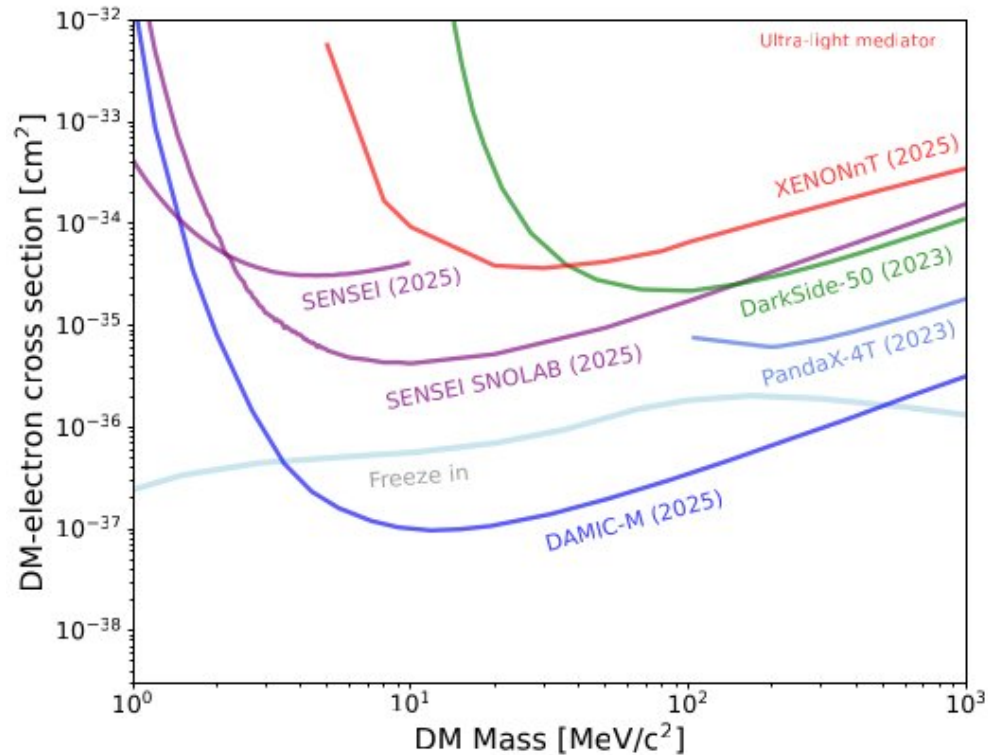
Oscura

- Experimento de siguiente generación con CCD
- 10 kg de skipper-CCD (28 gigapíxeles) sumergidas en Nitrógeno líquido a presión de vapor de 450 psi (120 – 140 K).
- Planeado para instalarse en SNOLAB. Construcción (inicialmente planeada para 2025) ha sido **postpuesta por falta de financiamiento**.
- Varios desarrollos y esfuerzos de R&D realizados por la colaboración.
- Sensibilidad sin precedentes a interacciones de MO sub-GeV con electrones en el rango de m_χ de 1 MeV - 1 GeV.



Importantes contribuciones de B. Cervantes (asesor D'Olivo) durante el PhD sobre caracterización de skippers para Oscura.

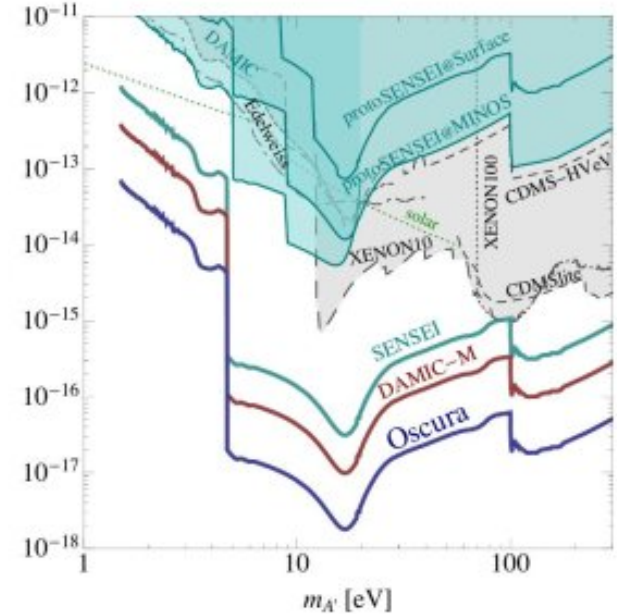
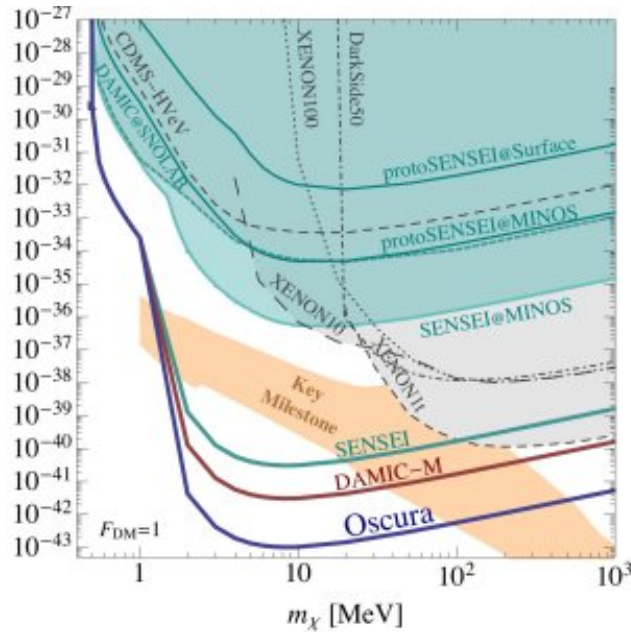
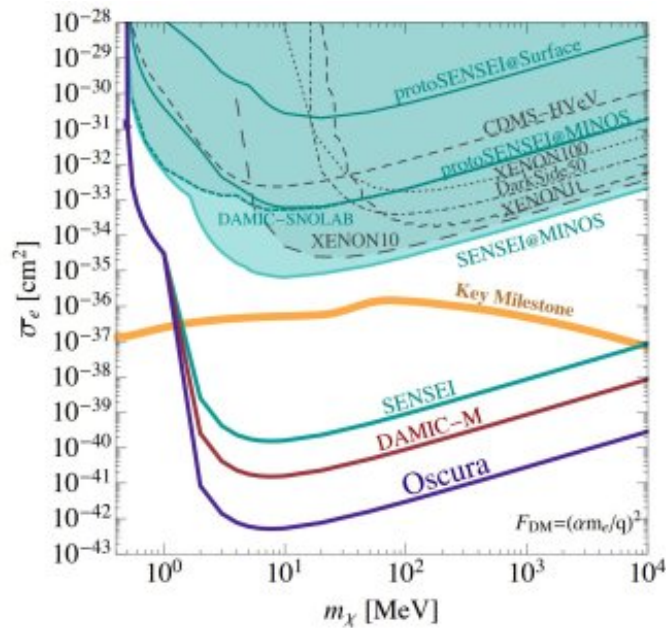
Estatus de búsquedas de MO- e^-



- Mediadores livianos: Sensibilidad dominada por experimentos con skipper-CCD: SENSEI y DAMIC-M
- Mediadores pesados: Skipper CCD dominan para masas $< 25 \text{ MeV}$.

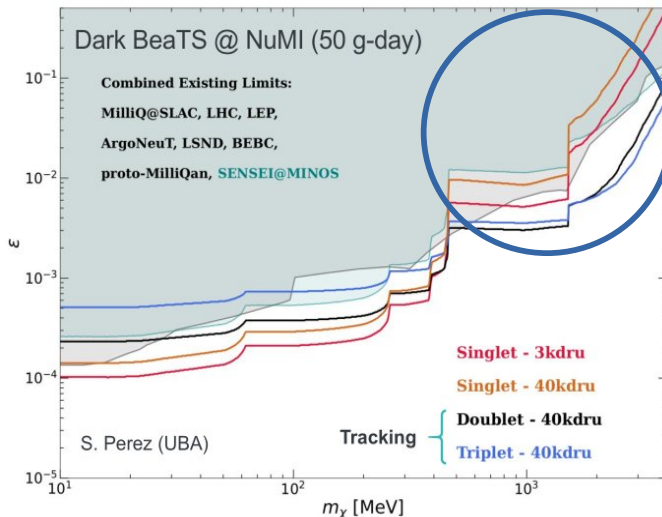
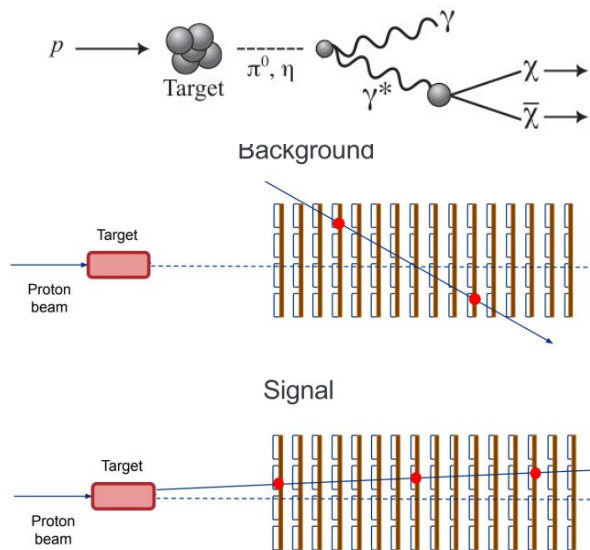
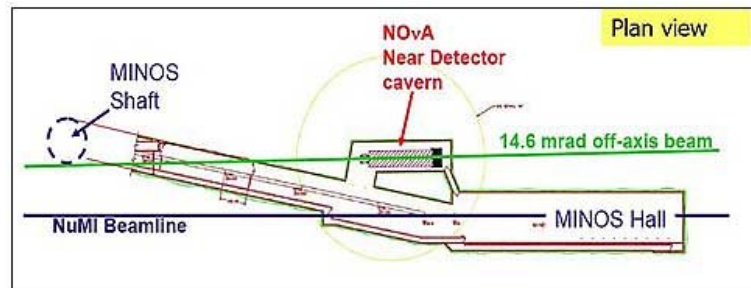
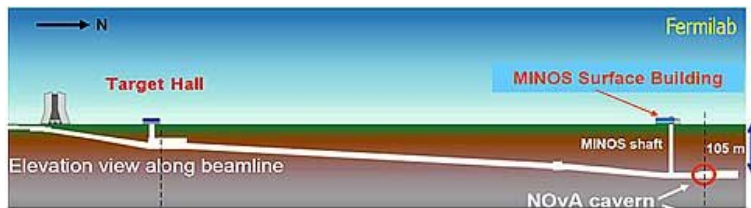
Oscura: sensibilidad

- Sensibilidad proyectada para Dispersión MO-electrón mediada por un mediador liviano (izq.) o pesado (cent.), y absorción de un fotón oscuro por electrones (der.)
- Suponiendo una exposición de 30 kg-yr para Oscura (see arXiv:2202.10518)



DarkBeaTS

- Haz NuMI: protones de 120 GeV golpean blanco de grafito, 10^{18} POT/día
- MCP podrían producirse colineales al haz, en el decaimiento de mesones neutros
- El primer demostrador de Oscura podría usarse para buscar mCPs en aceleradores



Metas:

- Desplegar y operar DarkBeaTS en el salón experimental de MINOS en Fermilab
- Desarrollo de “tracking” de eventos de baja deposición de energía.

DarkBeaTS

- El detector más grande de skipper-CCDs (tomando datos desde 02/2025)
 - Detector trazador multicapa con **~200 skipper-CCDs**
 - La mayoría trabajando con resolución de 1e-
 - Coordinado por **B. Cervantes** (posdoc FNAL)
- Doctorado PCF (Asesor D'Olivo)

Tareas del grupo NuMO-ICN

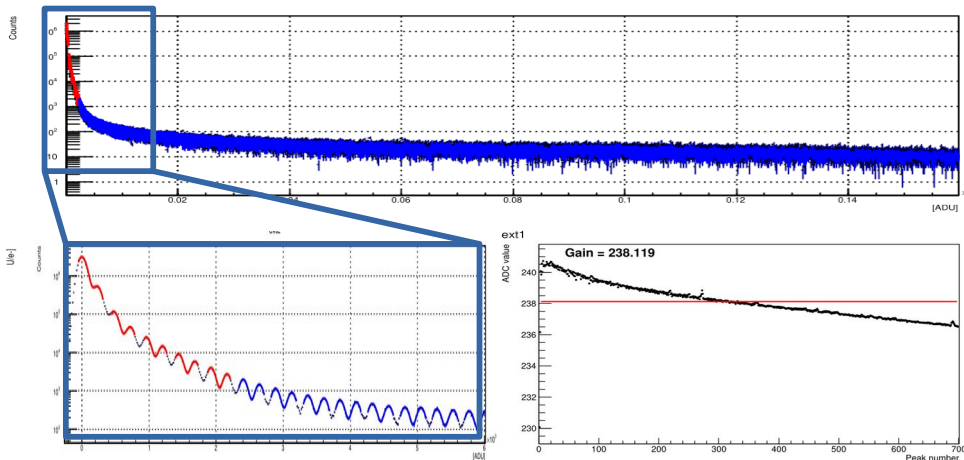
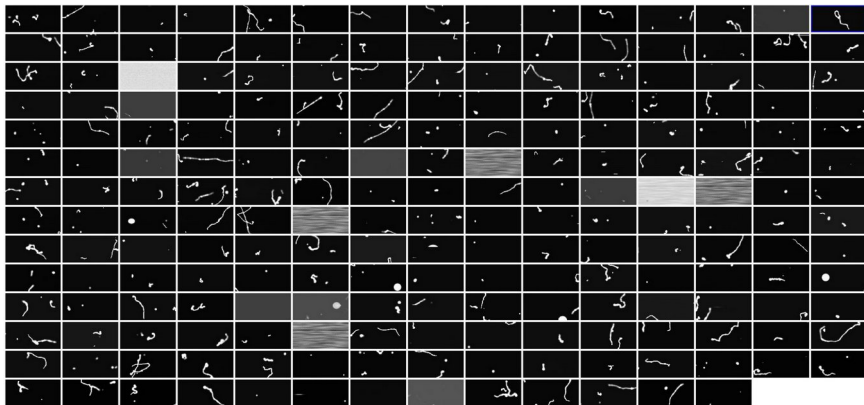
- Calibración (M.Martínez, S. Magaña)
- Análisis de cross-Talk (J. Guerra)
- Procesamiento (AA-A)

Imágenes, B. Cervantes



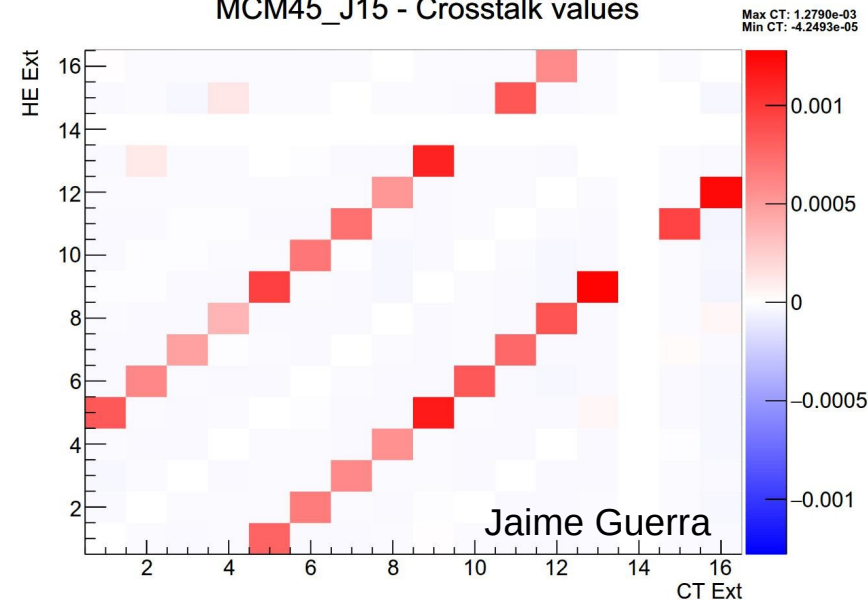
DarkBeaTS

Brenda Cervantes



Mauricio Martínez, Stephane Magaña

MCM45_J15 - Crosstalk values



CONNIE

CONNIE Collaboration



~ 35 members from 6 countries



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

Metas principales

- Detectar CEvNS con neutrinos de reactores en silicio con Skipper-CCDs.
- Explorar Física más allá del Modelo Estándar (BSM)
- Desarrollar monitoreo de reactores nucleares con neutrinos (salvaguardias)

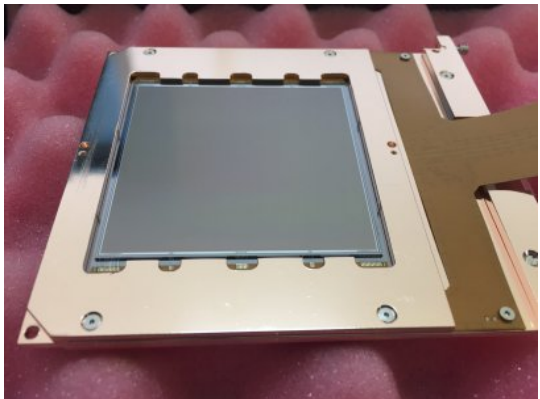
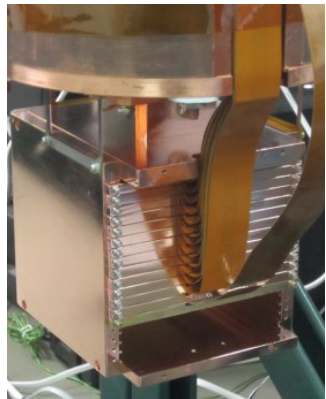
Experimento CONNIE

- Ubicado en la planta nuclear Almirante Alvaro Alberto cerca de Rio de Janeiro, Brasil.
- A 30 m del núcleo del reactor Angra 2 (3.95 GW_{th}). Flujo de $\sim 7.8 \times 10^{12} \bar{\nu}_e \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
- Comparte espacio con el experimento “Neutrinos Angra”.



El detector CONNIE

Instalado en 2014. Mejorado en 2016, 2021 y 2024



CCDs en caja de cobre (mejora 2016) $4k \times 4k$, $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ pix,
675 μm grosor CCD estándar

Corrida de Ingeniería:
JINST 11 (2016) P07024

Mejora de 2016:
Phys. Rev. D 100, 092005 (2019)

Mejora de 2021:
Phys. Rev. D 100, 092005 (2019)

Mejora de 2024:
Phys.Rev.D 113, 092017 (2026)

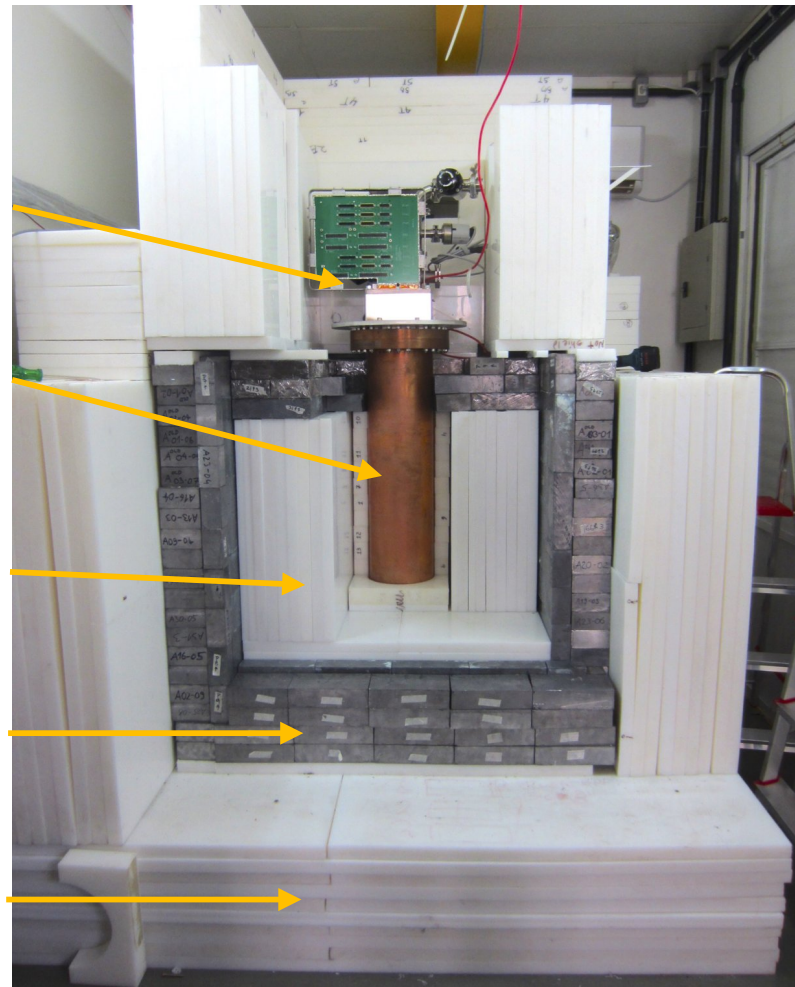
VIB tarjeta de lectura
(transporte de señal)

Dewar (vacío)

Polyetileno interior
~30 cm (neutrones)

Plomo ~15 cm (gammas)

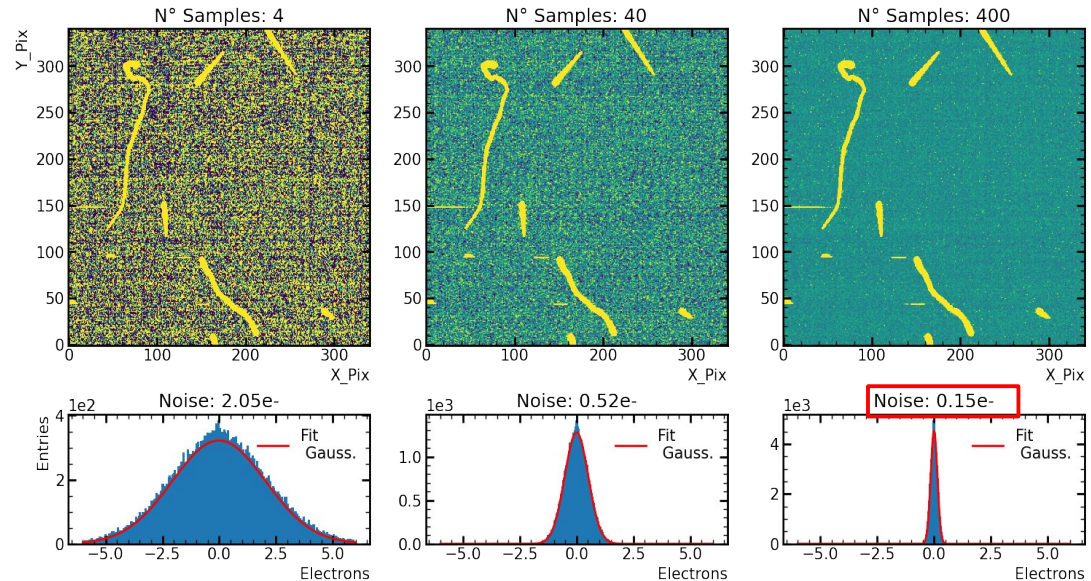
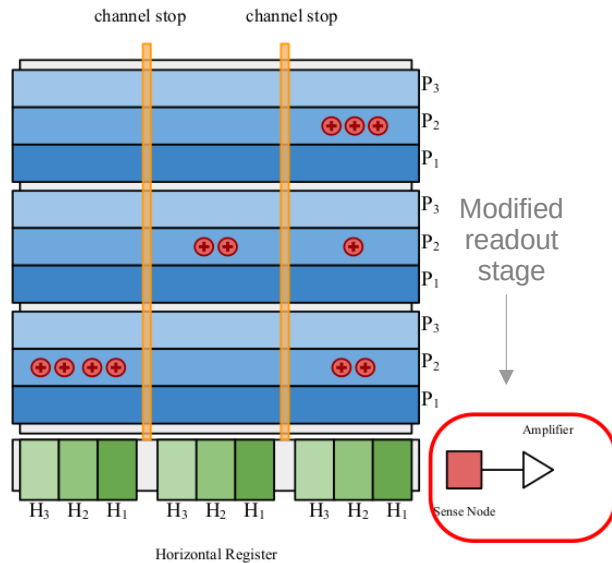
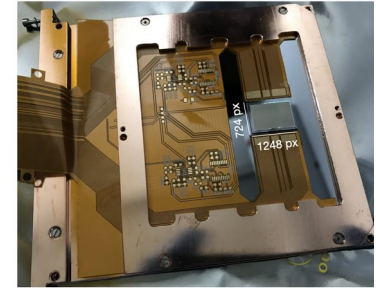
Polietileno exterior
~30 cm (neutrons)



CONNIE con Skipper-CCD's

Dos Skipper-CCDs instaladas en CONNIE en Julio de 2021.

- 1022 x 682 pixeles, $15 \times 15 \mu\text{m}^2$, 675 μm grosor c/u \Rightarrow 0.5 g masa total.
- Electronica “Low Threshold Acquisition” (LTA) G. Cancelo et al, JATIS 7, 015001 (2021)

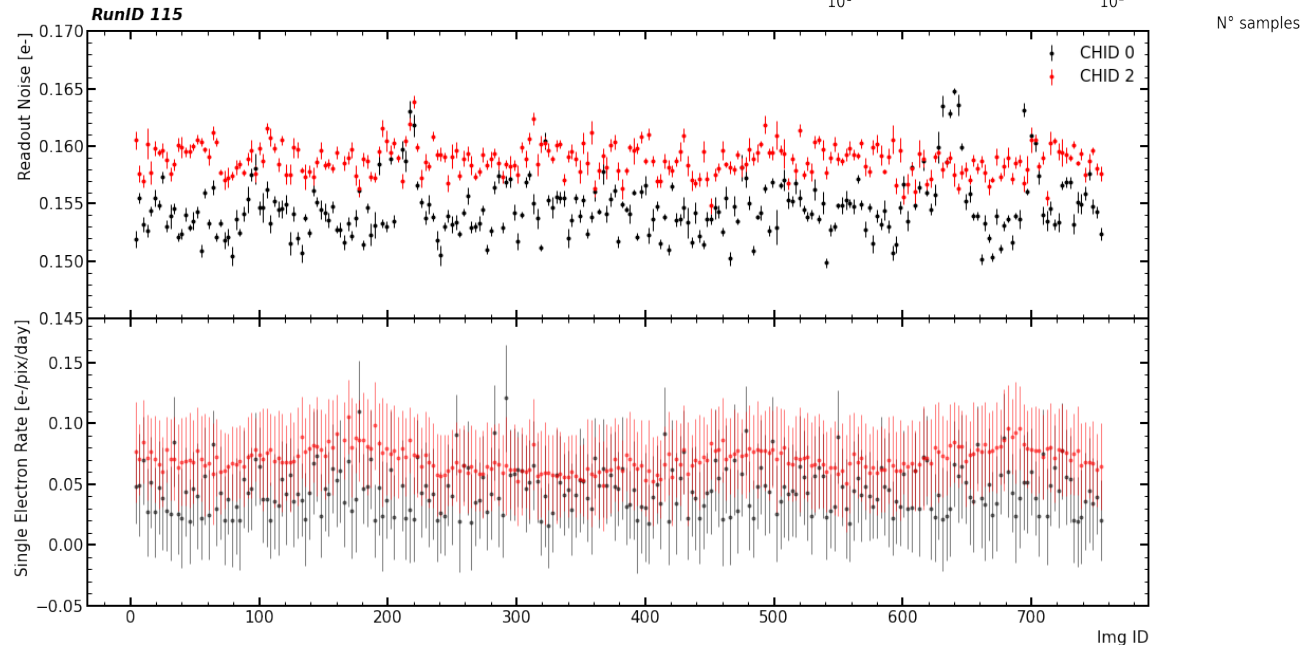
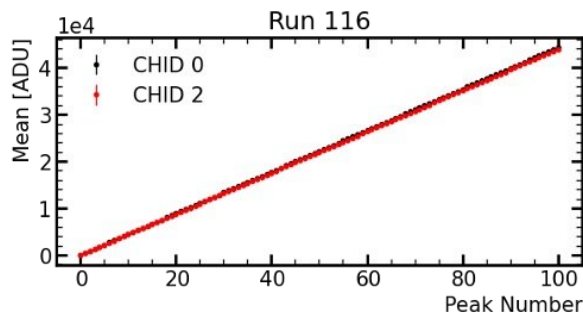
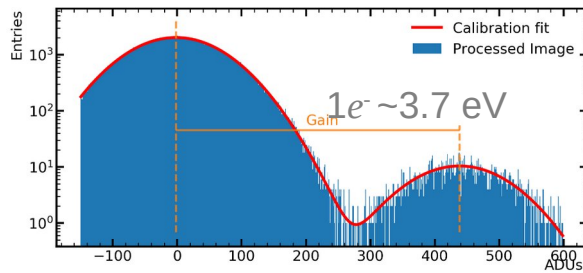
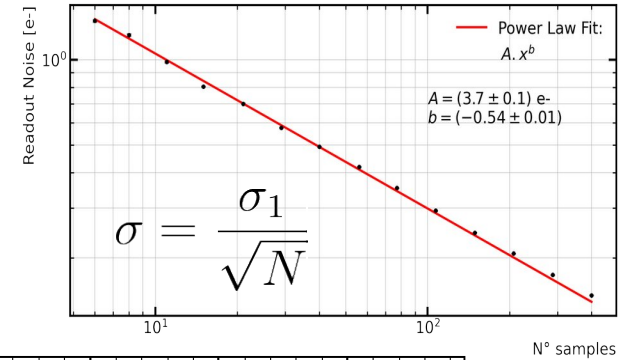


Skipper-CCD desempeño

Phys.Rev.D 113, 092017 (2026)

Desempeño y background estables en el período de 2021-2022.

- La carga de cada pixel es leída con $N = 400$ muestras.
- Ultra-bajo ruido = $0.15 e^-$.
- Detector auto-calibrado, $1e^- \sim 3.7 eV$.
- Tasa de 1-electron = $0.045 e^-/\text{pix}/\text{day}$ (bajo para superficie).



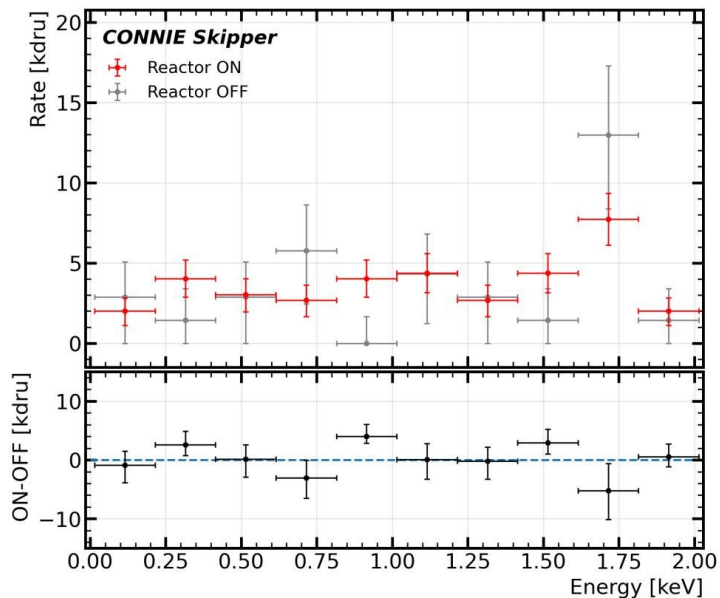
CONNIE con Skipper-CCDs: sensores individuales

Mejoras respecto a corrida con CCD estándar:

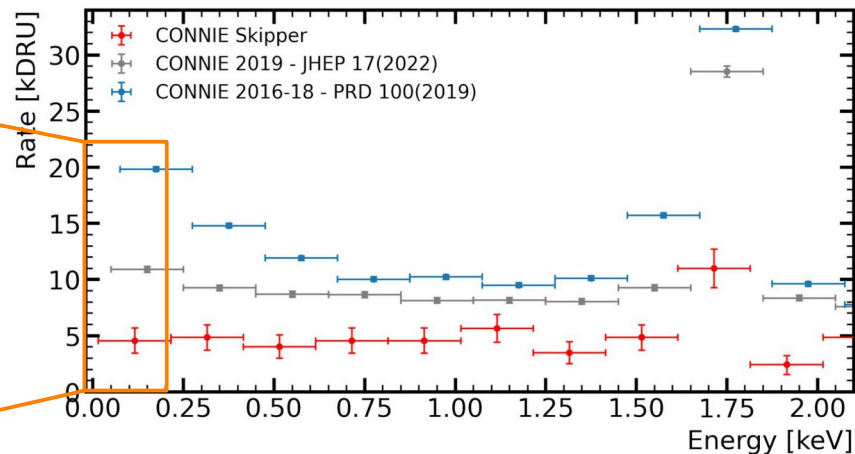
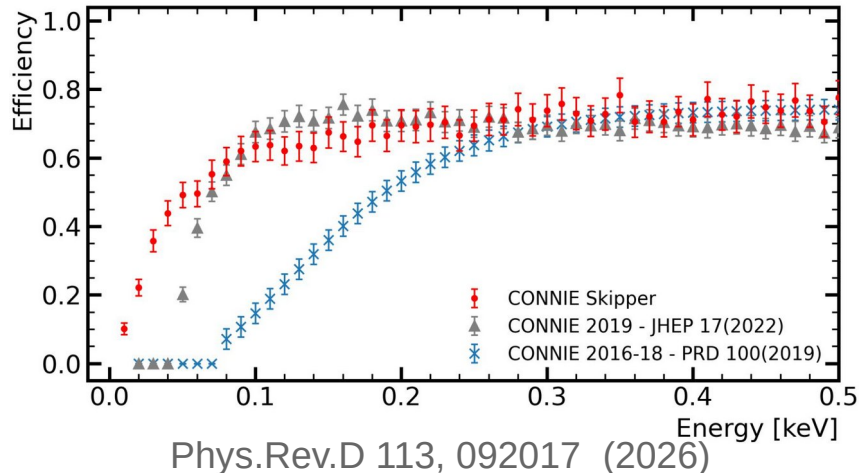
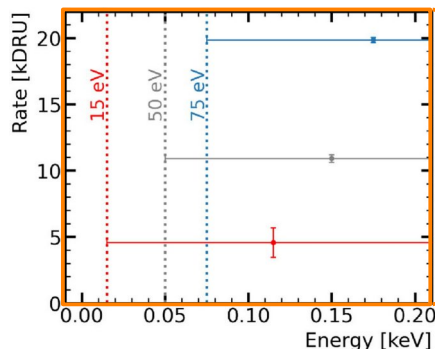
- Umbral de energía reducido a $15 \text{ eV}_{\text{ee}}$ ($\sim 240 \text{ eV}_{\text{nr}}$).
- Mayor eficiencia de detección a bajas energías.
- Tasa de background baja y plana: $\sim 4 \text{ kdr}$.

Exposición: **14.9 g-day reactor-on** & **3.5 g-day reactor-off**.

No se observa un exceso.



- **243 days reactor-on**
- **57 days reactor-off.**



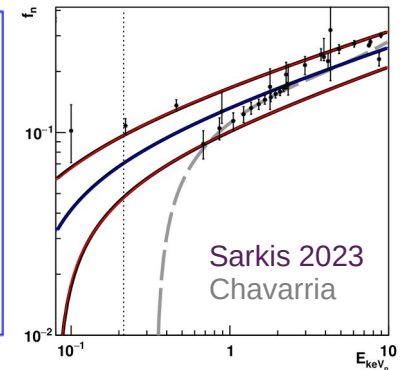
Búsqueda de CEvNS

Phys.Rev.D 113, 092017 (2026)

Búsqueda de CEvNS en los bins de menor energía de la tasa RON – ROFF.

- Modelo del flujo con espectros de antineutrinos mejorados (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu)
Para $E_\nu > 0.44$ MeV (15 eV ee) los modelos nuevo/viejo concuerdan dentro de un 3%.
- **Modelo del Quenching Factor (Sarkis) actualizado para silicio.** Y. Sarkis et al, PRA 107, 062811 (2023)
Basado en Lindhard, con descripciones mejoradas del frenado electrónico, potencial interatómico y amarre electrónico a energías sub-keV, $E_{nr} > 0.24$ keV nr (15 eV ee).

Measured Energy [keV _{ee}]	Sarkis (2023) rate [kg ⁻¹ d ⁻¹ keV _{ee} ⁻¹]	Chavarria rate [kg ⁻¹ d ⁻¹ keV _{ee} ⁻¹]	Observed 95% C.L. [kg ⁻¹ d ⁻¹ keV _{ee} ⁻¹]	Expected 95% C.L. [kg ⁻¹ d ⁻¹ keV _{ee} ⁻¹]
0.015 – 0.215	29.3 ^{+4.6} _{-4.7}	17.7 ± 3.3	2.24 × 10 ³	3.18 × 10 ³
0.215 – 0.415	2.7 ^{+1.3} _{-1.2}	2.20 ± 0.21	7.36 × 10 ³	4.77 × 10 ³
0.415 – 0.615	0.43 ^{+0.41} _{-0.39}	0.36 ± 0.04	3.41 × 10 ³	3.31 × 10 ³



- **Límite observado a 76x** tasa esperada del ME (con QF de Sarkis).
- Comparable al límite previo con CCD estándar 10^3 mayor exposición.

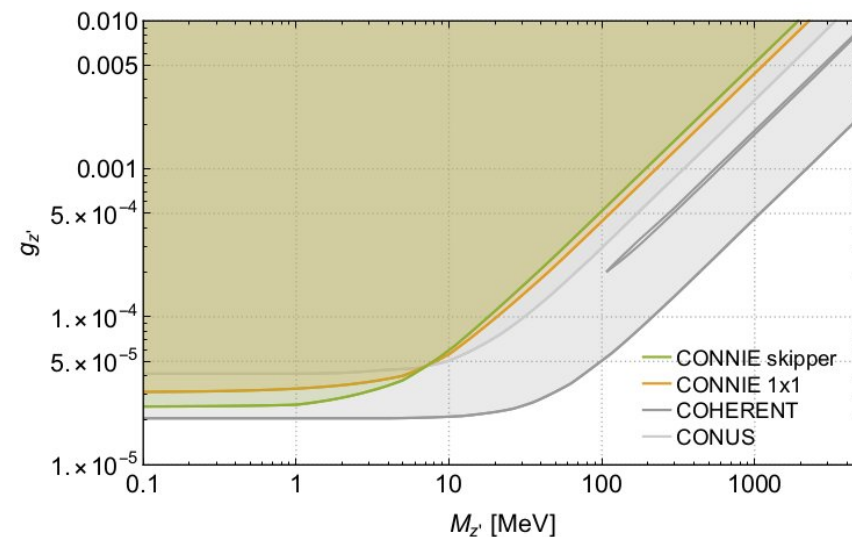
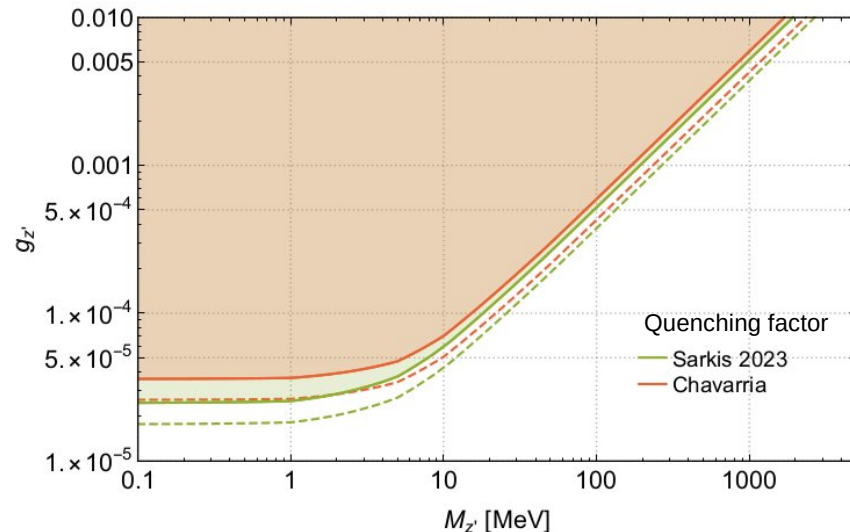
Búsqueda de mediadores vectoriales ligeros

PRD 113, 092017 (2026)

Búsqueda de un **mediador vectorial liviano Z'** en el canal de detección de CEvNS.

- Basado en un modelo Universal simplificado [JHEP 05, 118 (2016)].
- Ua la tasa de eventos, $R(\text{SM}+Z')$, en el bin de menor energía (15–215 eV).
- Leve mejoría en el límite en $g_{Z'}$ a bajas $M_{Z'}$, respecto al resultado con CCD estándar.

$$\frac{d\sigma_{\text{SM}+Z'}}{dE_R}(E_{\bar{\nu}_e}) = \left(1 - \frac{Q_{Z'}}{Q_W}\right)^2 \frac{d\sigma_{\text{SM}}}{dE_R}(E_{\bar{\nu}_e}) \quad Q_{Z'} = \frac{3(N+Z)g'^2}{\sqrt{2}G_F(2ME_R + M_{Z'}^2)}$$



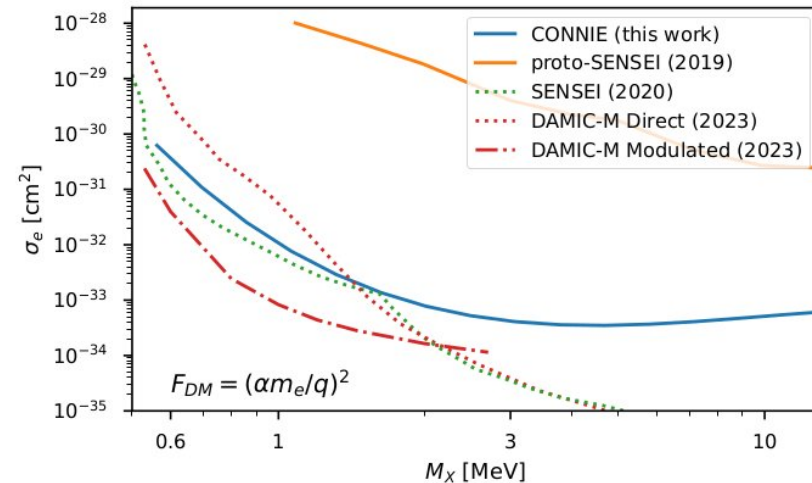
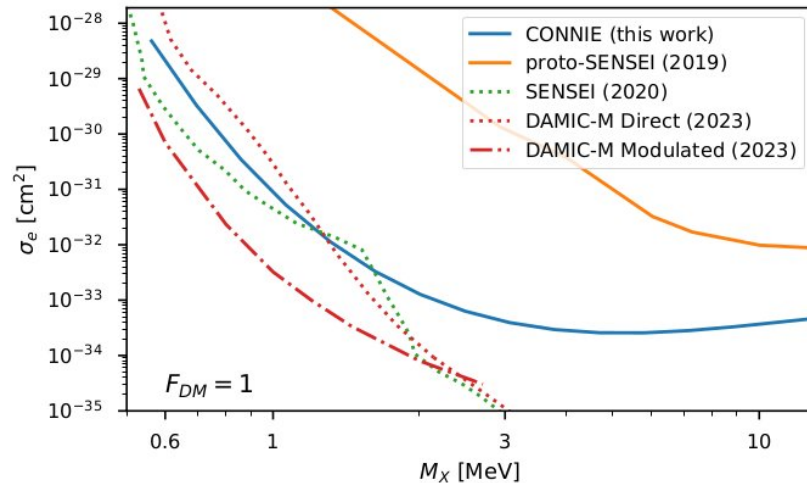
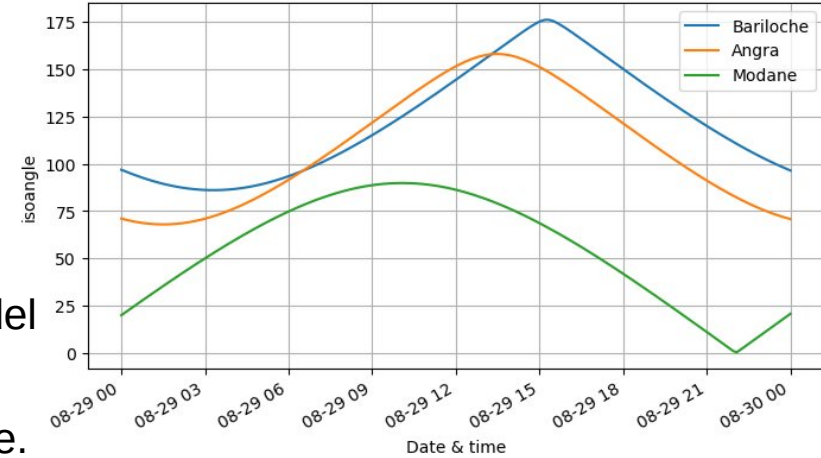
Comparación entre QFs y proyecciones para incertidumbre 5x menores.

Búsqueda de Materia Oscura

PRD 113, 092017 (2026)

- Búsqueda de interacciones MO-e- por *modulación diurna*
 - Viento galáctico de MO proviene de una dirección específica $\sim 40^\circ$ N.
 - Movimiento Terrestre induce modulación diurna (ángulo de isodetección favorece al Hemisferio Sur) en la tasa de eventos de 1-e
 - CONNIE a 23° S puede barrer ángulos entre 65° - 161°
- Datos comparados con simulación DaMaSCUS
- Modelo con acoplamiento de MO con $m_\chi \sim \text{MeV}$ a partículas del ME por medio de un fotón oscuro con mezcla cinética (A')
- Los mejores límites a MO-e- de experimentos en la superficie.

N. Avalos, TAUP 2023



Búsqueda de partículas milicargadas

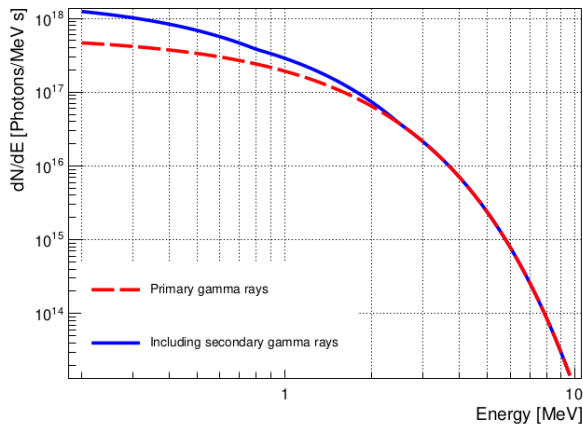
PRL 134,071801 (2025)

Partículas milicargadas relativistas (χ_q), predichas en extensiones del ME con sector oscuro.

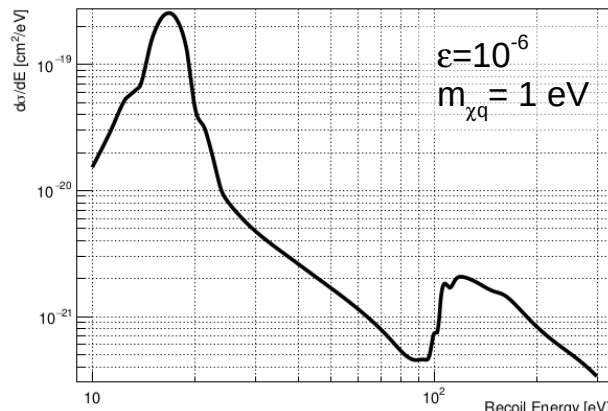
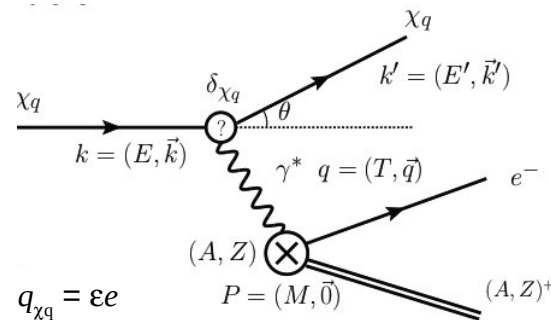
Producción: Dispersión tipo-Compton de γ 's de alta energía del reactor



Including secondary γ 's from transport in the reactor core.



Detección: Ionización atómica



Espectro de γ del reactor da flujo diferencial de χ_q

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

Tasa diff. Esperada en el detector:

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

Sección eficaz para ionizaciones de bajas energías por partículas relativistas incluye excitaciones colectivas:

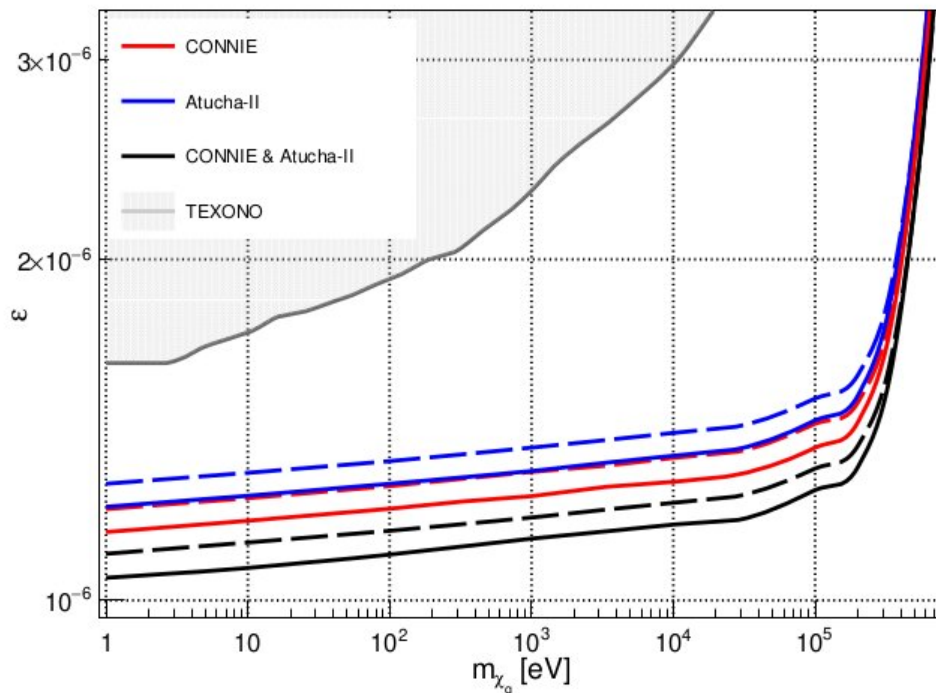
- Efectos colectivos codificados en la función dieléctrica calculada con el código DarkELF (GPAW)
- Pico de plasmones $10-25 \text{ eV}$.

Búsqueda de partículas milicargadas

PRL 134,071801 (2025)

Análisis conjunto entre los experimentos CONNIE y Atucha-II.

- Basado en el bin de más baja energía:
 - 15–215 eV bin (CONNIE)
 - 40–240 eV bin (Atucha-II).
- **Clímite combinado** del 90% C.L. sobre producción de χ_q en reactores.
- **Los mejores límites** a acoplamientos de partículas con milicarga en un amplio rango de masas $m_\chi < 1$ MeV.

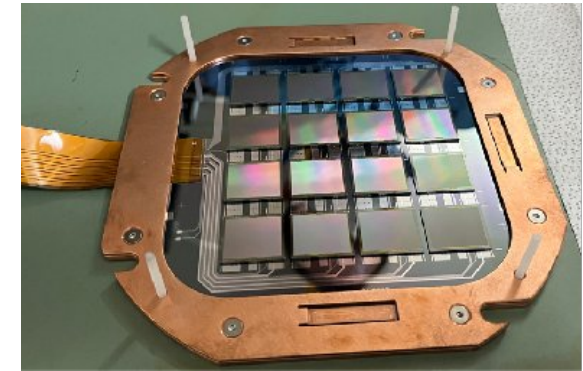


CONNIE con MCM's de Skippers

Hacia experimentos más masivos

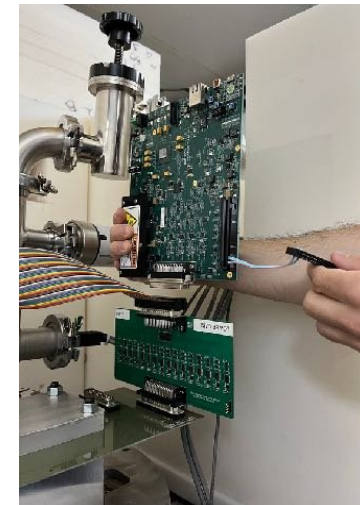
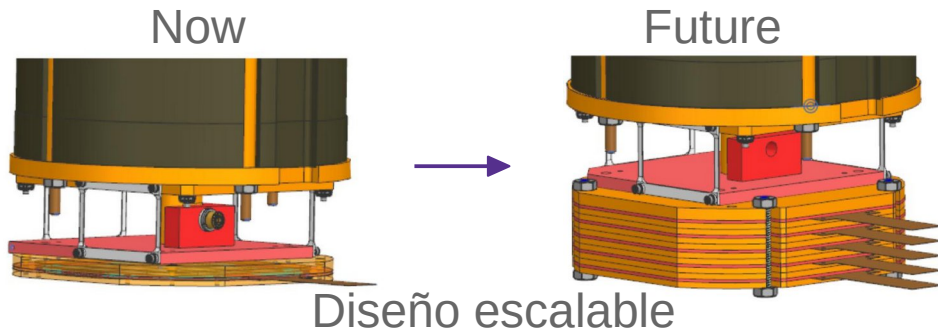
Los “Multi-Chip Modules” ofrecen un arreglo compacto de sensores:

- 16 Skipper-CCDs en cada módulo (8 g each)
- Cada Skipper tiene $1278 \times 1058 (15 \mu\text{m})^2$ pixeles de grosor de $725 \mu\text{m}$
- Diseñados para el experimento Oscura [JINST 18, 08016 (2023)]
- Lectura multiplexada [Sensors 22 (11), 4308; JINST 18 P01040]



Un MCM fue puesto en operación en CONNIE en Oct 2024

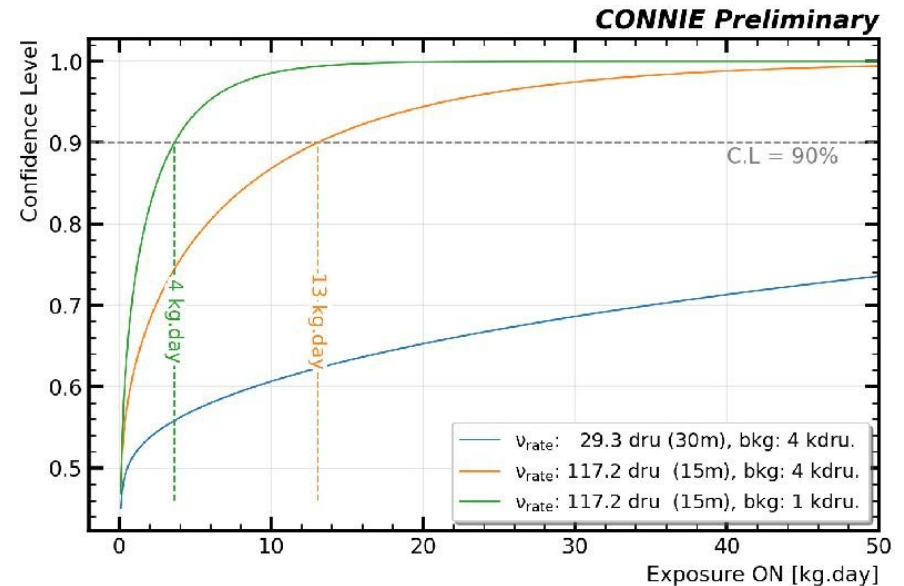
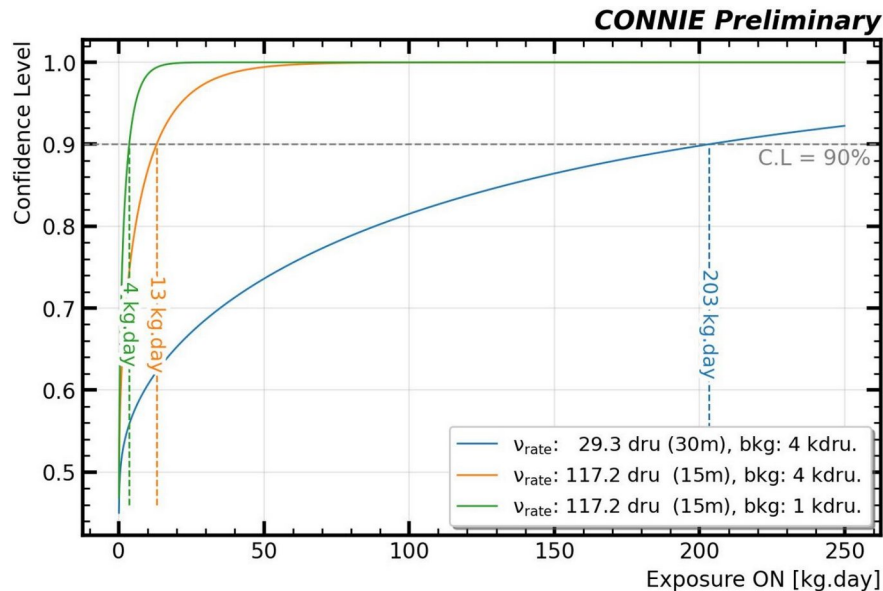
- Nuevas tarjetas de VIB y multiplexora
- Aumento de x10 en masa respecto a skippers anteriores
- Actualmente tomando datos ...



Perspectivas a CONNIE futuro

Hacia la detección de CEvNS

- Con un umbral de 15 eV y un detector de 1 kg en CONNIE (a 30 m del núcleo del reactor core), necesitamos **200 días** de operación para observar CEvNS al 90% CL, suponiendo el nivel de background actual (4 kdru).
- Acercándonos a 15 m del núcleo, necesitaríamos **13 días** de operación para observar CEvNS al 90% CL en las mismas condiciones, y **4 días** si el background puede reducirse a 1 kdru.



Área de Criogenia, Laboratorio de Detectores

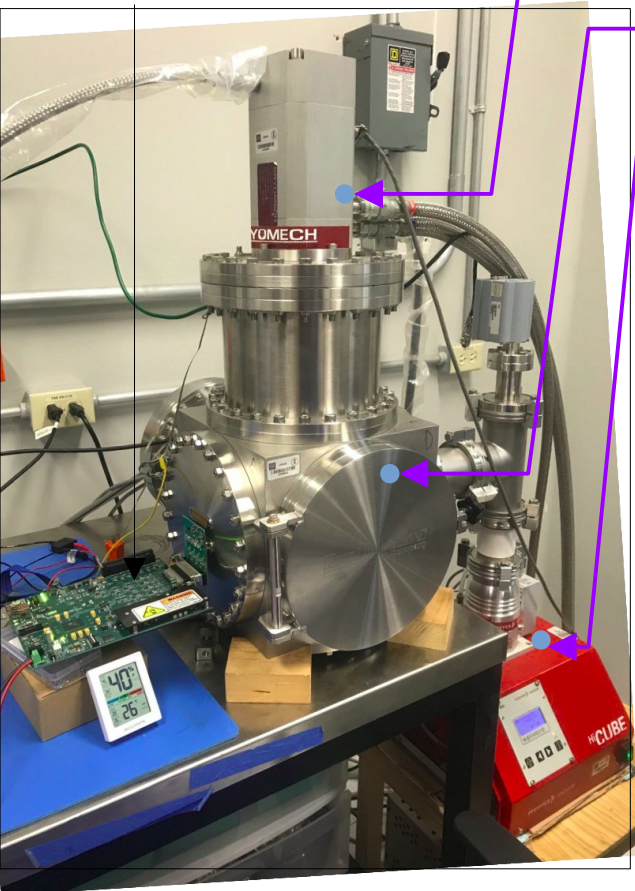
Dos sistemas criogénicos:

- Detector de Ge de alta pureza (HPGe)
- Banco de pruebas de CCD de Calidad Científica (BPCCD)



Banco de pruebas de CCD @ ICN

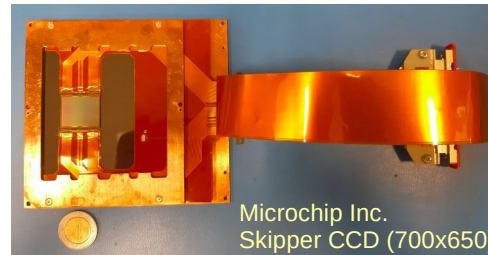
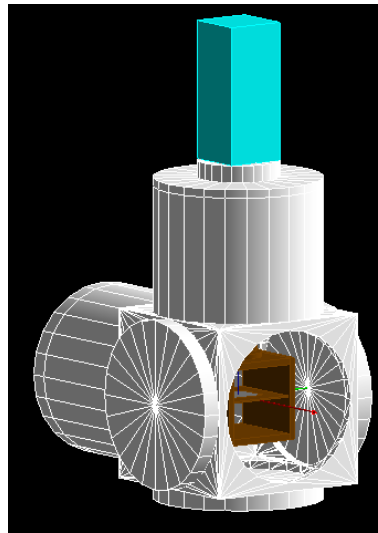
LTA electronics



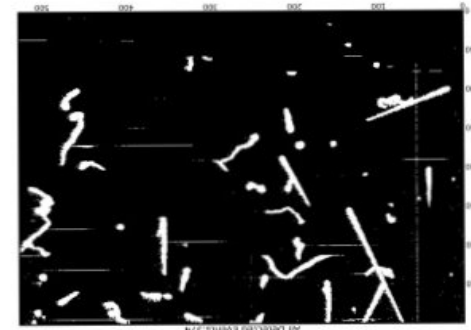
Cryocooler (enfriá a ~ 140 K)

Cámara de vacío ($2e-7$ Torr)

Bomba de vacío seco



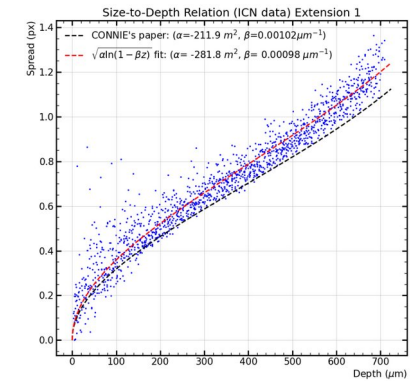
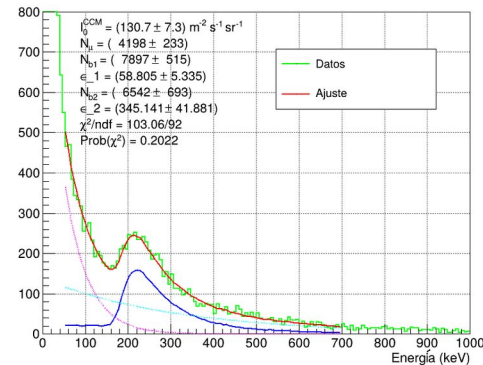
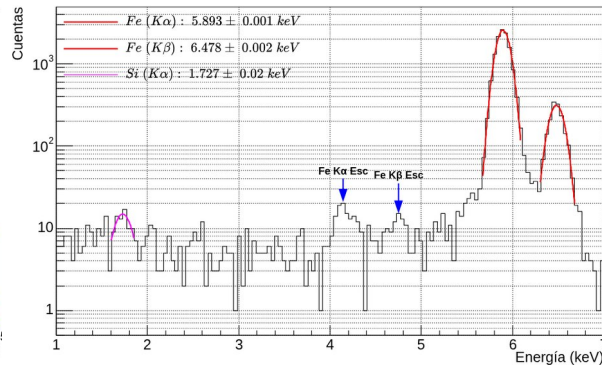
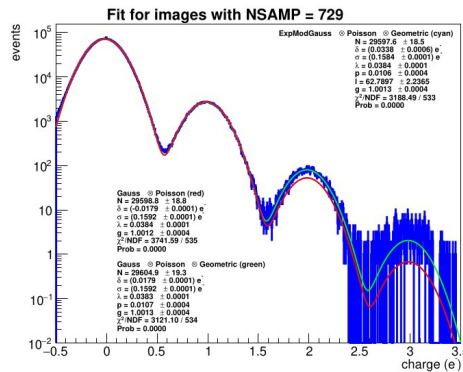
- Cápsula criogénica de 10" de arista
- Sistema de enfriamiento (C)
- Sistema de Vacío Seco
- Control de temperatura
- Caja con skipper CCDs de Microchip
- Ensamblado inicial por estudiantes
- Desarrollos de hardware y electrónica
T.A. M. Martínez y J. Guerra.
- Operando establemente desde 2024.



Banco de pruebas de CCD @ ICN

Experimentos en curso o planeación con Skipper-CCD:

- Distribución de carga en los píxeles de skipper-CCD con convolución de funciones de distribución (J. Guerra)
- Medición precisa del factor de Fano en Silicio con líneas de rayos-X (Y. Sarkis)
- Medición de la intensidad vertical de muones y su distribución angular (M. Sánchez)
- Relación tamaño/profundidad en skipper-CCD del laboratorio (M. Sánchez)
- Medición de la eficiencia de ionización de retrocesos nucleares con partículas alfa degradadas (Y. Sarkis)



Experimentos futuros:

- Medición de la eficiencia de ionización con fuente de neutrones de Cf-252
- Búsqueda de MO por modulación diurna en C.U.
- Búsqueda de producción de partículas exóticas en el decaimiento del ^{60}Co .

Comentarios finales

- ICN tiene participación importante en los experimentos CCM, DAMIC, CONNIE, Oscura/DarkBeaTS, realizando búsquedas de materia oscura, física BSM y física de neutrinos.
- Gran actividad experimental en búsquedas de partículas del sector oscuro.
- Los estudiantes realizan contribuciones importantes para los resultados.
- Participación en experimentos pioneros con CCD ha permitido desarrollo del Area de Criogenia del Laboratorio de Detectores.
- El grupo NuMO-ICN está en curso de realizar diversos experimentos con potencial de impacto científico con skipper-CCD.
- Stay tunned!

Agradecimientos

A todos Uds. por su atención.

A la UNAM y al ICN por la oportunidad de realizar este trabajo.

A CONAHCYT/SECIHTI y DGAPA-UNAM por el financiamiento a los proyectos

A Juan Estrada y tod@s l@s colegas de DAMIC y CONNIE.

Muy especialmente a mi colega y líder del grupo, Dr. Juan Carlos D'Olivo.

Al T.A. Ing. Mauricio Martínez Montero por mantener todo funcionando en el laboratorio.

A los estudiantes y posdocs (ellos hacen todo el trabajo)

Gracias al comité ad-hoc por su asistencia:

- Alejandro Ayala Mercado
- Roelof Bijker
- Omar Miranda Romagnoli

Respaldos

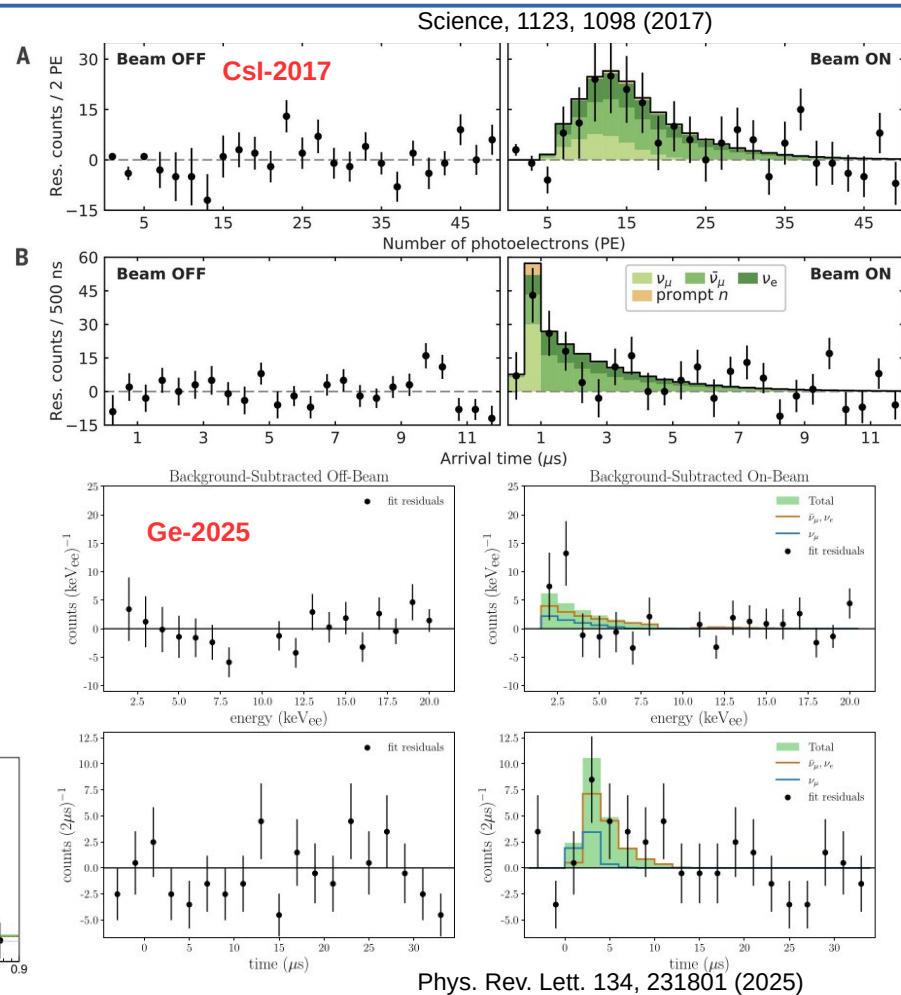
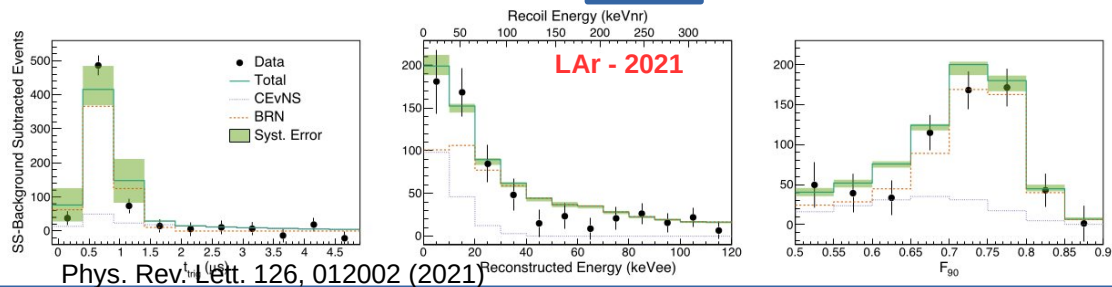
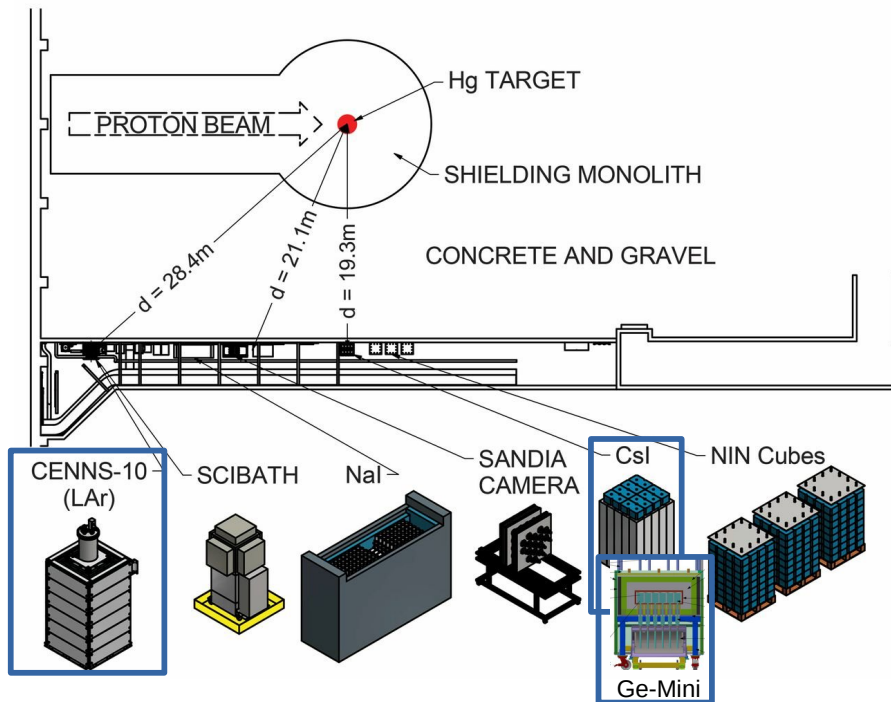
Contribuciones a CONNIE (NuMO-ICN)

Varias de las contribuciones tempranas a DAMIC aplican también a CONNIE ...

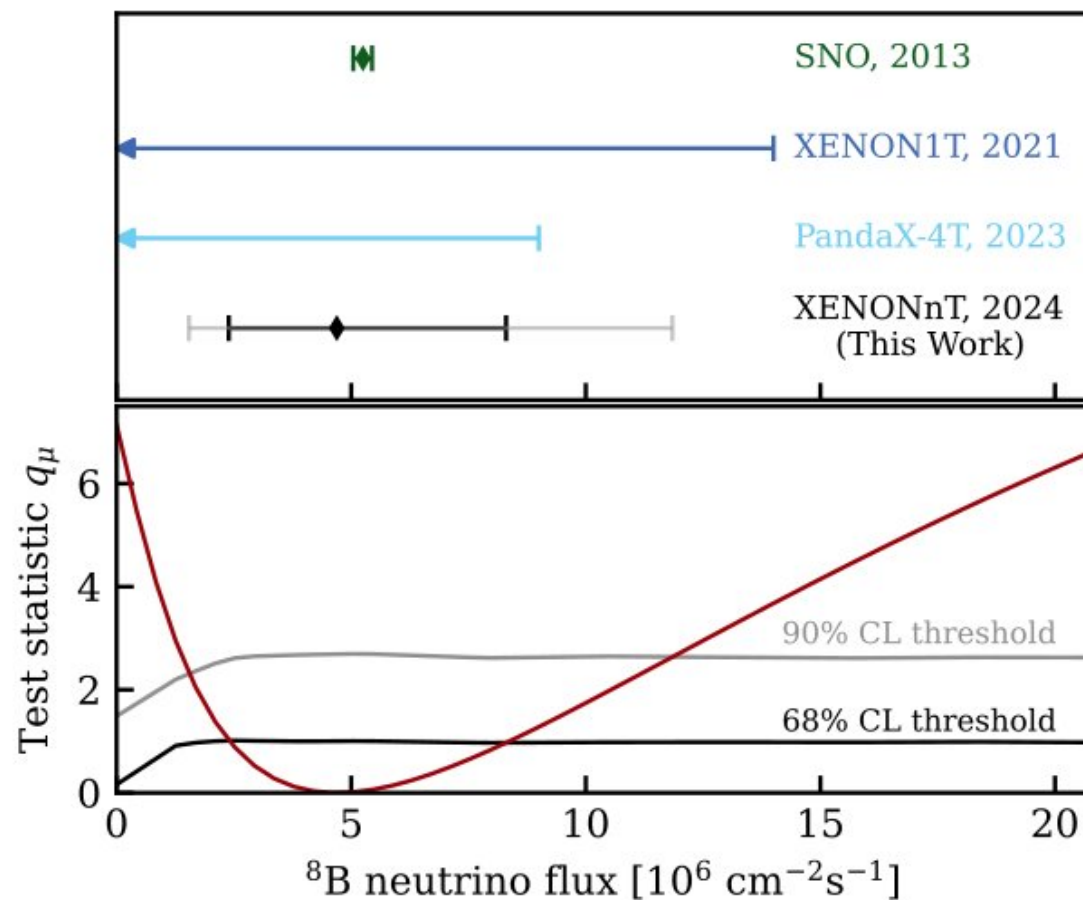
- Ensamblado inicial del criostato para CONNIE (Y. Sarkis).
- Estudio estructural del escudo de CONNIE (S. Pliego)
- Pruebas de LTA para CCD de DAMIC y CONNIE (A. Castañeda y P. Hernández Torres)
- Participación. en la misión en Angra para el upgrade de 2016 (A. Castañeda, Asesor D'Olivo)
- Inyector de muones cosmogénicos en Geant4 para simulación de U.Asunción de CONNIE (B. Olmos, Asesor Aguilar)
- Procesamiento de los datos adquirido post-upgrade 2016-2018 (Aguilar)
- Desarrollo de herramientas de análisis de datos diversas para CONNIE (B. Cervantes, asesor D'Olivo)
- Estabilidad de la calibración de energía con líneas de fluorescencia en las CCD (Y. Sarkis, asesor Aguilar)
- Desarrollo del análisis de búsqueda de mediadores livianos con CONNIE (B. Cervantes, asesor D'Olivo)
- Implementación del QFactor de Sarkis en el análisis de búsqueda de CEvNS (posdoc Y. Sarkis)
- Análisis de tamaño-profundidad para skipper-CCDs (Aguilar)
- Actualización del cálculo del flujo de neutrinos del reactor (posdoc Y. Sarkis)
- Análisis de búsqueda de CEvNS en Skipper CCDs (posdoc, Y. Sarkis)
- ... otras que no recuerdo ...

A.Aguilar: Chair of the Collaboration Board (2023-2025) y coordinador de reunión de análisis semanal (desde 2023)

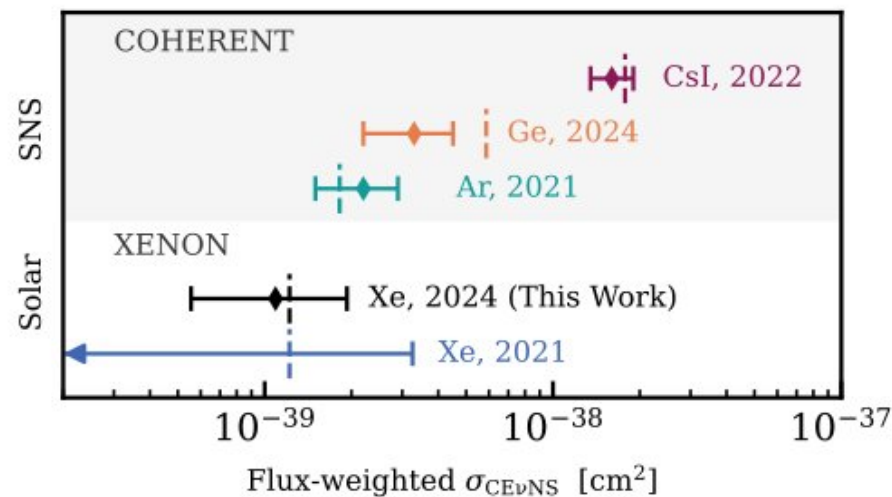
COHERENT at the SNS



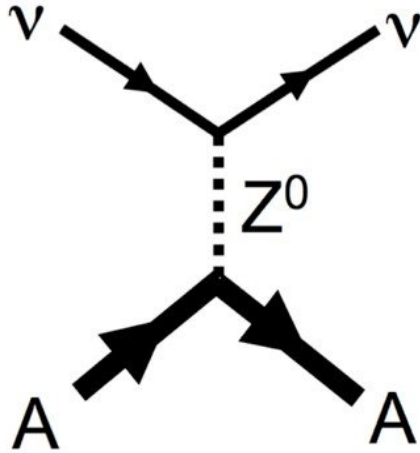
Set Constraint on solar ^8B neutrinos flux and CEvNS cross-section



- Assume the CEvNS cross-section predicted by the SM
- *Or* assume the solar ^8B neutrinos flux measured by SNO



Coherent CAPTAIN-Mills



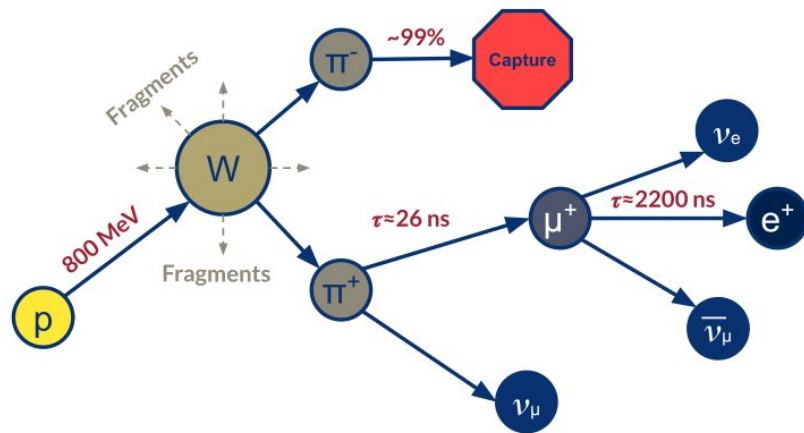
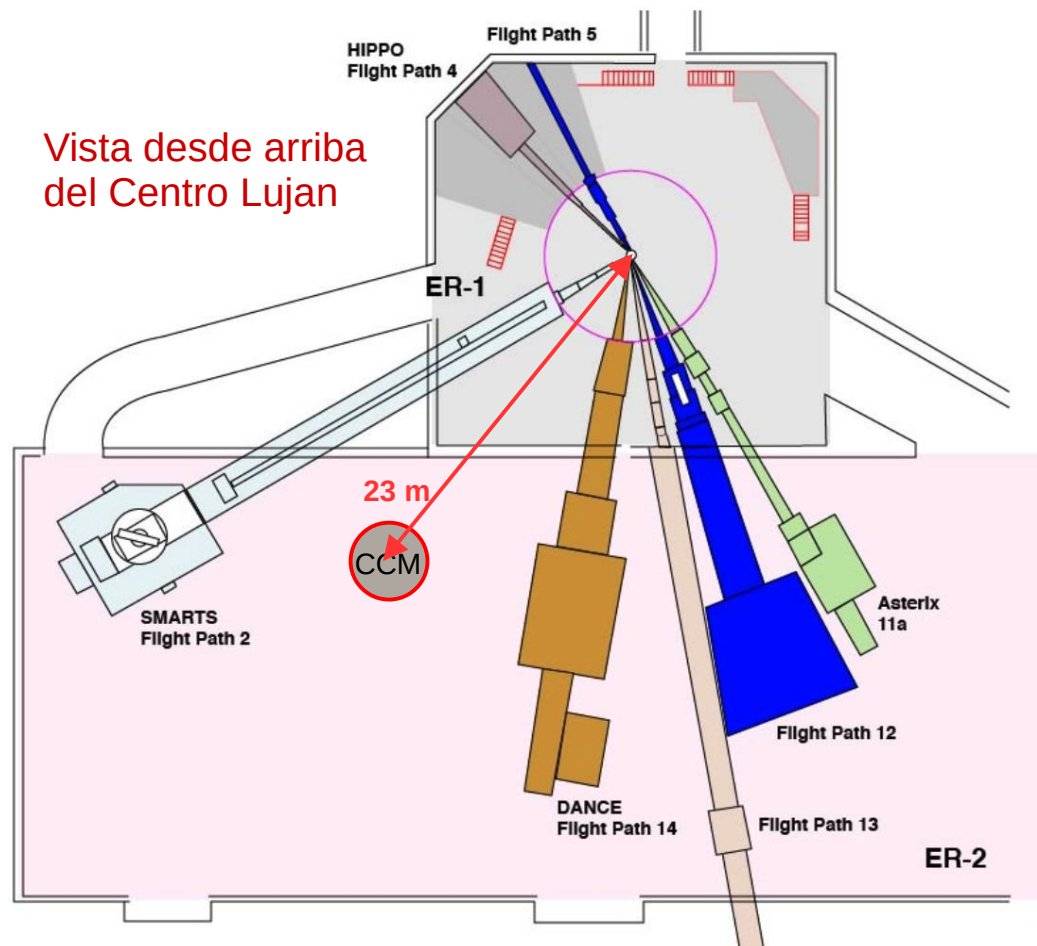
CAPTAIN: “Cryogenic Apparatus for Precision Tests of Argon Interactions with Neutrinos”



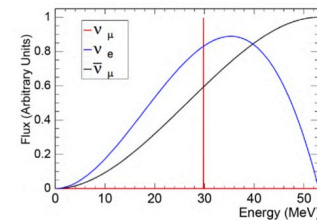
EMBRY-RIDDLE
Aeronautical University



CCM en el Centro Lujan

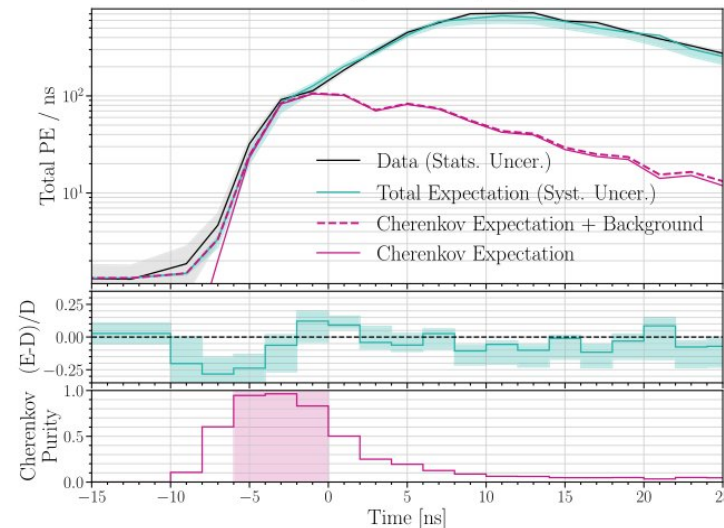
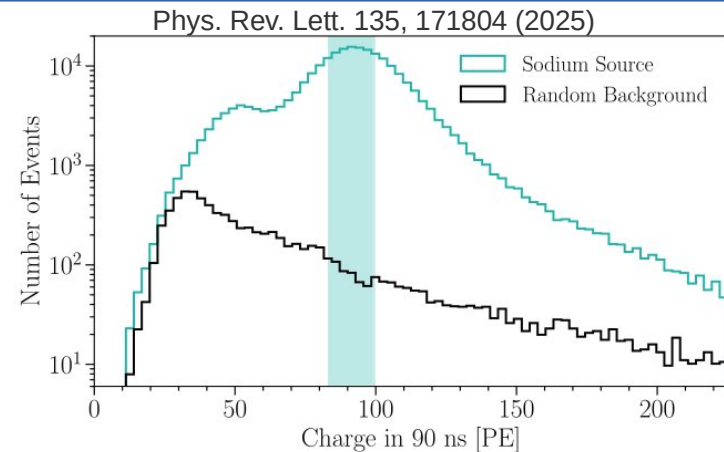
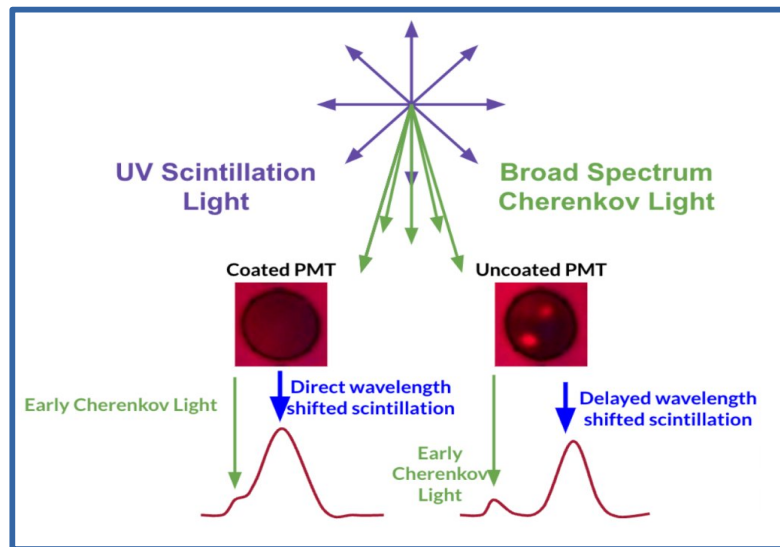


- CCM a 90° respecto al haz.
- Señal pronta de ν_μ a 30 MeV
- Señal retrasada de ν_e y $\bar{\nu}_\mu$.
- Ambiente del blanco tiene intenso flujo de: piones cargados, piones neutros, rayos gamma, muones, neutrinos y neutrones.
- Perfecto para producción del sector oscuro.



Recolección de luz en CCM

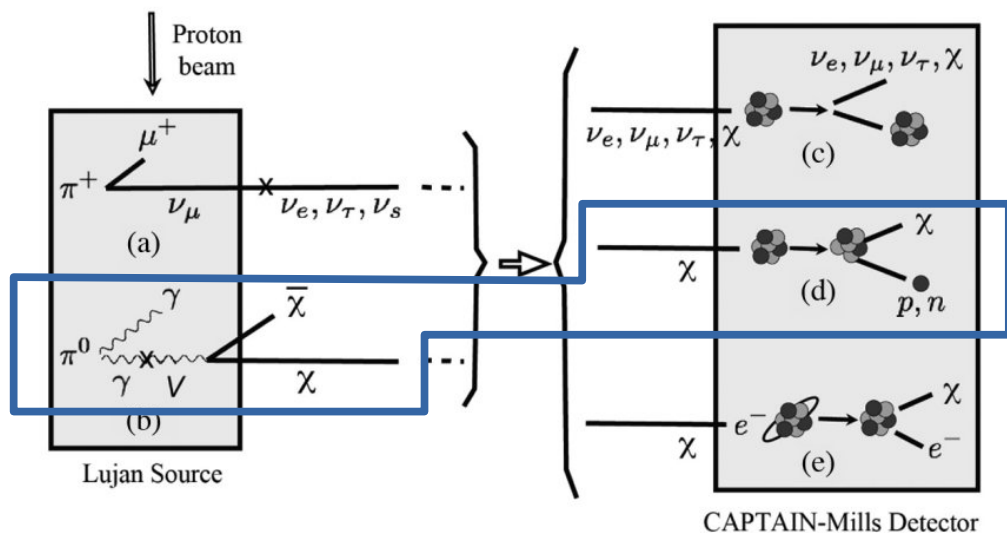
- LAr es un prolífico centellador en el UV, transparente a su propia luz de centelleo.
- TPB **corre** la luz producida (128nm) scintillation photons dentro del espectro visible (aumenta producción de fotones)
- Mezcla de PMTs con/sin recubrimiento de TPB ayudan en la identificación de partículas.
- **Puede asilar luz Cherenkov (espectro amplio) en los PMTs sin TPB → Detector Híbrido.**



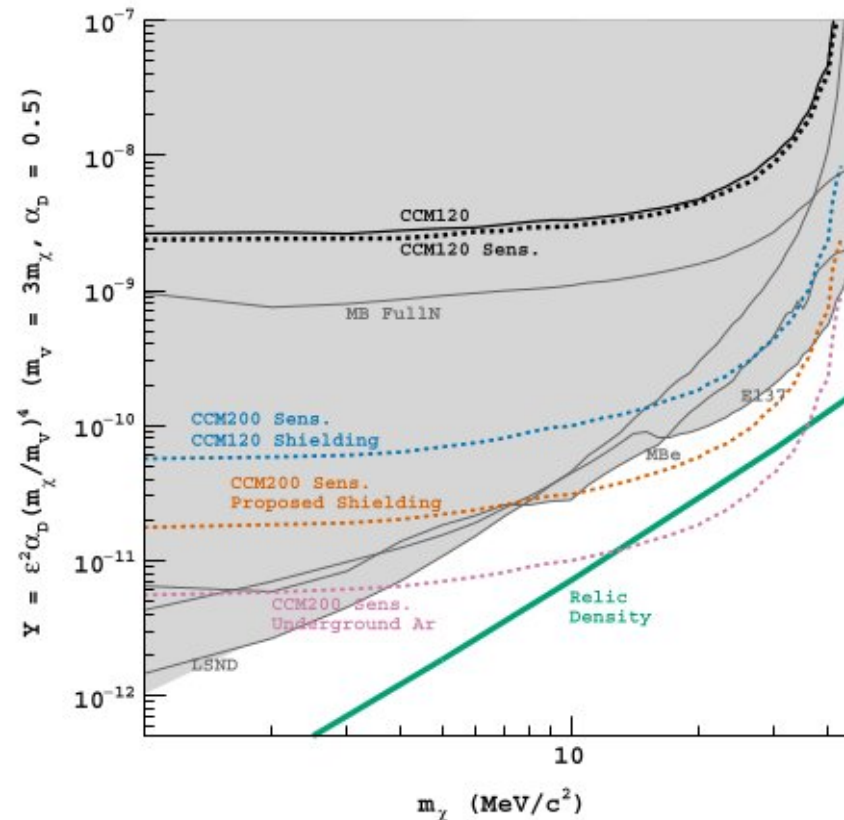
Materia oscura liviana en CCM

- MO del portal vectorial con MO en la escala de $\sim \text{MeV}$ [PRD 86, 035022 (2012)].

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} V_{\mu\nu}^2 - \frac{1}{2} m_V^2 V_\mu^2 + \varepsilon V_\nu \partial_\mu F_{\mu\nu} + |(\partial_\mu - g_D V_\mu)\chi|^2 - m_\chi^2 |\chi|^2 + \mathcal{L}_{h'}$$



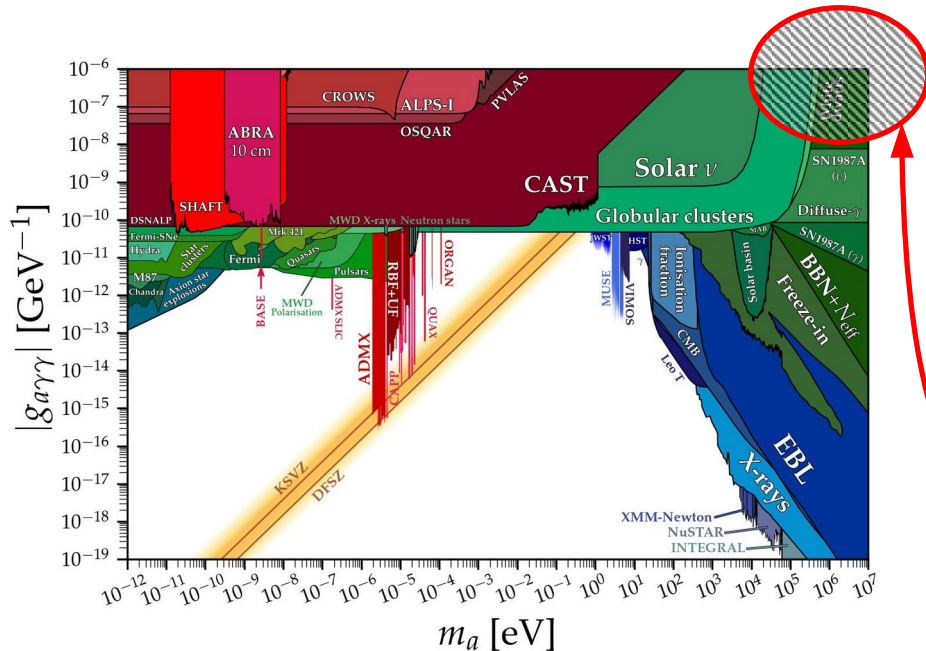
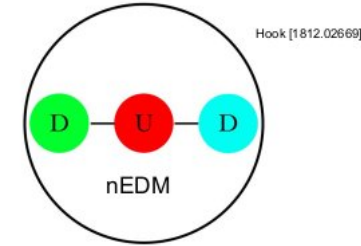
Phys. Rev. D 106,012001 (2022)



Axiones y Partículas tipo axión (ALPs)

- Axion de QCD: Solución al problema Fuerte de CP:

- ¿Por qué el MDE del neutrón es tan pequeño? $d_n < 10^{-26}$ e cm
- Relacionado al término de violación de CP en QCD: $\mathcal{L} \supset \theta GG$
- El axión provee mecanismo dinámico de conservación de CP
- Axion “mínimo” de QCD habita en una delgada banda en el espacio de parámetros “*masa-acoplamiento*”.



- Partículas tipo axión (ALP) aparecen en muchas teorías BSM bien motivadas:

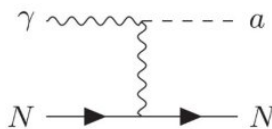
- explicaciones de MO, mediadores oscuros, física de neutrinos BSM.
- Búsquedas genéricas en el espacio de parámetros *masa-acoplamiento*.

CCM es sensible a ALPs con masas de hasta ~ 100 MeV (no en esta gráfica)

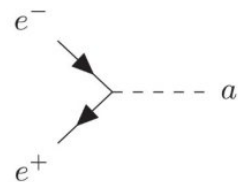
Axiones y Partículas tipo axi3n (ALPs)

- CCM sensible a ALPs con masas de ~ 1 keV a ~ 100 MeV
- Se3ales son de alta energ3a (1-10 MeV)
- Puede explorar el “tri3ngulo cosmol3gico” con medici3n directa

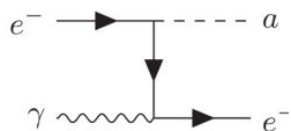
Canales de Producci3n en blanco de W



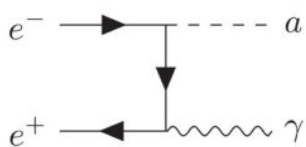
(a) Primakoff



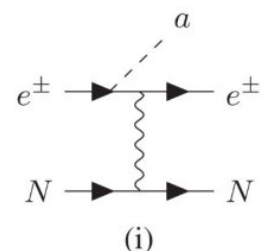
(g) Resonant production



(c) Compton

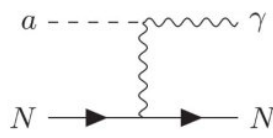


(e) Associated production

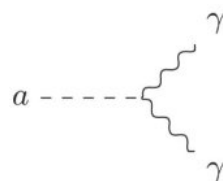


(i) ALP-bremsstrahlung

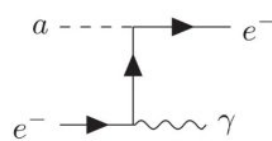
Canales de detecci3n en LAr



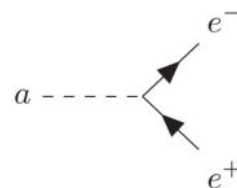
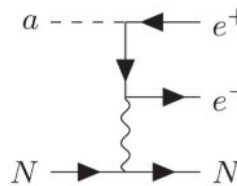
(b) Inverse Primakoff



(d) Diphoton decay

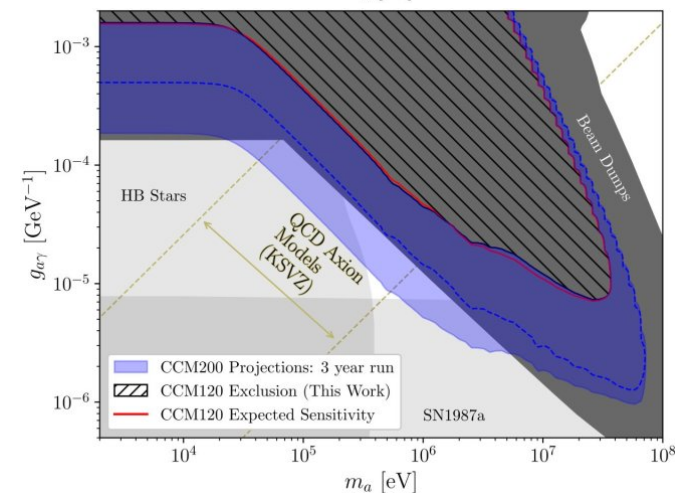
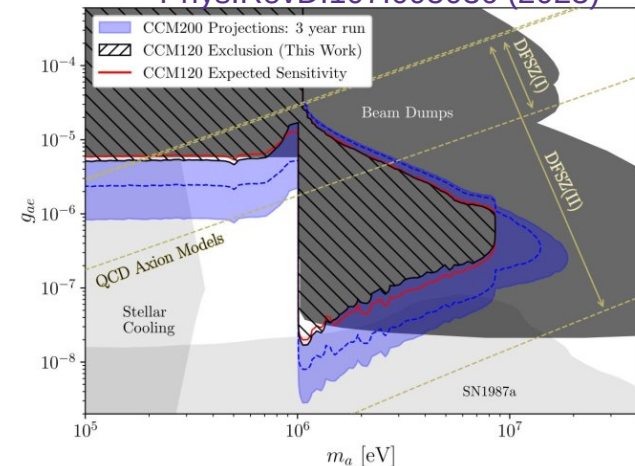


(f) Inverse Compton

(h) e^+e^- decay

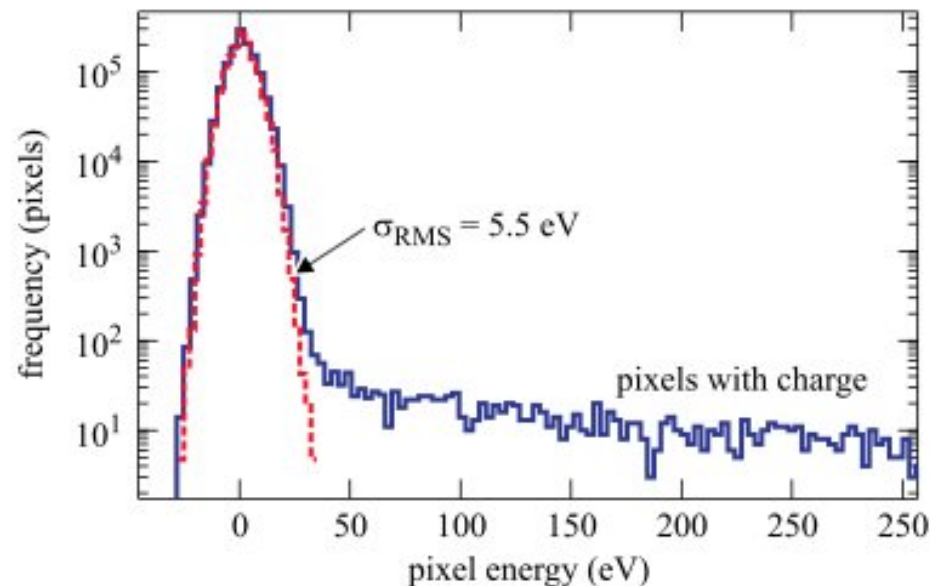
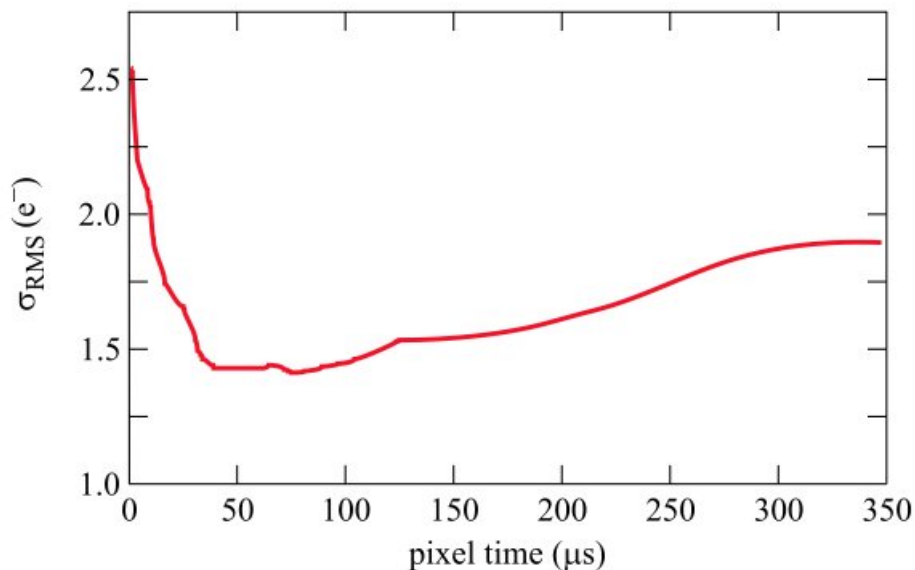
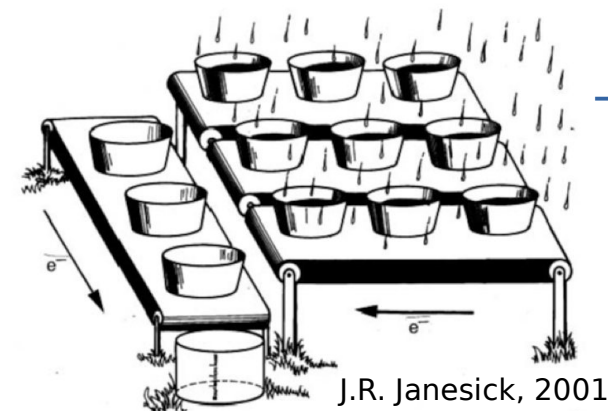
(j) External pair conversion

Phys.RevD.107.095036 (2023)



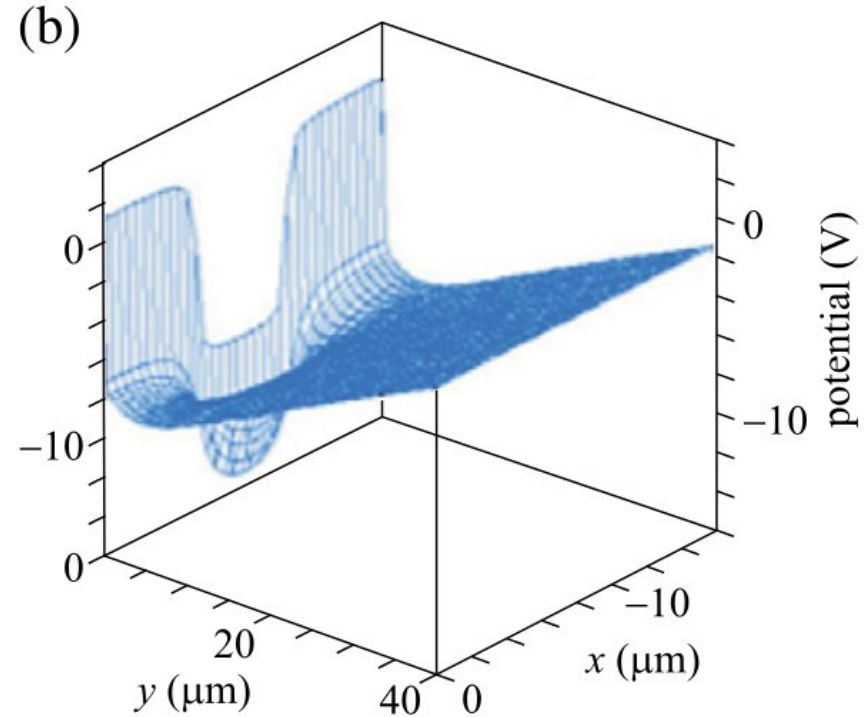
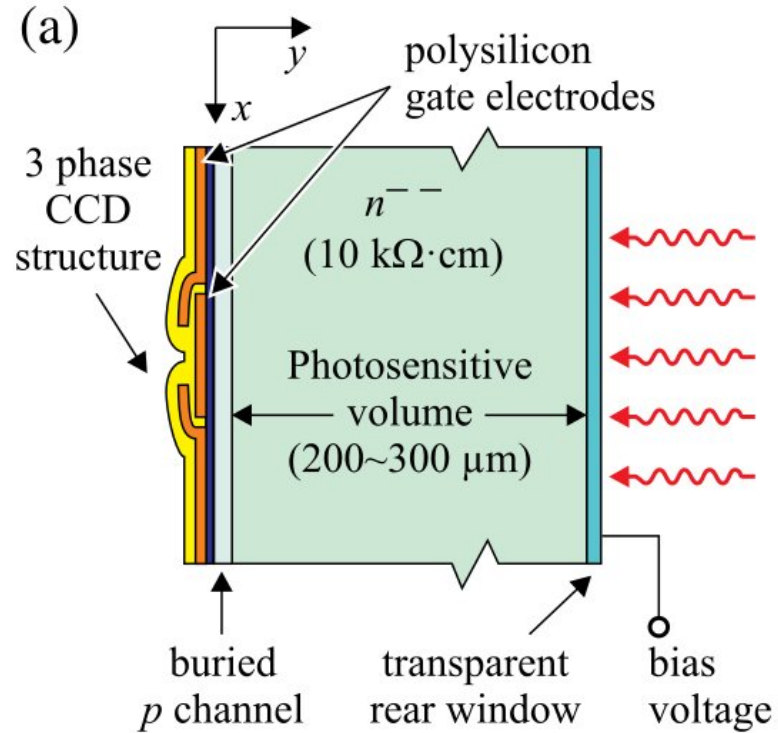
Ruido de lectura de CCD

- Añadido a cada pixel por el amplificador durante la lectura de carga.
- Distribución Gaussiana con σ_{RMS} que depende del tiempo de lectura del pixel.
- Pixel time = 30 μs \Rightarrow $\sigma_{\text{RMS}} = 1.5 e^- \equiv 5.5 \text{ eV}$ de energía de ioniz.



PRD91 (2015) 7, 072001

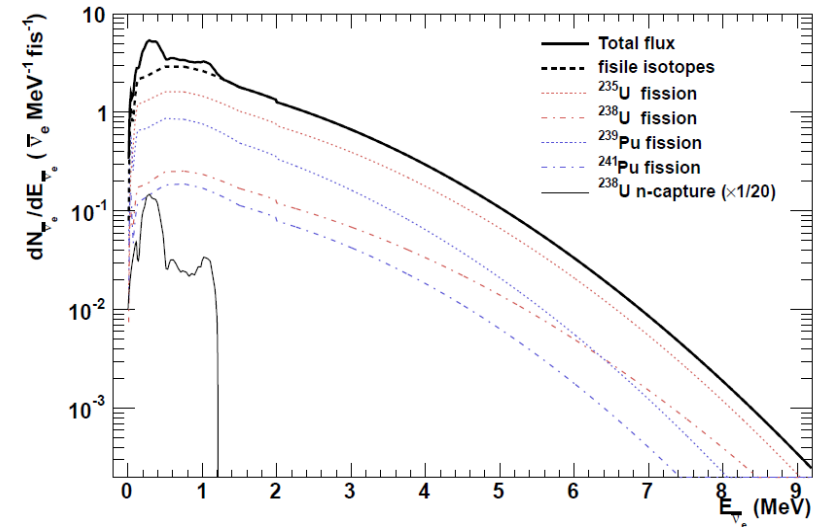
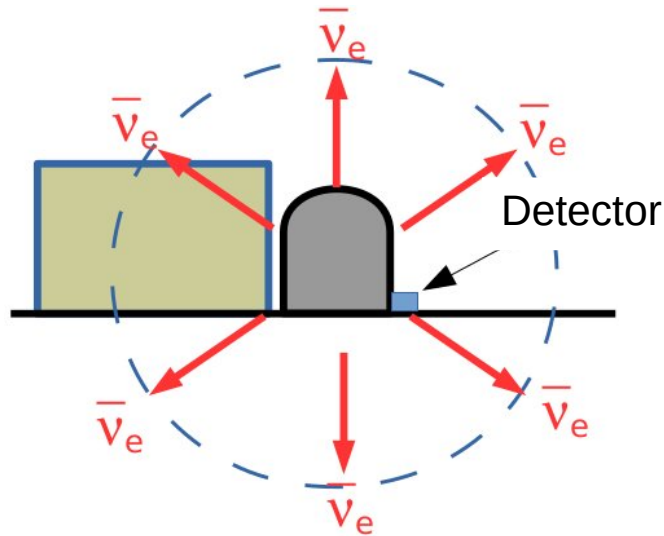
Pixel de un CCD



Reactor $\bar{\nu}_e$'s from Angra-2

- Angra-2: 3.95 GW_{th} pressurized water reactor (PWR).
- Emits $\sim 8.7 \times 10^{20} \bar{\nu}_e \text{s}^{-1}$ ($2.23 \times 10^{20} \bar{\nu}_e \text{s}^{-1} \text{GW}_{\text{th}}^{-1}$).
- Flux $\sim 7.8 \times 10^{12} \bar{\nu}_e \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ at 30 m from the core.

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



Needs update!

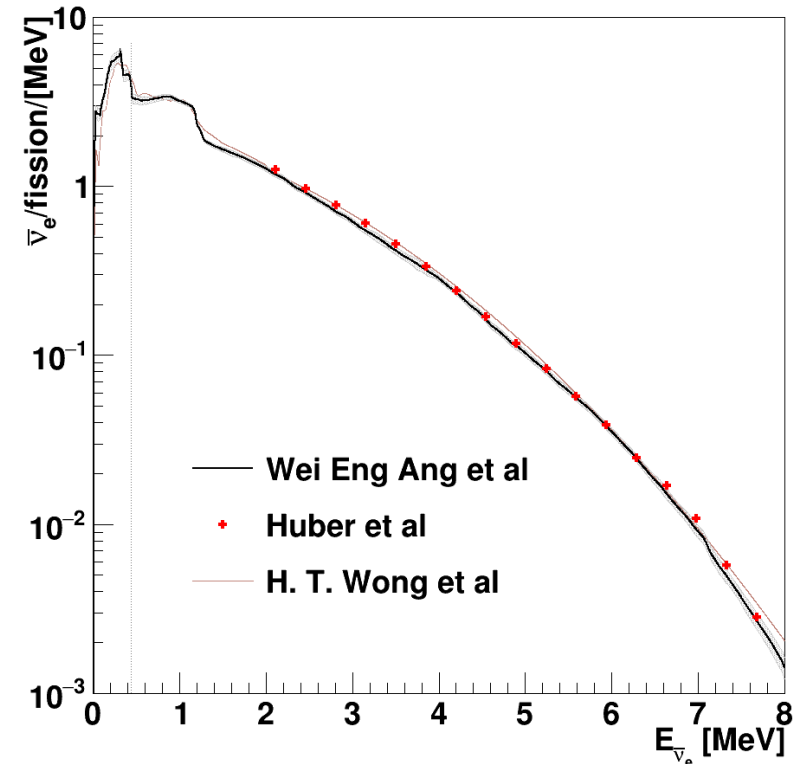
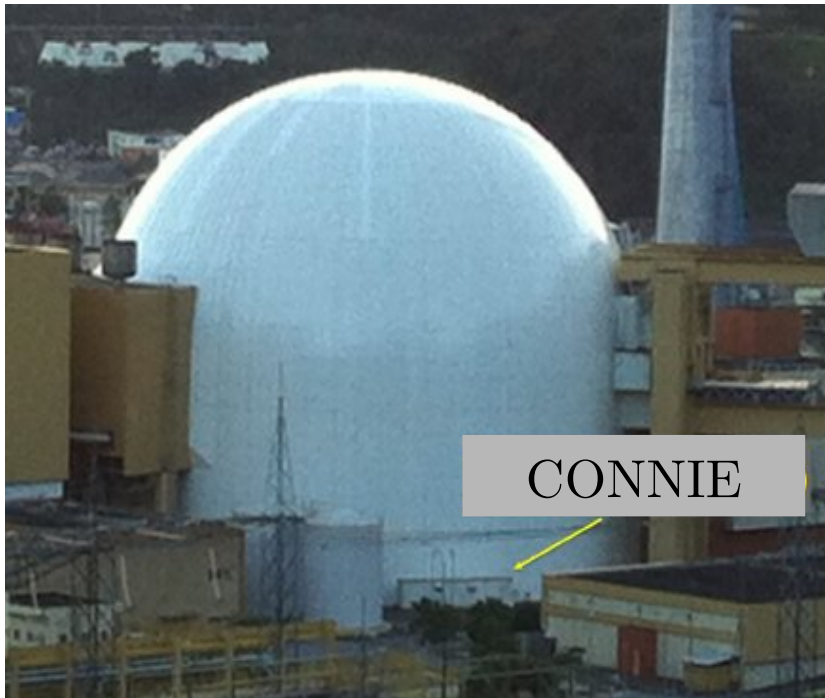
Dominant processes	(E release)	fis.frac.	$\bar{\nu}_e/\text{proc}$	$\bar{\nu}_e/\text{fis}$
^{235}U fission	202 MeV	0.56	6.14	3.43
^{238}U fission	205 MeV	0.08	7.08	0.56
^{239}Pu fission	210 MeV	0.30	5.58	1.67
^{241}Pu fission	212 MeV	0.06	6.42	0.38
n-capture on ^{238}U	202 MeV	0.60	2.00	1.20

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

Tot: 7.24

Reactor $\bar{\nu}_e$'s from Angra-2

- Updated neutrino flux model with improved antineutrino spectra for ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu .
- 15 eV ee threshold corresponds to a minimum neutrino energy ~ 0.44 MeV,
- Above that energy the new and old model agree within 3%.



The CONNIE experiment

Located in the Almirante Alvaro Alberto nuclear plant near Rio de Janeiro, Brazil.

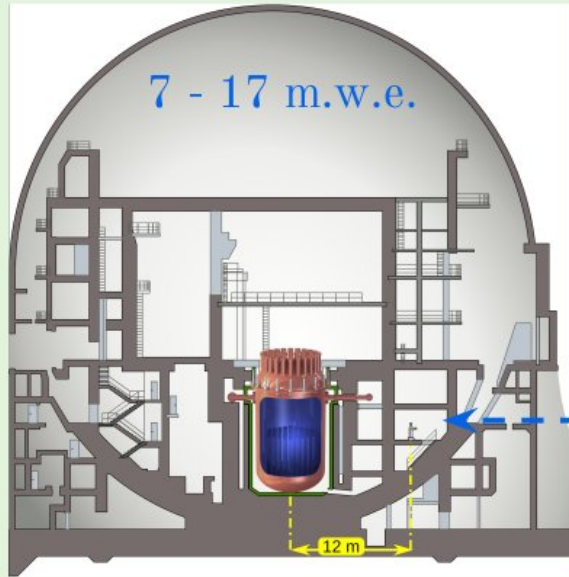


Atucha II Experiment

[Eliana Depaoli, Magnificent CEvNS 2025]

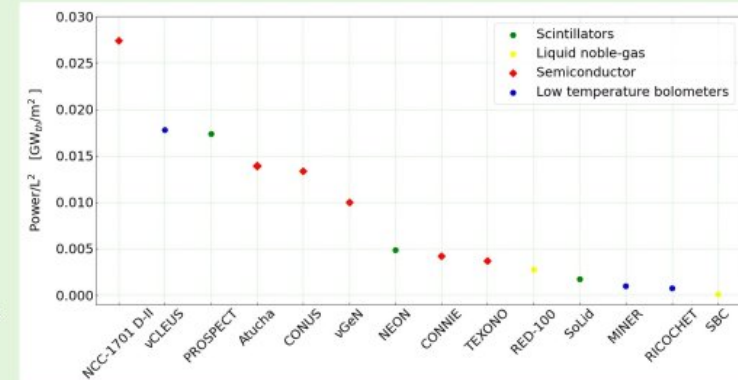
Short-baseline ν -experiment at Atucha II power plant

- Commercial facility, 2.2 GWth
- Fuel: Natural UO_2
- D_2O moderator & refrigerator



Dose $1 \mu\text{Sv/h}$
@detector room

$$\Phi_\nu = 2.6 \times 10^{13} \bar{\nu}_e / \text{cm}^2 / \text{s}$$

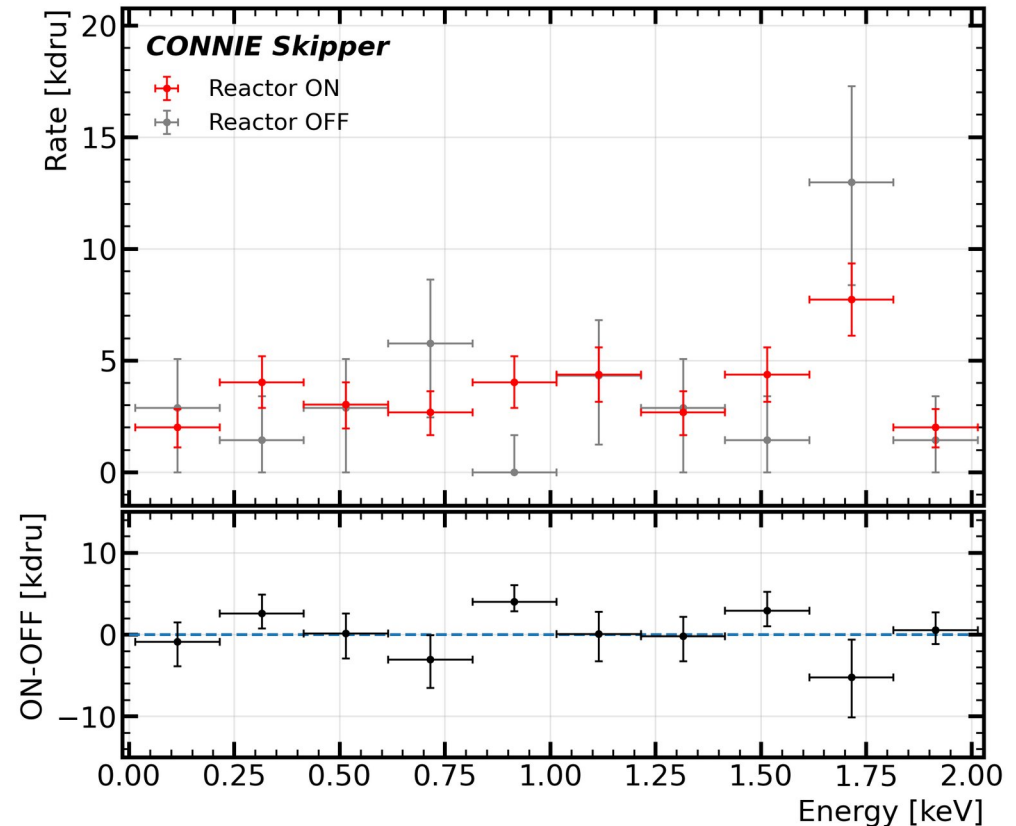


Energy spectrum

Phys.Rev.D 113, 092017 (2026)

Comparison between the Reactor-ON and Reactor-OFF event rates.

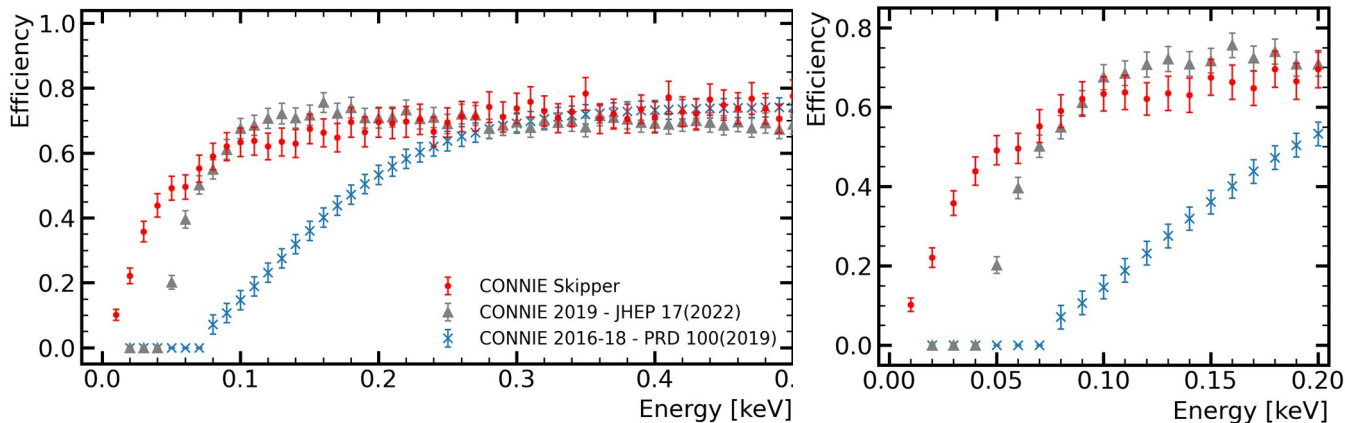
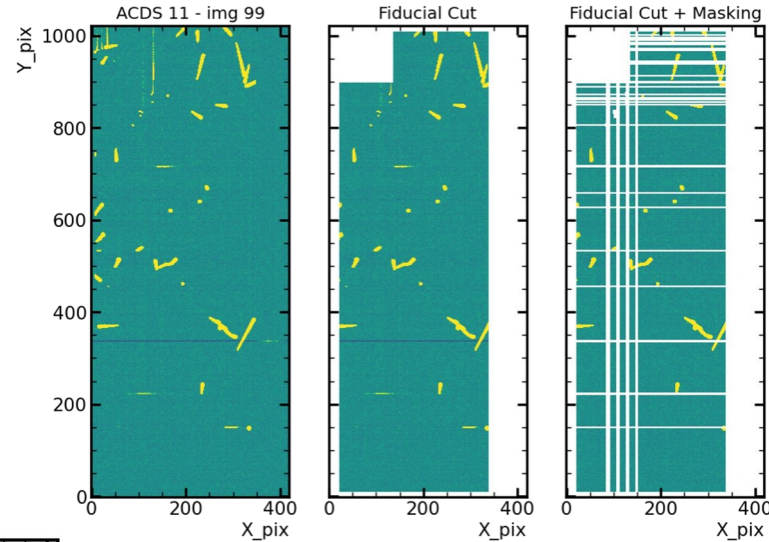
- Data taken during 243 days with reactor-on and 57 days off.
- Exposure of **14.9 g-days** with **Reactor-ON** and **3.5 g-days** with **Reactor-OFF**.
- No excess (CEvNS or otherwise) observed.
- Flat background rate \cong **4 kdru**.
- Improved background and threshold.



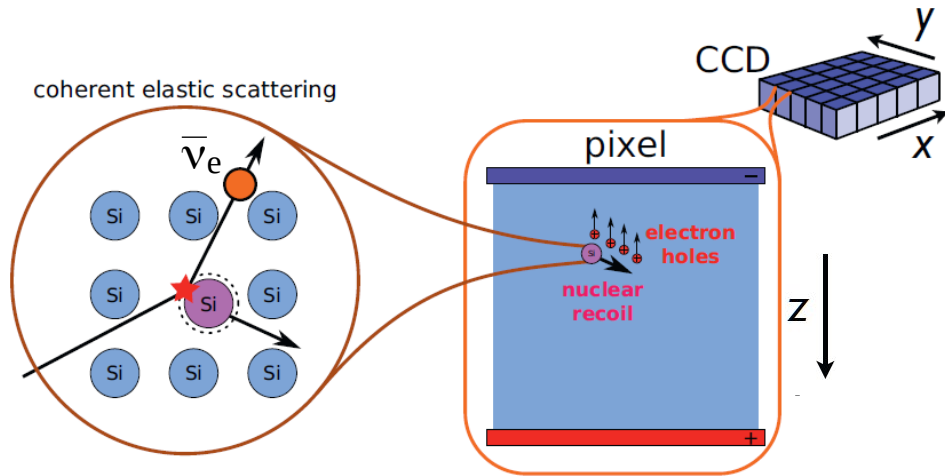
Selection and efficiency

arXiv: 2403.15976

- Event extraction and selection:
 - Excluding sensor edges,
 - Masking hot columns/rows/serial register,
 - Data quality: Noise < 0.17 e-.
 - Data quality: SER < 0.14 e-/pix/day,
 - Event size: diffusion $0.20 < \sigma_{X,Yfit} < 0.95$ pix.
- Efficiency determined from simulations.
- Allows to lower the threshold to 15 eV.



CCD como detector de partículas

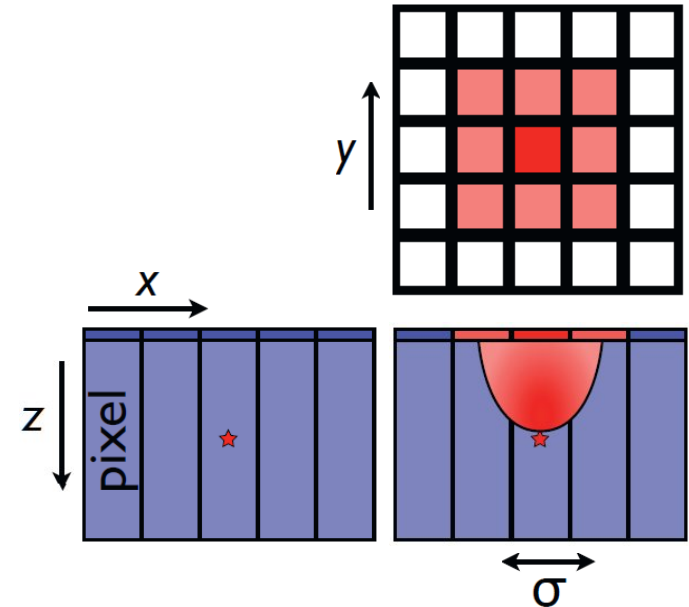


La dispersión de un ν con un núcleo de Si produce ionización.

Portadores de carga derivan a lo largo de la dirección z y son recolectados en las compuertas del CCD.

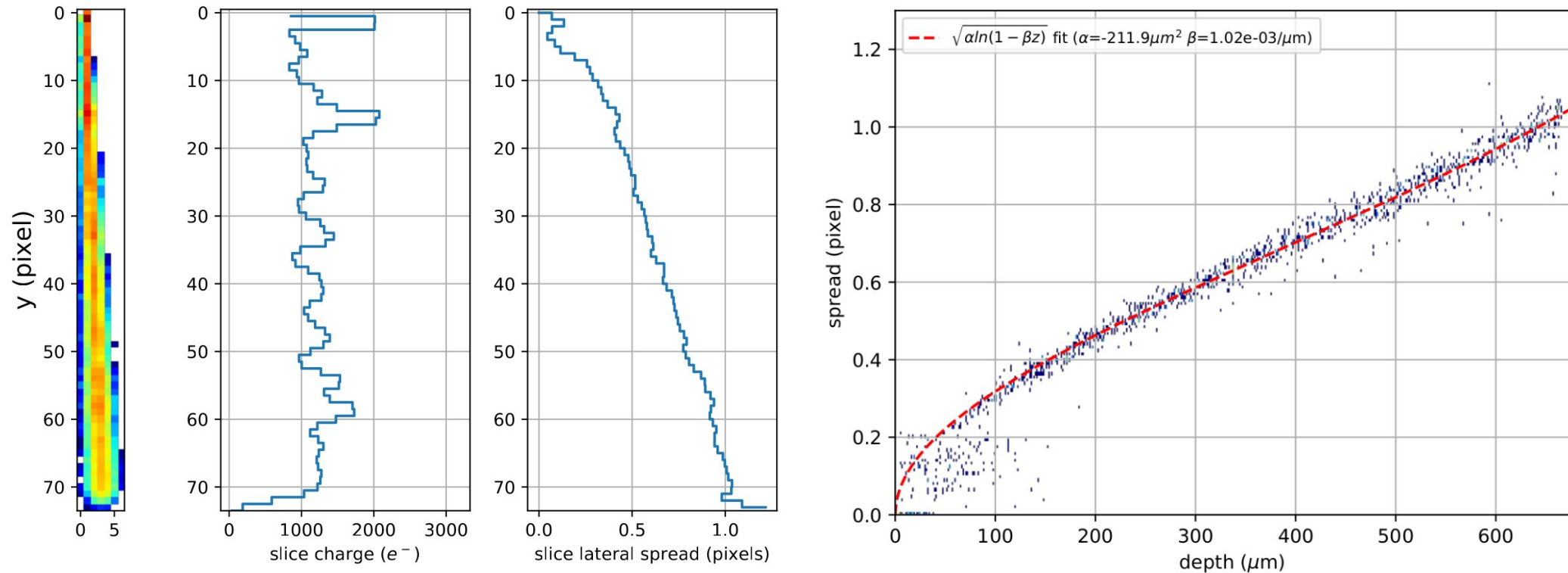
La carga se difunde en el plano x - y mientras es arrastrada hacia las compuertas.

El tamaño radial del cúmulo se usa para estimar su posición en z dentro del bulbo del CCD.



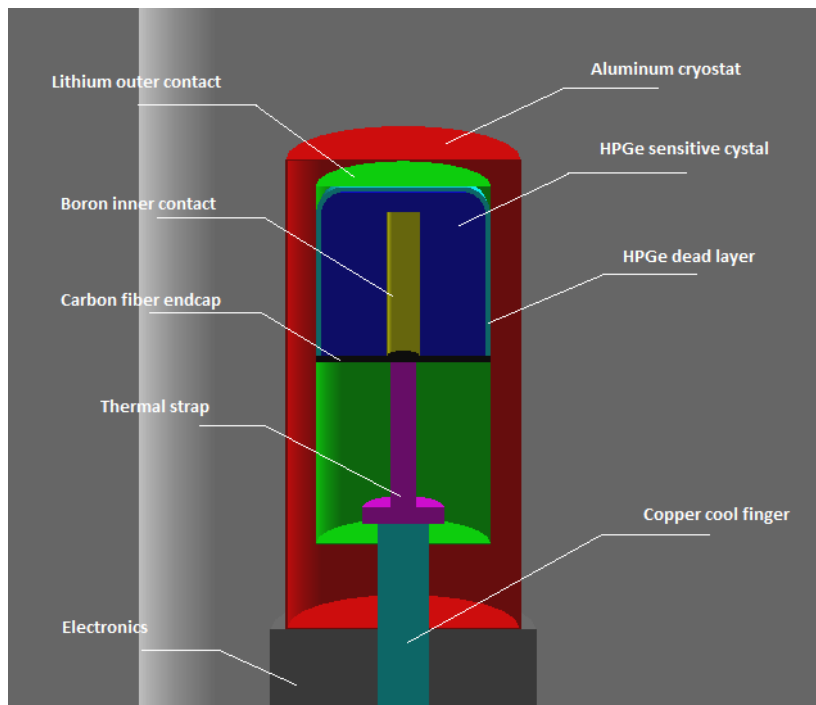
Skipper-CCD depth vs size calibration

Calibration using “y-parallel” muons

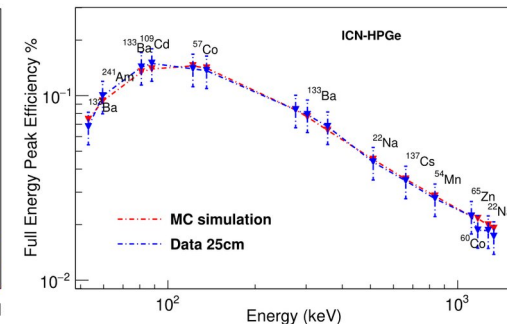
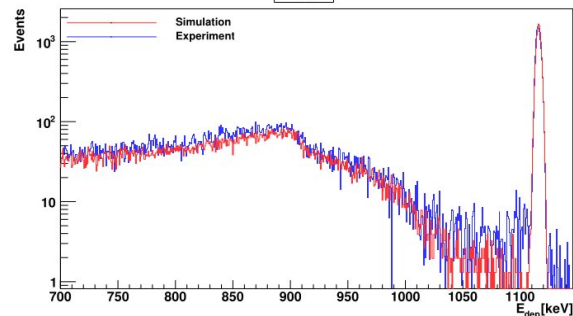


Detector de Germanio de Alta Pureza (HPGe) JINST, 15,P11014 (2020)

- Donado por grupo de Fermilab en DAMIC en 2015.
- Caracterizado en 2020. Propuesto para instrumentar el Laboratorio Subterráneo de LabChico
- Mejoras en 2019 y 2021 (proyectos de GCRF-UK, Colab IF-UNAM, Royal Holloway-U. London)



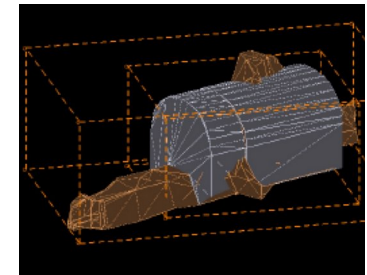
Characterization of germanium detectors for the first underground laboratory in Mexico JINST, 15,P11014 (2020)



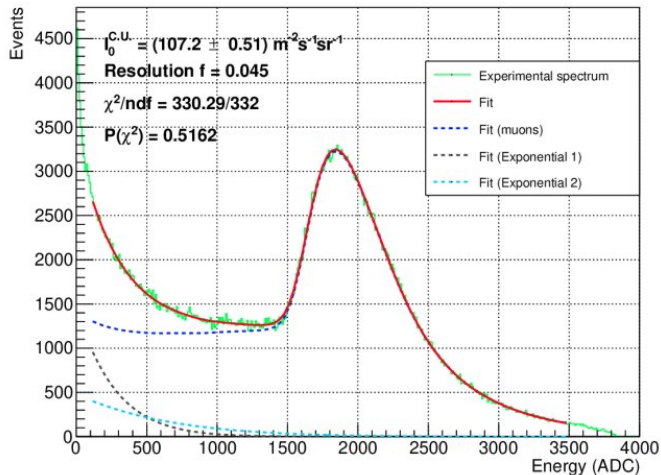
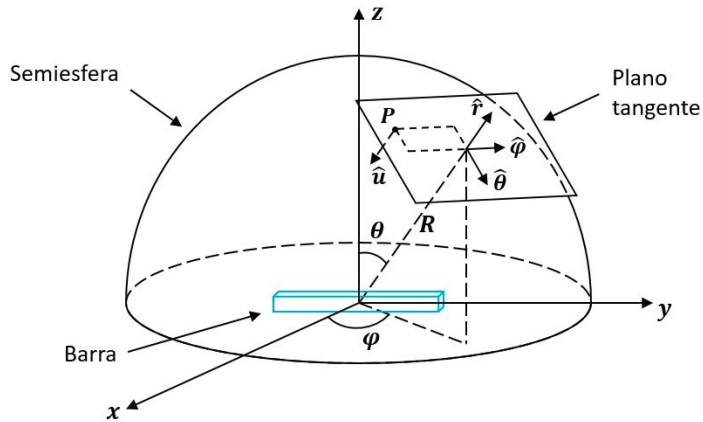
LabChico (Mineral del Chico, Hidalgo)



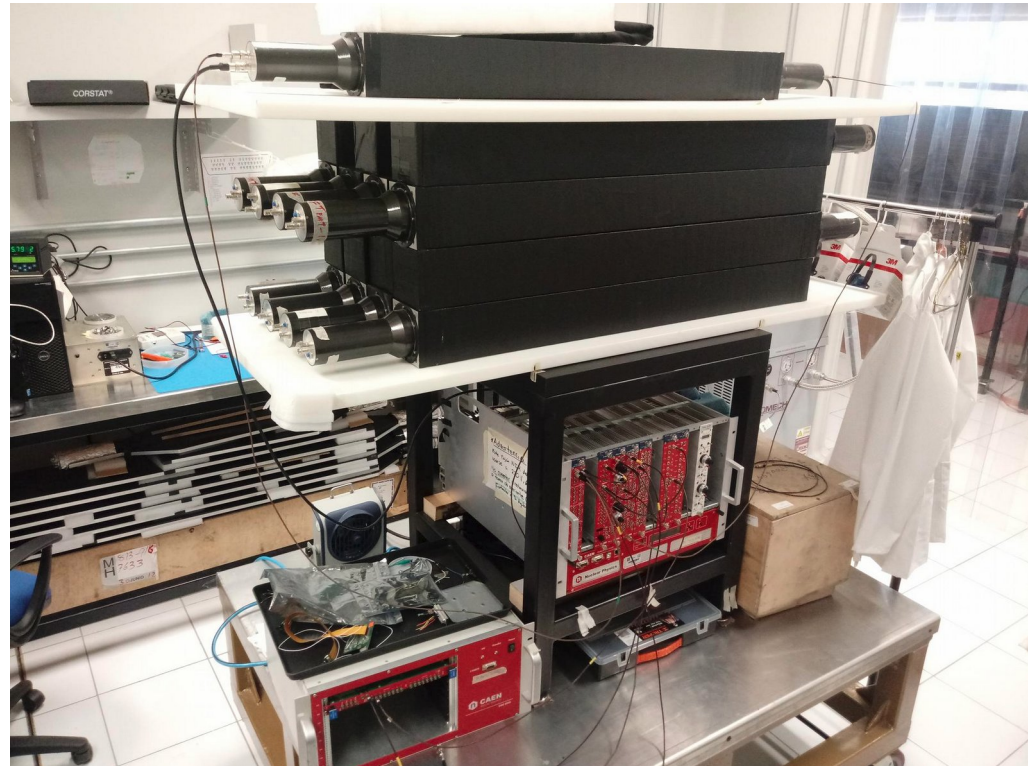
- Proyecto para la construcción de un **laboratorio subterráneo** de baja profundidad en una mina (La Guadalupe) del **Geoparque Comarca Minera de Hidalgo**.
 - Enfoque en Investigación, Innovación y Educación.
 - Colaboración de varias dependencias de la UNAM:
 - Instituto de Ciencias Nucleares, Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Centro de Ciencias de la Atmósfera / Geoparque Comarca minera de Hidalgo
 - Apoyo de proyectos del fondo **GCRF de Reino Unido** (2018 a 2021)
 - De 2018 a 2021: Selección del sitio, estudios geomecánicos, levantamiento topográfico, pruebas *in situ* con detector de Germanio del ICN, y detector de NaI del IF, actividades de divulgación (Jornadas La Ciencias de Lab Chico). 5 publicaciones científicas asociadas.
 - Discusiones con autoridades del estado de Hidalgo sobre posibilidades de financiamiento local y permisos requeridos (Citnova, SGM).
 - Progreso dificultado por pandemia de COVID19 durante 2020 y 2021.
 - Interés local disminuido por cambio de gobierno local en 2022.
 - Financiamiento de GCRF concluyó en Dic 2021. Actividades del grupo suspendidas.
- Aunque el proyecto no pudo concretarse, se aprendieron lecciones valiosas para un posible replanteamiento a futuro.**



Intensidad vertical de muones en CU



B. Olmos and AA-A, Nucl.Inst.Meth. A987,164870 (2021)

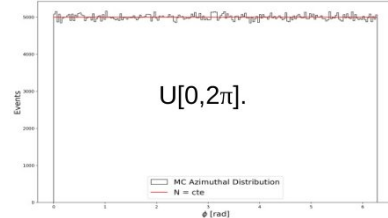
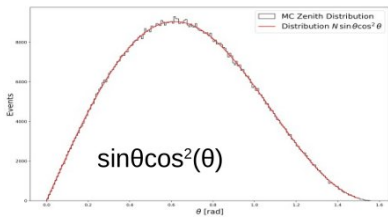


El método está siendo implementado en CCM (Cristian Macías) y En skipper-CCDs en CONNIE (M. Sánchez)

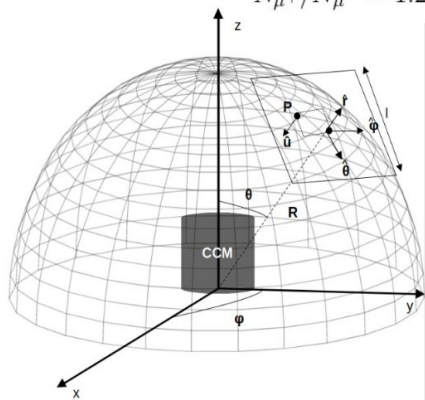
Muones atmosféricos en CCM

$$dN/dAdtd\Omega = I(\theta) = I_0 \cos^2(\theta)$$

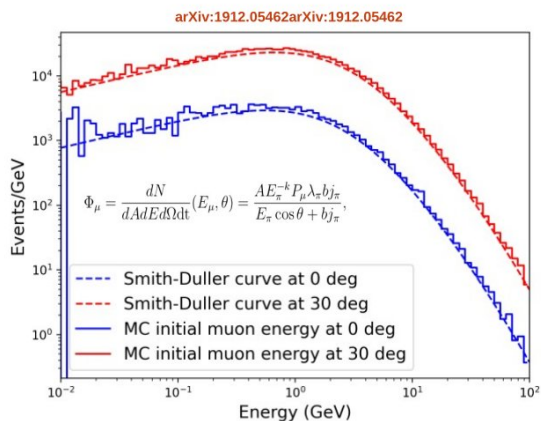
I_0 : muon vertical intensity



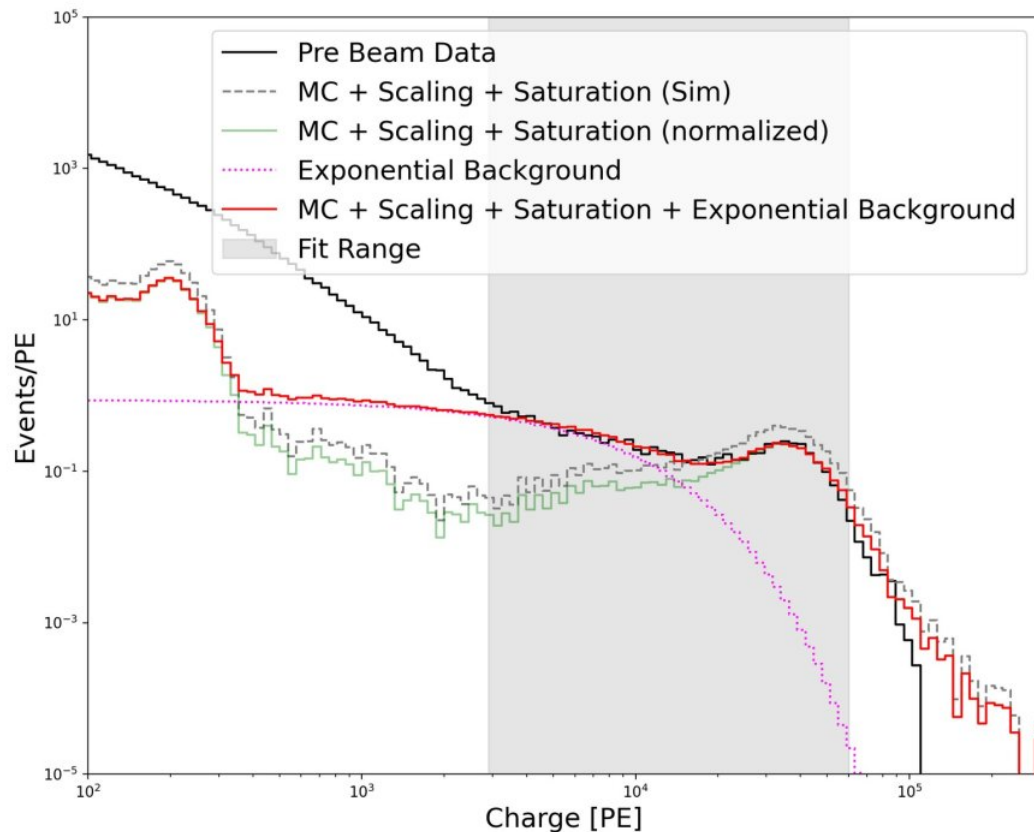
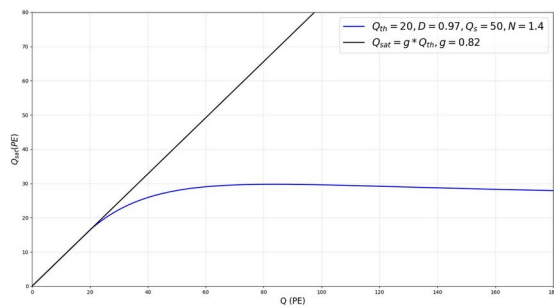
$$N_{\mu^+}/N_{\mu^-} = 1.2$$



Energy follows the **Smith-Duller parametrization**

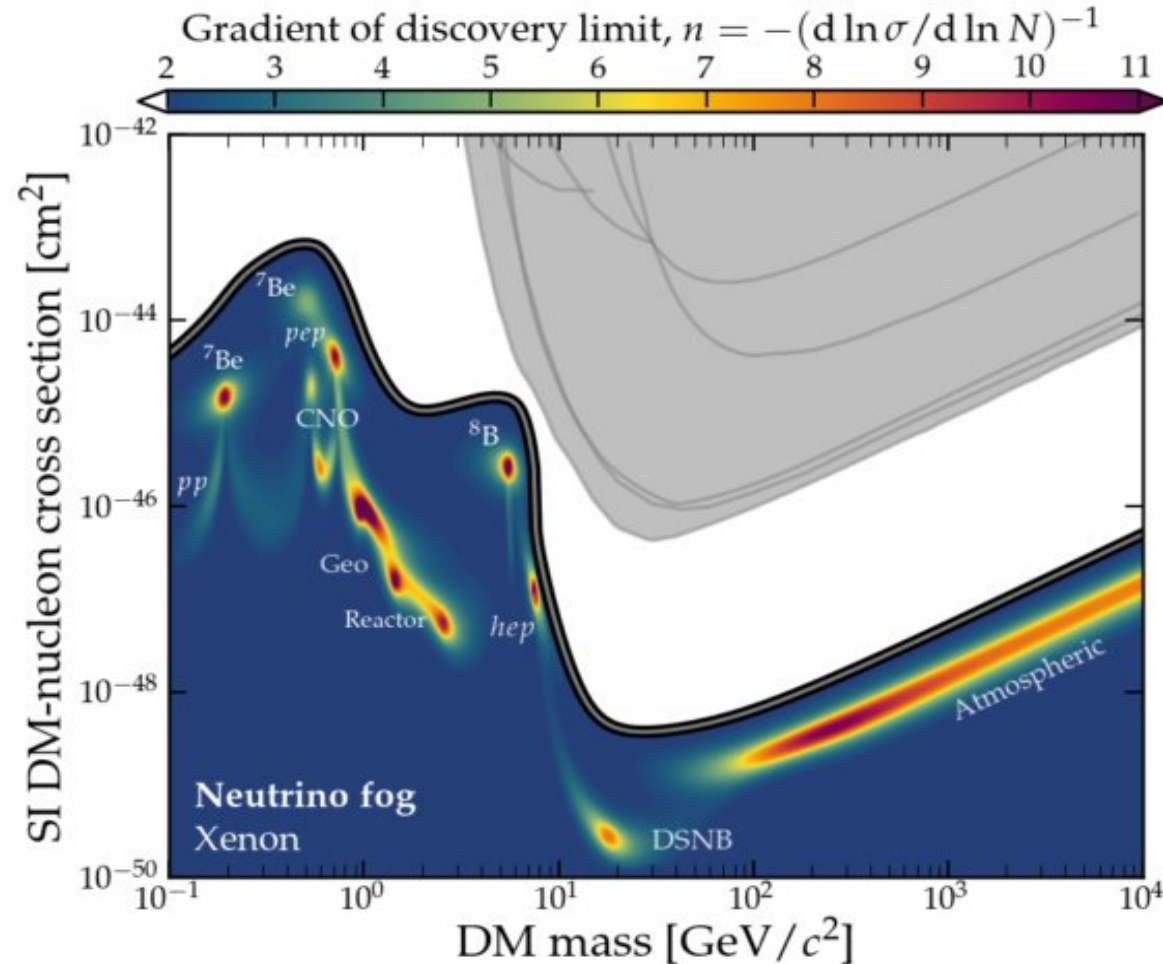


14



La “niebla” de neutrinos

Phys. Rev. Lett. 127, 251802 (2021)



Search for three body pion decays $\pi^+ \rightarrow l + \nu X$ Phys. Rev. D 103, 052006 (2021)

Diseñado para medir con alta precisión del BR: $R^\pi = \frac{\Gamma[\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e (\gamma)]}{\Gamma[\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu (\gamma)]}$

Límites a decaimientos exóticos: $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu X$ $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu X$

Técnica: Búsqueda de “bumps” en espectros de energía.

