

Materia Oscura: más allá del WIMP

Javier Tiffenberg[†]

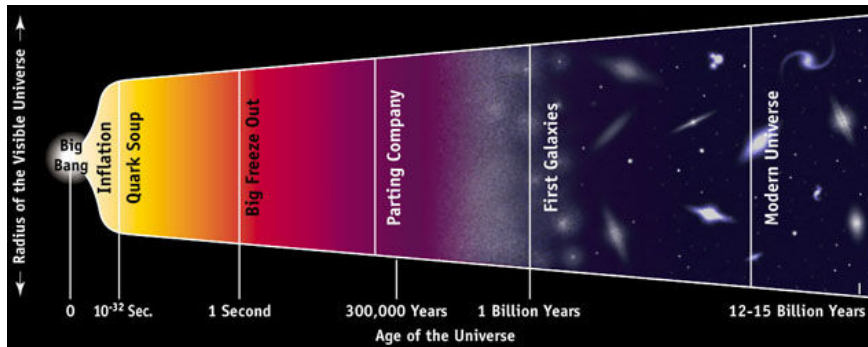
23/09/2020

[†] Fermi National Laboratory

En esta charla

- Teorías con candidatos a materia oscura liviana
- Complementariedad entre búsquedas directas y en colisionadores (LHC y otros)
- Canales y técnicas de detección directa
- Resumen de experimentos existentes y futuros
- Escalas de tiempo de estos experimentos

Materia oscura: para qué?



OBS:

BBN

CMB

LSS

Galáxias

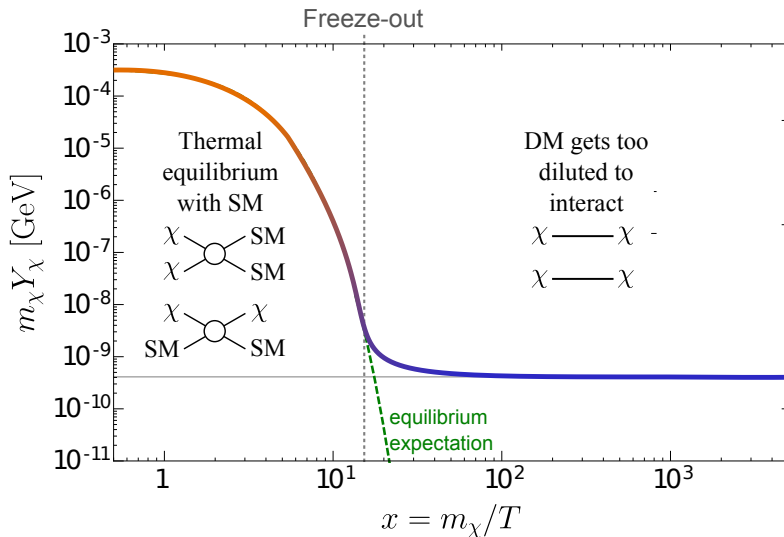
La materia oscura permite explicar de manera coherente las observaciones que tenemos sobre la evolución del universo desde 1s después del Big-Bang

Materia oscura: qué es?

- Todas las observaciones dependen de interacciones gravitatorias
- Tenemos mucha información sobre su distribución a escalas cósmicas
- ..pero muy pocas certezas sobre su naturaleza microscópica
- La gran mayoría de las teorías asume que la naturaleza de la DM puede ser descripta con el lenguaje de la física de partículas
- Detección directa y producción dependen de que interactúe de alguna otra forma además de gravitatoriamente

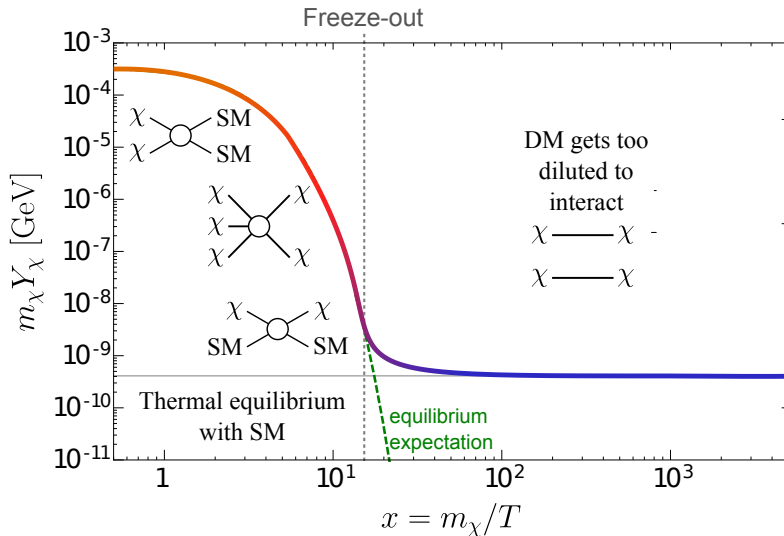
Posibles historias de producción post-BB (Freeze-OUT)

WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)

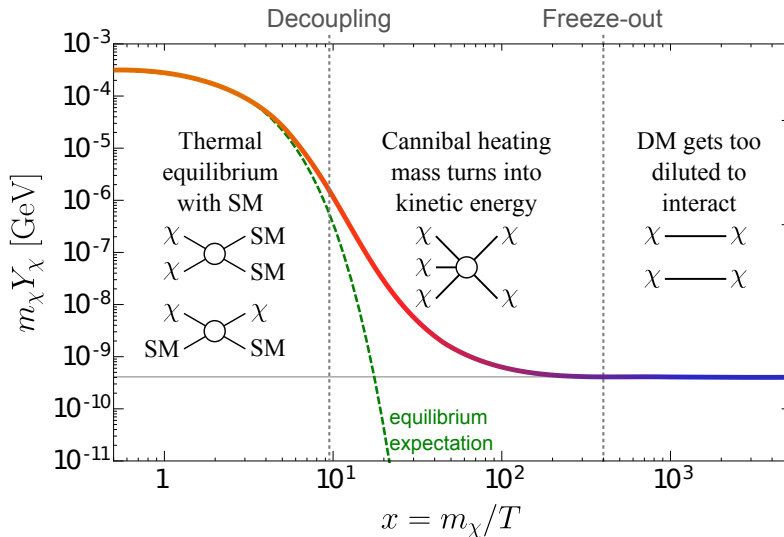


Posibles historias de producción post-BB (Freeze-OUT)

SIMP (Strong Interacting Massive Particles)

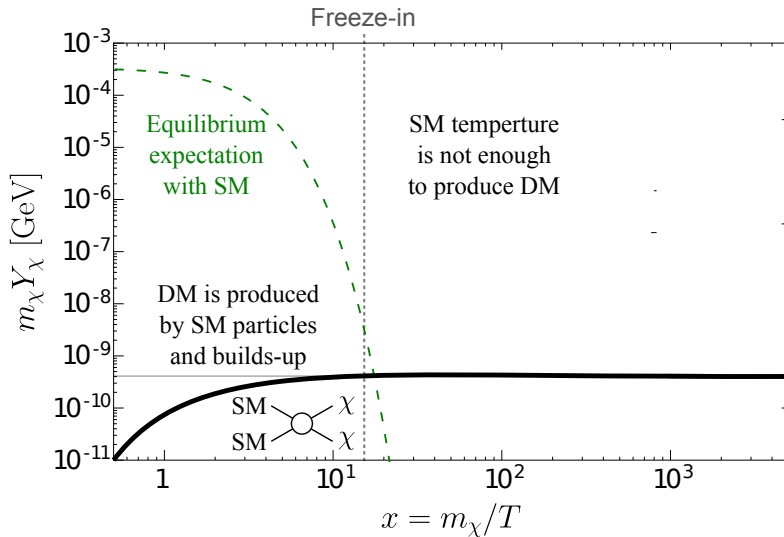


ELDER (ELastically DEcoupling Relic)

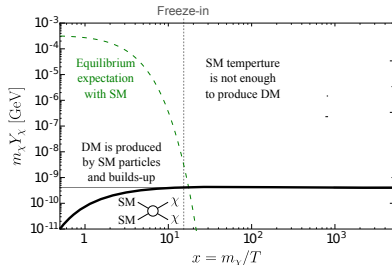
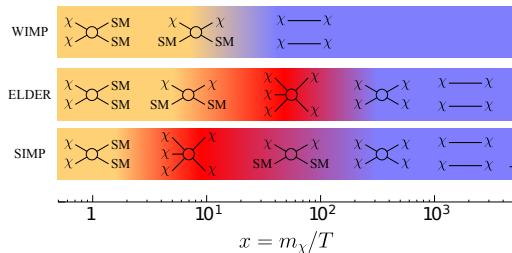


Posibles historias de producción post-BB (Freeze-IN)

Otra posibilidad es un BB sin DM y que la materia ordinaria la cree



Posibles historias de producción post-BB

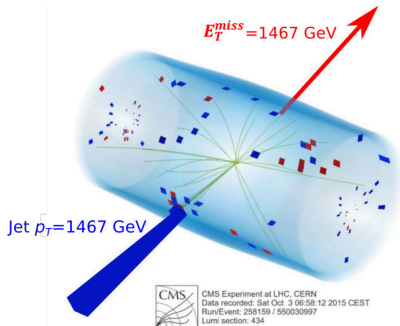
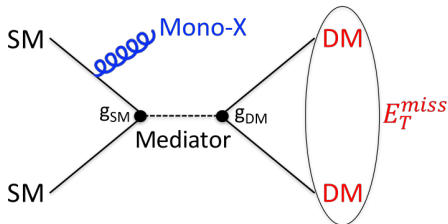


En resumen..

- Hay una gran libertad
- Hay que mirar por todos lados
- No pareciera que teoría+cosmología nos vayan a dar la respuesta

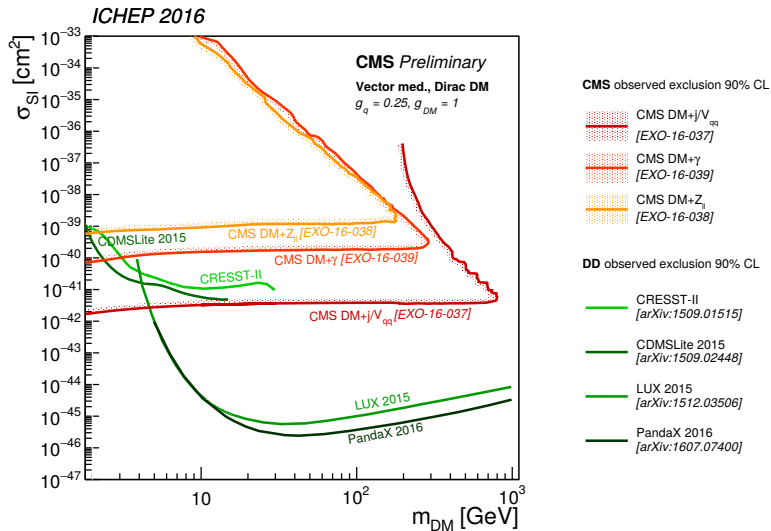
Habiendo un LHC.. realmente necesitamos detección directa?

Si la materia oscura interactúa con partículas del SM se podría producir

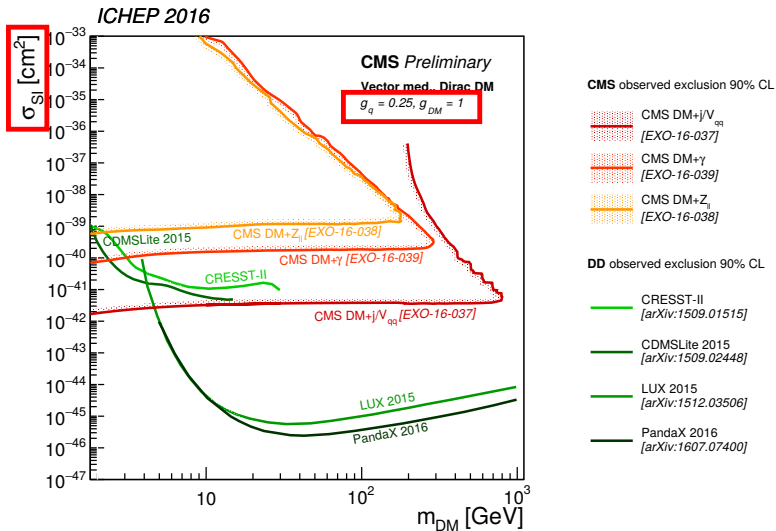


Ejemplo de producción de partículas de materia oscura en el LHC

Habiendo un LHC.. realmente necesitamos detección directa?

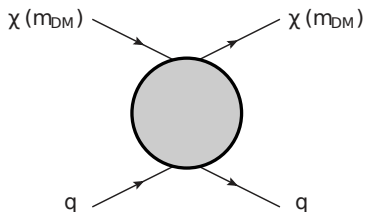


Habiendo un LHC.. realmente necesitamos detección directa?

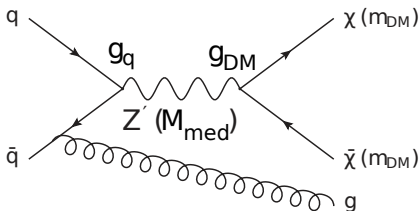


Las escalas de energía son muy diferentes

Direct detection probes σ_{SI}^0



Production at colliders depends on interaction structure



$$\sigma_{SI}^0 \propto \frac{g_q^2 g_{DM}^2 \mu_{n-DM}}{M_{med}^4}$$

Ejemplo: modelos simplificados

la producción desaparece si g_q es chico pero σ_{SI}^0 puede ser grande si M_{med} también es chico

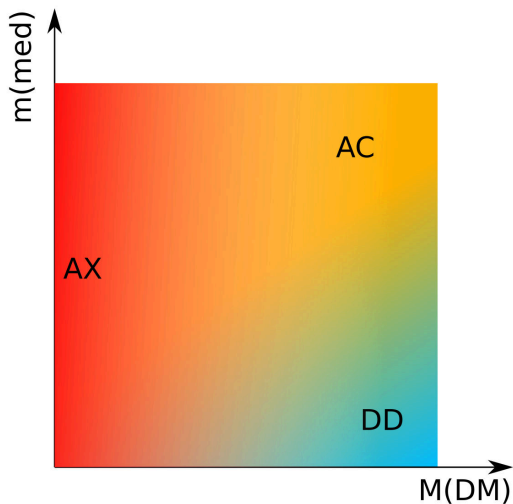
Complementariedad

- la producción es difícil si el mediador es liviano
- DD es menos dependiente de la estructura de la interacción
- la producción no depende de hipótesis astrofísicas

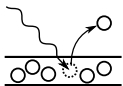
En resumen..

- No sabemos de que está hecha la DM, hay que explorar todas las opciones
- DD y colisionadores miran cosas distintas. Por suerte hay zonas en común. Sería muy lindo poder ver las dos señales.
- Poder de convencimiento: una señal positiva no va a ser suficiente. Afirmaciones extraordinarias requieren evidencia extraordinaria.

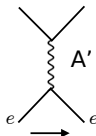
Detección directa vs. producción de DM



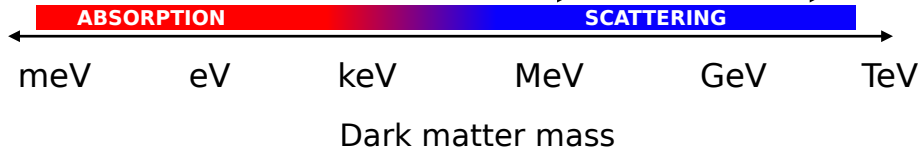
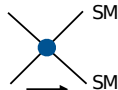
Bosonic DM
axion, dark photons



Light DM +
light mediators



Standard
WIMP

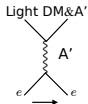


Adapted from Lin-17

Candidatos para detección directa



- Interacciones con núcleos pueden tener efectos coherentes $\sigma_{\text{n-DM}}$
- Hay detectores que discriminan interacciones con el núcleo y los electrones
- Requiere núcleos livianos para masas < 10 GeV
- Targets: gases/líquidos nobles, cristales criogénicos, semiconductores, centelladores



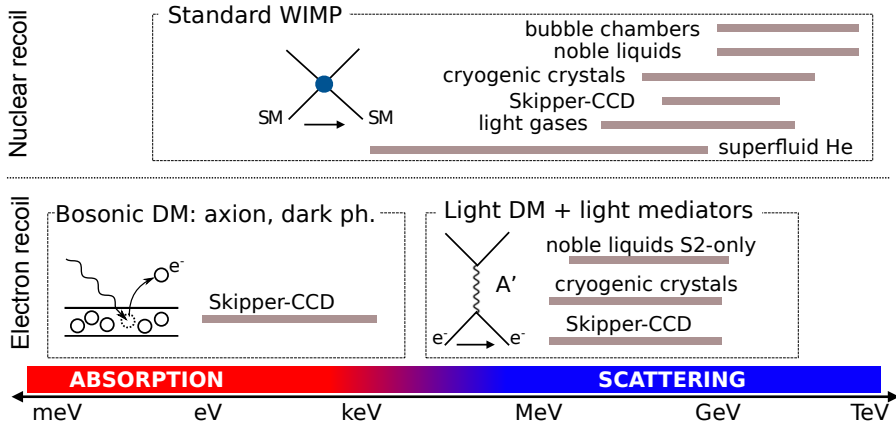
- Interacciones con electrones
- Targets: gases/líquidos nobles, cristales criogénicos, semiconductores

Bosonic DM

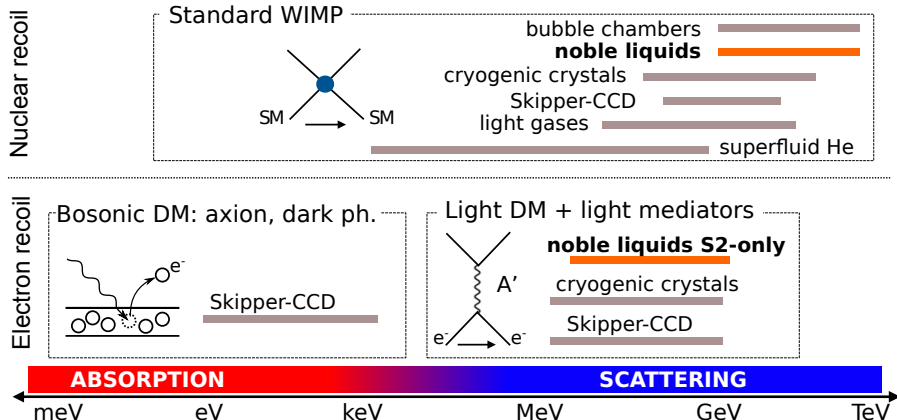


- Conversión a fotón, absorción fotoeléctrica
- Targets: cavidades resonantes, semiconductores

Estrategias experimentales en la búsqueda de DM

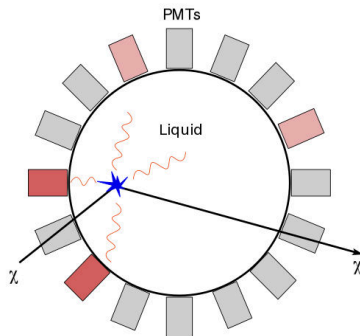


Estrategias experimentales en la búsqueda de DM



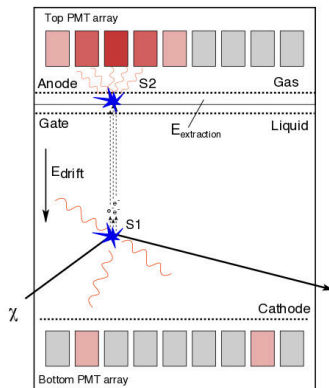
Standard WIMP: gases/líquidos nobles

Single phase



e/N recoil discrimination
in LAr but not in LXe

Dual phase



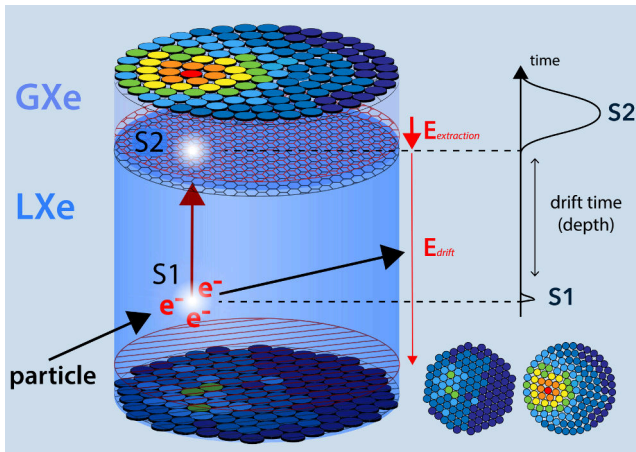
e/N recoil discrimination
in LAr and in LXe

Marrodán Undagoitia, Teresa et al. J.Phys. G43 (2016)

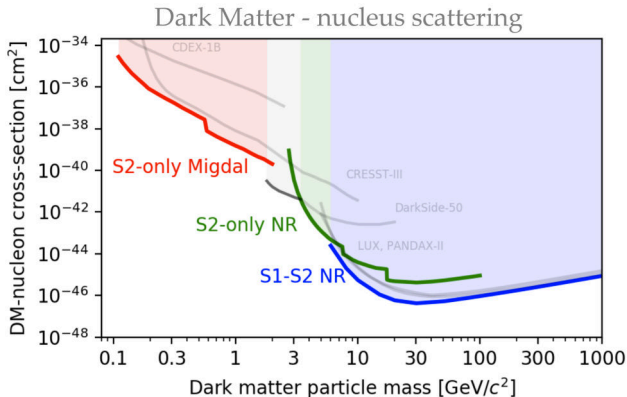
Standard WIMP: gases/líquidos nobles

Experiment	Technique	Fiducial target
DarkSide-20k	Single phase	20T - LAr
DEAP-50T	Single phase	50T - LAr
XMASS-1.5	Single phase	1.5T - LXe
XENON-nT	Dual phase	4.5T - LXe
LZ	Dual phase	5.7T - LXe
DARWIN	Dual phase LXe	30T - LXe

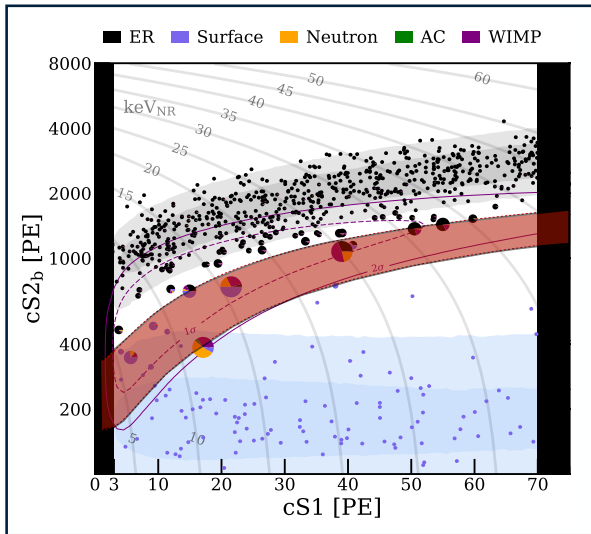
Hay un programa experimental bien definido para los próximos 15-20 años



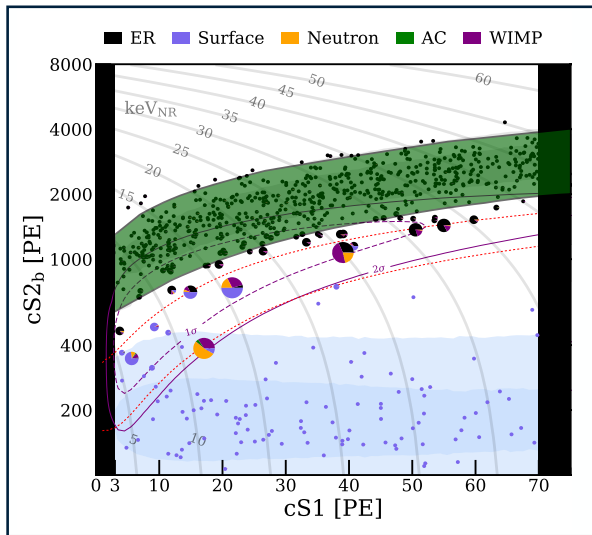
- Tomó datos en LNGS durante 2016-2018
- Análisis buscando WIMPs mediante NR
- Búsqueda de otros candidatos mediante ER



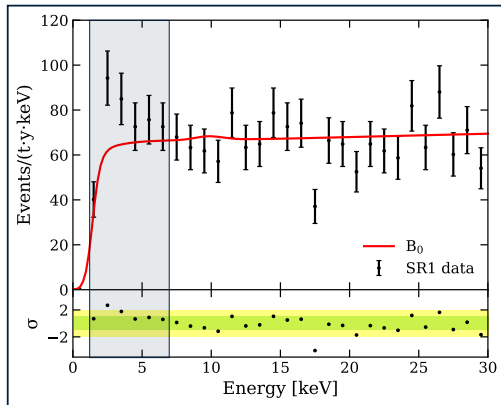
- Búsqueda de WIMPs mediante NR: no hay señales positivas
 - ▶ PRL 121, 111302 + PRL 123, 251801
- Empezaron a explorar opciones para bajar el umbral
 - ▶ Migdal, S2-only



Búsqueda de WIMPs mediante NR: "background-free"



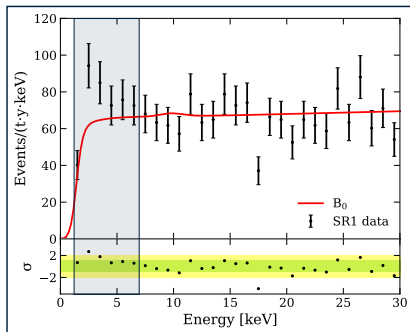
Búsqueda de DM mediante ER: buscar señal sobre el bkg



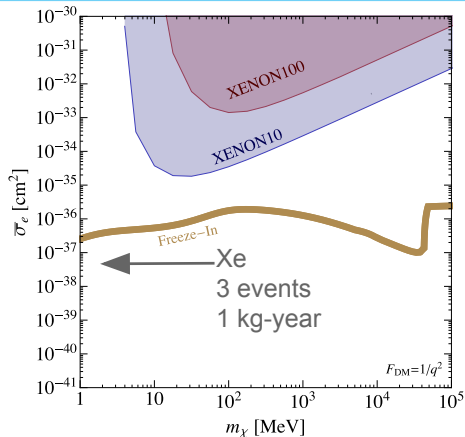
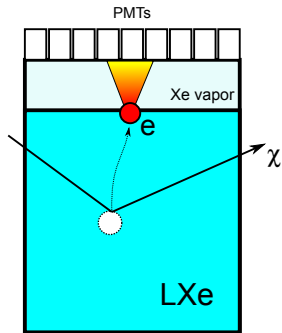
Hay un exceso entre 1-7 keV. Ven 285 eventos y esperan 232.
~ 3.5 σ si la incerteza es simplemente estadística

Posibles explicaciones

- Fluctuación estadística
- Background desconocido o mal modelado: tritio, ^{37}Ar , ..
- Nueva física: axiones, momento magnético del neutrino, ..
 - ▶ más de 90 papers publicados y siguen llegando..



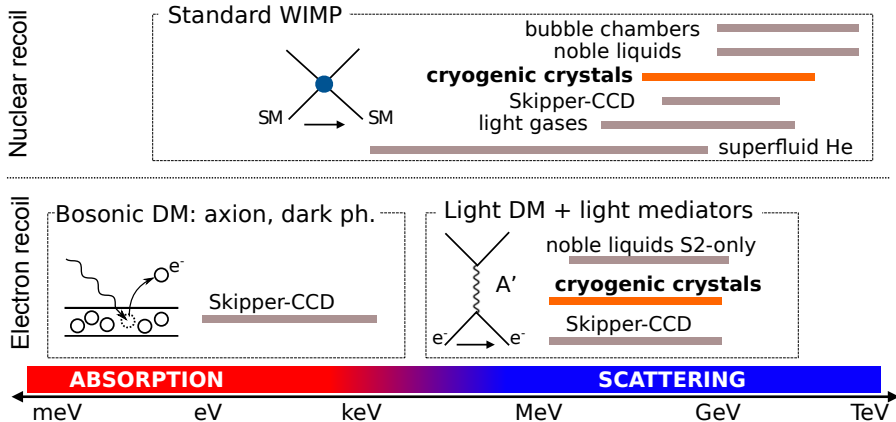
Experimento de LXe dedicado al canal electrónico



10 Kg de LXe tienen capacidad de descubrimiento si las cuentas son bajas

Escala de tiempo: 2021

Estrategias experimentales en la búsqueda de DM



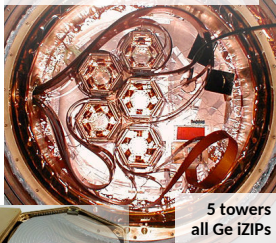
Standard WIMP: SuperCDMS



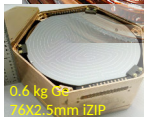
SuperCDMS SOUDAN

*Leading limits published
on low mass WIMPs*

15 Ge iZIPs, 0.6 kg each
OperaConal Mar. 2012 – Nov. 2015
In CDMS II locaCon



5 towers
all Ge iZIPs



0.6 kg Ge
76X25mm iZIP

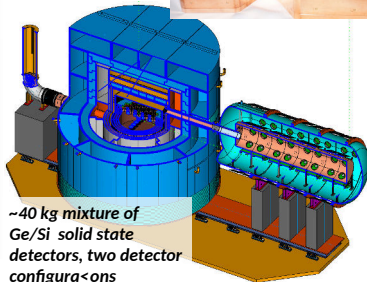
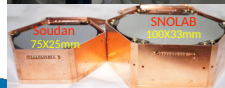
*Opera. on ended
late 2015*

SNOLAB

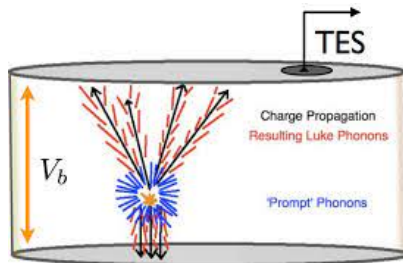
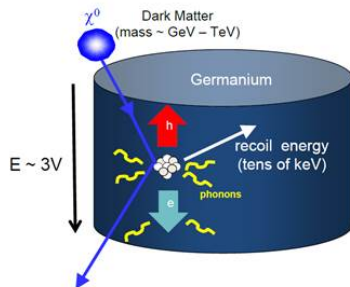
*Genera. on-2
experiment,
beginning ~2021
Aiming for unique
sensi. vity to low
mass WIMPs*



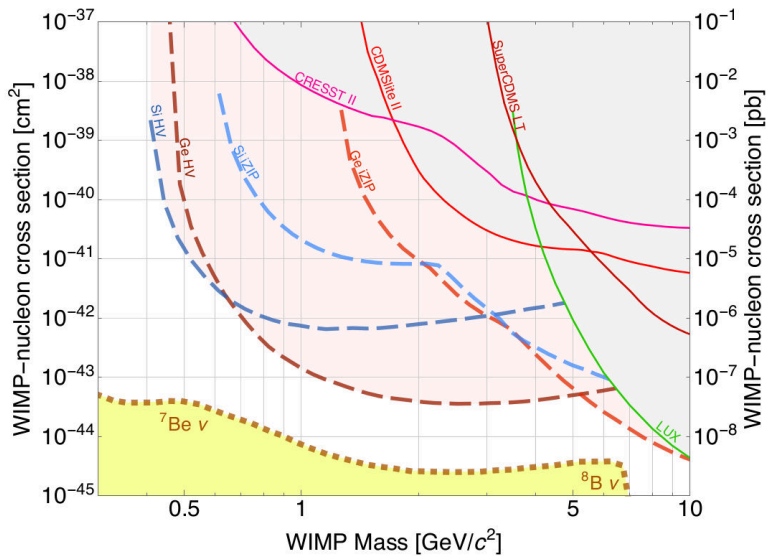
SNOLAB Ladder Lab
"future home"



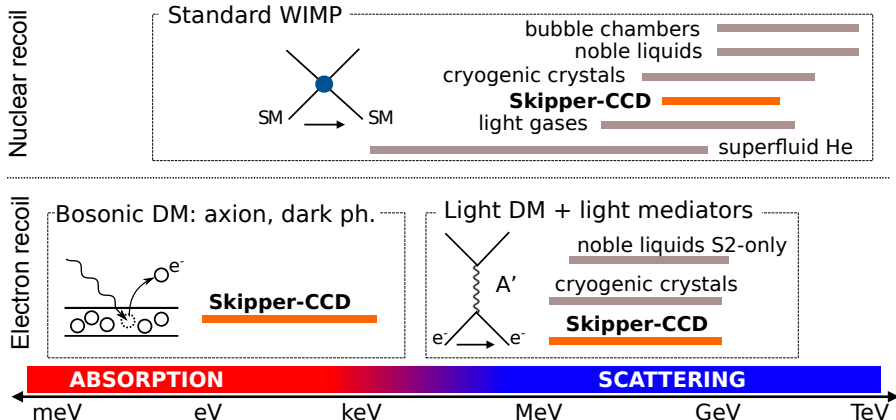
*~40 kg mixture of
Ge/Si solid state
detectors, two detector
configura<ons*



Standard WIMP: SuperCDMS



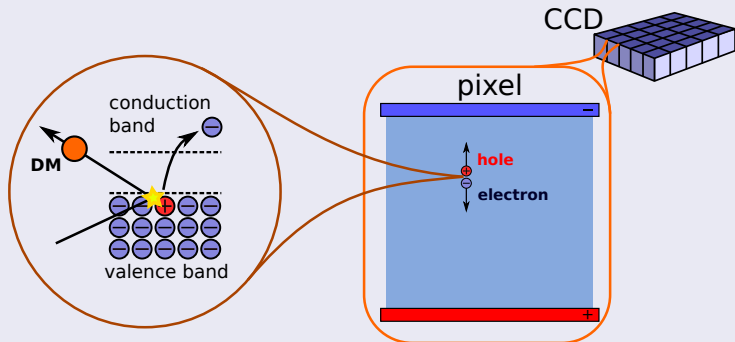
Estrategias experimentales en la búsqueda de DM



SENSEI: lower the energy threshold to look for light DM candidates

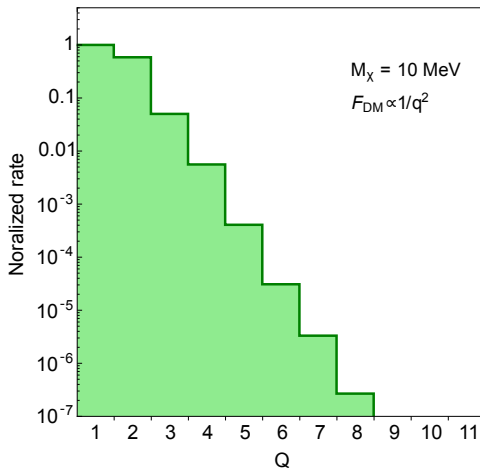
Detect DM-e interactions by measuring the ionization produced by the electron recoils. See arXiv:1509.01598

Idea: use electrons in the CCDs as target



Esto requiere muy bajo umbral de detección!

El umbral de energía es crítico para la la sensibilidad





Stony Brook University



UNIVERSITY OF
OREGON



universidad de buenos aires - ezeas
departamento de física

- **DF, FCEyN, UBA:** A. Botti, M. Cababié, D. Rodrigues
- **Fermilab:** F. Chierchie, M. Cababie, G. Cancelo, M. Crisler, A. Drlica-Wagner, J. Estrada, G. Fernandez-Moroni, D. Rodrigues, M. Sofo-Haro, L. Stefanazzi, J. Tiffenberg
- **Oregon University:** Tien-Tien Yu
- **Stony Brook:** L. Chaplinsky, Dawa, R. Essig, D. Gift, S. Munagavalasa, A. Singal
- **Tel Aviv University:** L. Barak, I. Bloch, E. Etzion, A. Orly, S. Uemura, T. Volansky

Completamente financiado por Heising-Simons Foundation &

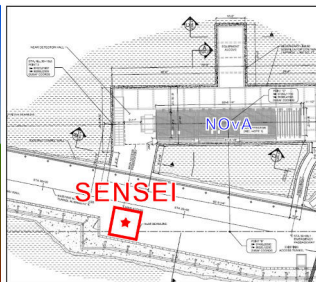
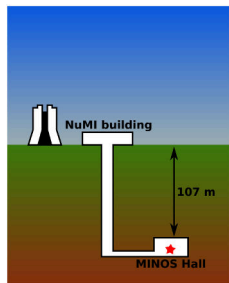


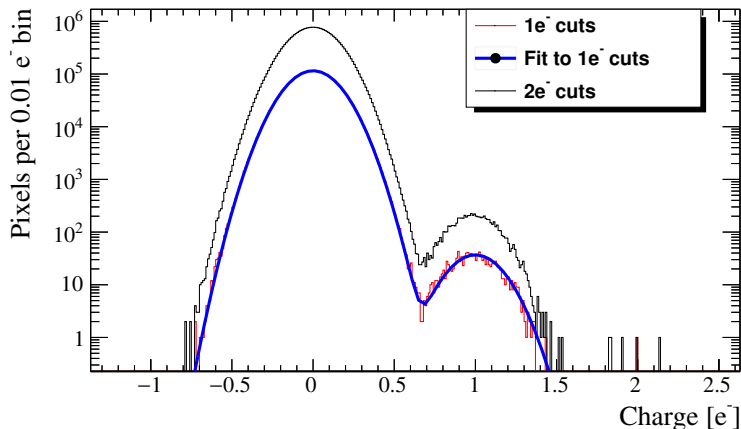
- Primer prototipo de Skipper-CCD (0.0947 g)
 - ▶ **2017**: Primer Skipper-CCD funcional. **PRL 1706.00028**
 - ▶ **2018**: Primera búsqueda de DM en superficie. **PRL 1804.00088**
 - ▶ **2019**: Primera búsqueda 100m bajo tierra. **PRL 1901.10478**
- Nuevo SENSEI Skipper-CCD (1.925 g):
 - ▶ **2020**: protoSENSEI: 1 sensor 100m bajo tierra. **PRL 2004.11378**



protoSENSEI: experimento de demostración en MINOS

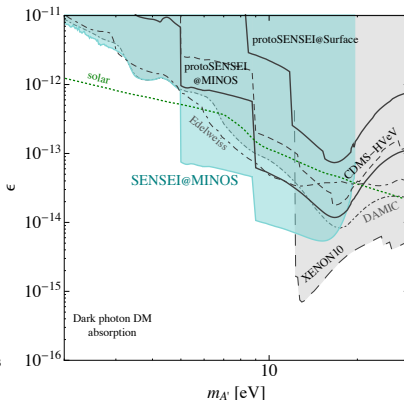
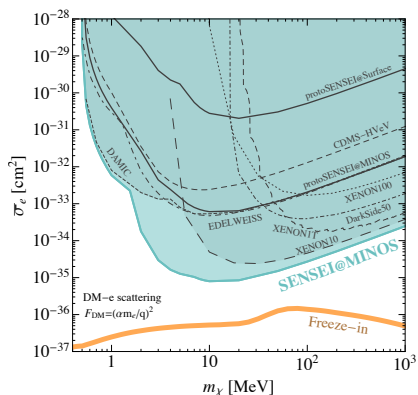
- Laboratorio subterráneo poco profundo; blindaje de plomo para reducir gammas del ambiente
- Cryorefrigerador y aislación en vacío para minimizar las cuentas oscuras



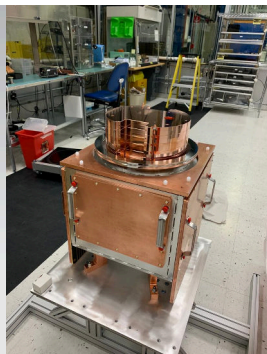
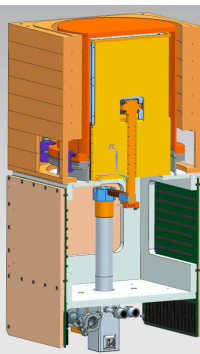


Observamos $O(1000)$ eventos de $1e^-$, cinco de $2e^-$ y CERO de $3e^-$ o más

- Mejor límite para candidatos livianos
 - Izquierda: mediador liviano $F_{DM} = (\alpha m_e/q)^2$; Derecha: absorción
- Paper arXiv:2004.11378

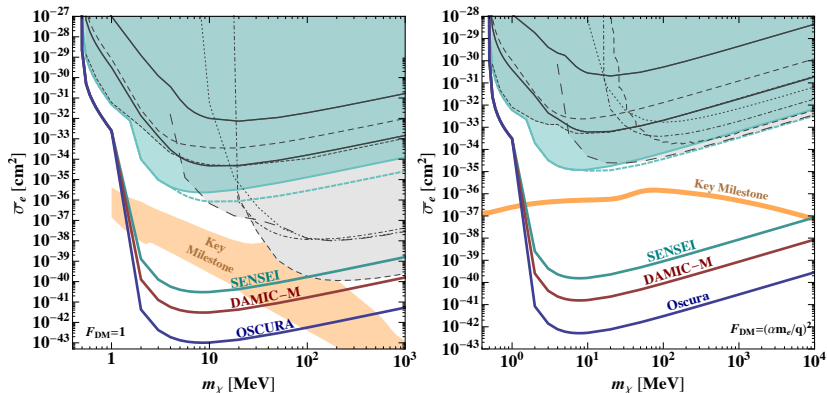


- Estamos construyendo el detector de tamaño completo en SNOLAB
- Un sistema de prueba actualmente en operación en SNOLAB
- El detector completa está fabricado y siendo testeado en Fermilab



El futuro de los Skippers en la búsqueda de materia oscura

- SENSEI@MINOS demostró que los Skipper-CCDs pueden alcanzar la rendimiento necesario para realizar búsquedas de eventos raros
 - ▶ SENSEI@SNOLAB: 100 grams
 - ▶ DAMIC-M: 1 kg
 - ▶ Oscura: 10 kg



Resumen

- Es un área muy activa
- Importante participación de grupos locales: Bahía Blanca, Bariloche y Buenos Aires
- Necesitamos DD y búsquedas en aceleradores
- Históricamente el esfuerzo se centró en la búsqueda de WIMPs
- Hay técnicas nuevas que permiten explorar candidatos más allá del paradigma del WIMP
- Explotar las posibles interacciones de la materia oscura con electrones permite explorar áreas nuevas del espacio de parámetros

BACK UP SLIDES

SIMP: Strongly-Interacting Massive-Particles

1. SIMPs are produced in thermal bath after the big bang.
2. Pairs of SIMPs annihilate into (and scatter with) ordinary matter. They are in thermal equilibrium with SM particles.
3. The universe expands and the rate for annihilation into SM particles falls.
4. SIMPs interact strongly amongst themselves and the 3-to-2 number-changing process transfers kinetic energy from the 3 SIMPs in the initial state to the 2 SIMPs in the final state. The SIMPs are in thermal equilibrium with SM particles and the extra heat is shared.
5. As the SIMP density decreases, the 3-to-2 process interaction rate becomes negligible, but thermal equilibrium with SM particles remains via elastic scattering.
6. Elastic scattering rate becomes negligible, the SIMPs decouple, and their abundance is set.

ELDER: ELastically DEcoupling Relic

1. ELDERs are produced in thermal bath after the big bang.
2. Pairs of ELDERs annihilate into (and scatter with) ordinary matter. They are in thermal equilibrium with SM particles.
3. As the Universe expands, the rate for annihilation into Standard Model particles falls below the rate at which the Universe expands. Thermal equilibrium with SM particles remain via DM-SM elastic scattering.
4. Elastic scattering rate diminishes and the ELDER's temperature gradually decouples from SM particles. As the ELDERs interact strongly amongst themselves, the 3-to-2 number-changing process still occurs. This process transfers the energy of 3 ELDERs in the initial state to 2 ELDERs in the final state that have more kinetic energy (are hotter). This counteracts the effect of the expansion of the universe until the density is again too low and the "cannibalization" stops.
5. The universe keeps expanding, making it harder for the DM to find each other and their abundance is set.

Back of the envelope calculation

A 100g detector that takes data for one year $\rightarrow$ **Expo = 36.5kg · day**

Assuming same background as in DAMIC:

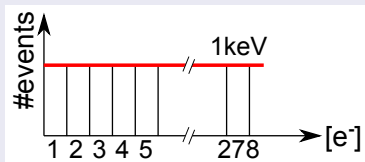
- **5 DRU** ($\text{events} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1}$) in the 0-1keV range
 $\rightarrow N_{\text{bkg}} = 36.5 \text{ kg} \cdot \text{day} \times 5 \text{ DRU} = 182.5 \text{ events}$
- Dominated by external gammas $\rightarrow$ **flat Compton spectrum**

Back of the envelope calculation

A 100g detector that takes data for one year $\rightarrow$ **Expo = 36.5kg $\cdot$ day**

Assuming same background as in DAMIC:

- **5 DRU** ($\text{events} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1}$) in the 0-1keV range
 $\rightarrow N_{\text{bkg}} = 36.5 \text{ kg} \cdot \text{day} \times 5 \text{ DRU} = 182.5 \text{ events}$
- Dominated by external gammas $\rightarrow$ **flat Compton spectrum**



182.5 events over the 278 charge bins in the 0-1keV range

Expect 0.65 bkd events in the lowest (2 e⁻) charge-bin