

Introducción al Neutrino



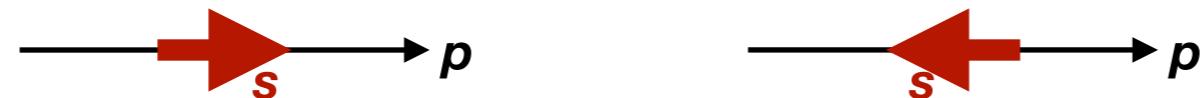
EXCELENCIA
SEVERO
OCHOA

IFIC
INSTITUT DE FÍSICA
CORPUSCULAR

Clase IV: La naturaleza del neutrino

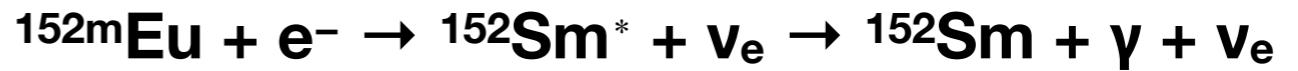
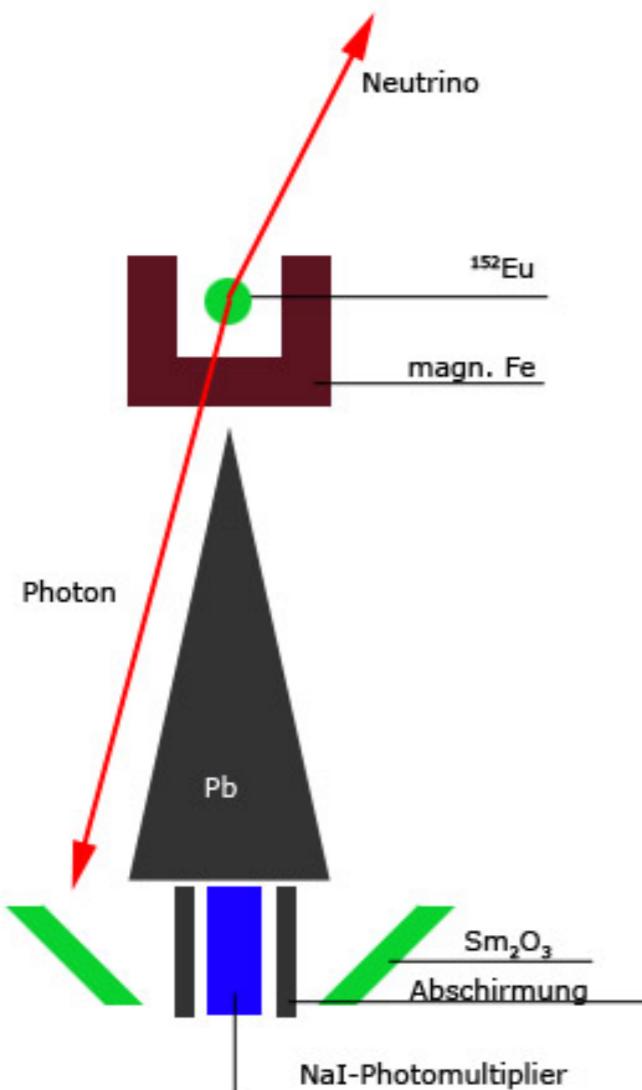
helicidad

**La helicidad de un fermión es la proyección de su spin a su momento.
Partículas masivas pueden tener los dos posibles estados:**



**El experimento Wu nos demostró que la fuerza débil viola
paridad, ¿Podría tener algo que ver el neutrino?**

Experimento Goldhaber



Para conservar el momento y momento angular el fotón tiene que tener la misma helicidad que el neutrino.

Goldhaber puso la fuente dentro de un imán y media el número de fotones que detectó según la dirección del campo magnético.

El cambio en número de interacciones cambiando el campo da una medida directa de la helicidad.

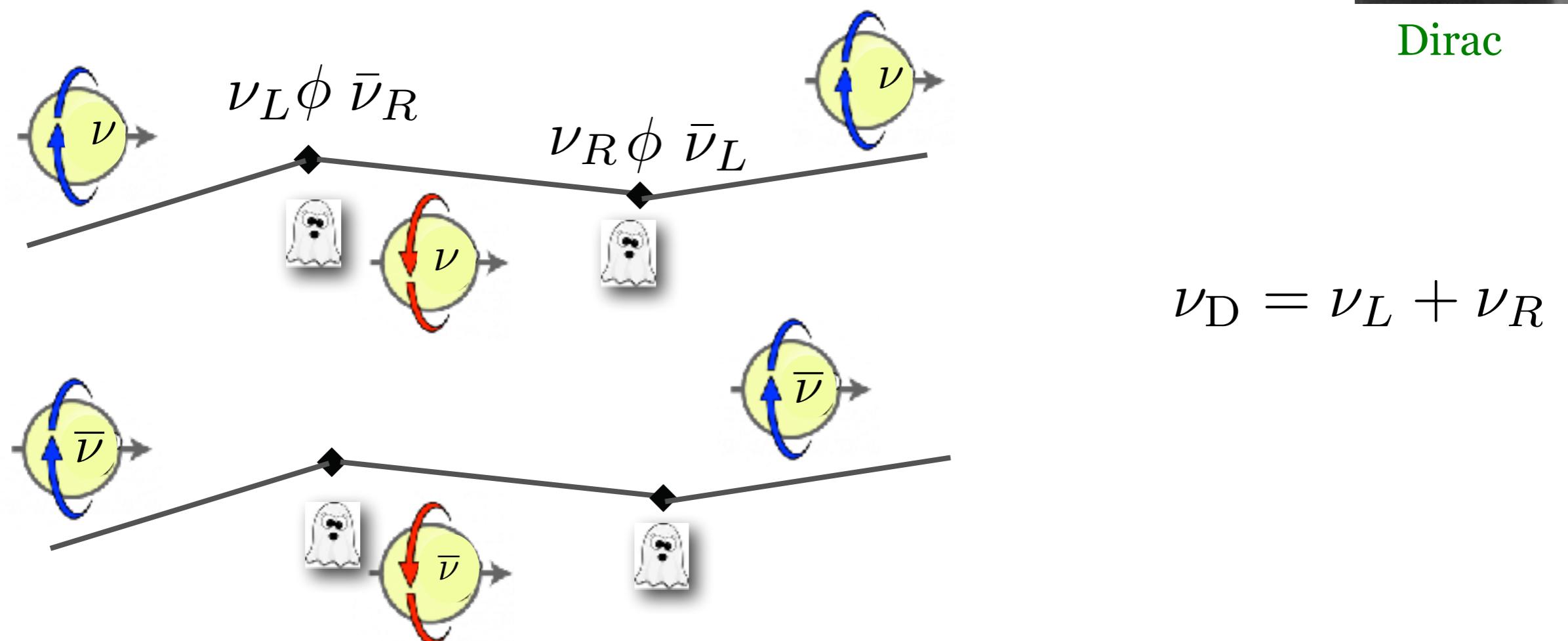
Fermiones Dirac

La ecuación de Dirac describe la dinámica de los fermiones como los electrones

$$-\mathcal{L}_m^{\text{Dirac}} = m\bar{\psi}\psi = m(\overline{\psi_L + \psi_R})(\psi_L + \psi_R) = m(\overline{\psi_L}\psi_R + \overline{\psi_R}\psi_L)$$



Este tipo de fermión tiene que existir en ambas helicidades



Fermiones Majorana

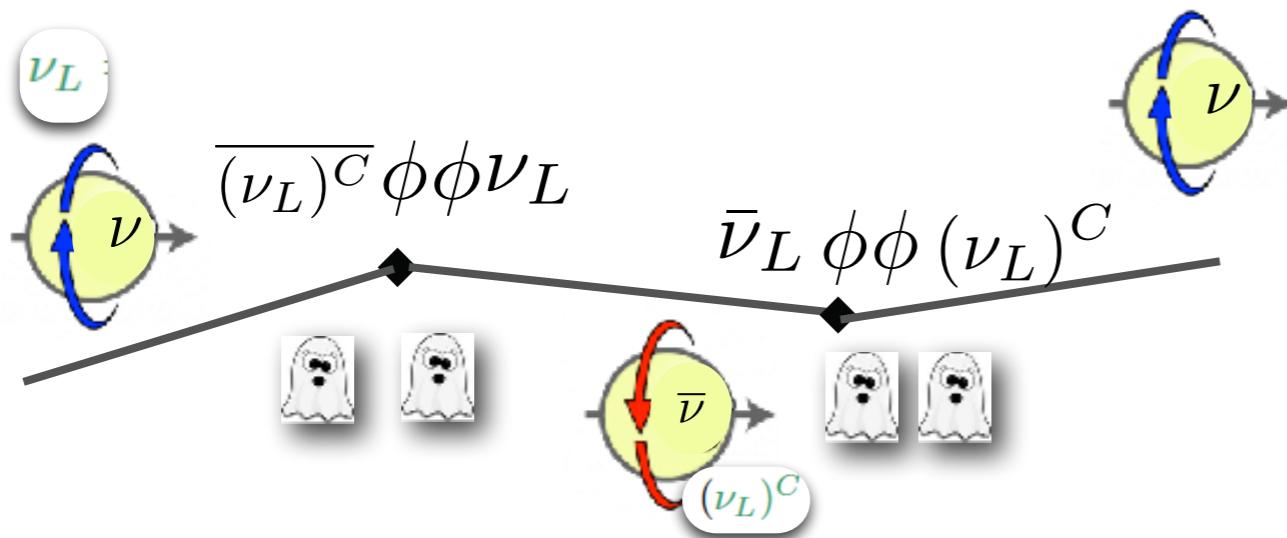
Majorana propuso que fermiones neutrales podrían ser su propia antipartícula

$$-\mathcal{L}_m^{Majorana} = \frac{m}{2} \overline{\psi^c} \psi + \frac{m}{2} \overline{\psi} \psi^c \equiv \frac{m}{2} \psi^T C \psi + \frac{m}{2} \overline{\psi} C \overline{\psi}^T,$$

$$\psi^c \equiv C \overline{\psi}^T = C \gamma_0 \psi^* \quad C = i \gamma_2 \gamma_0$$



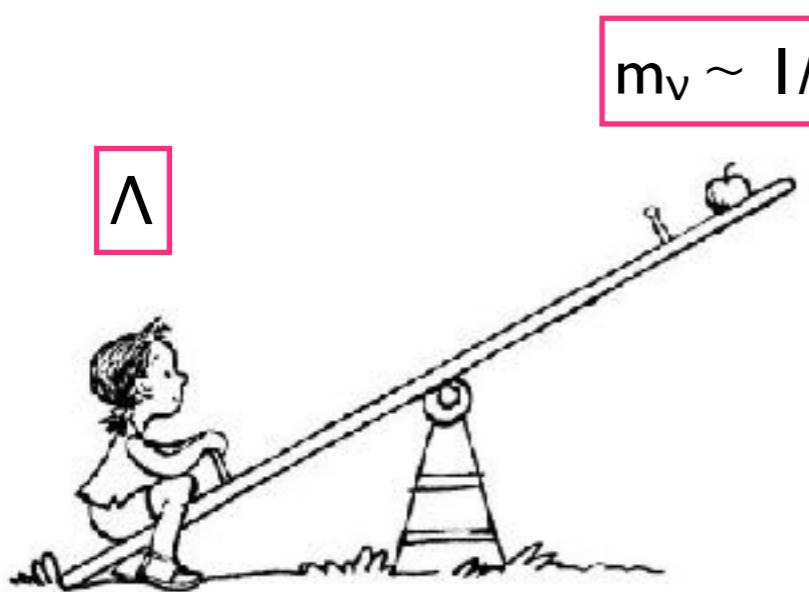
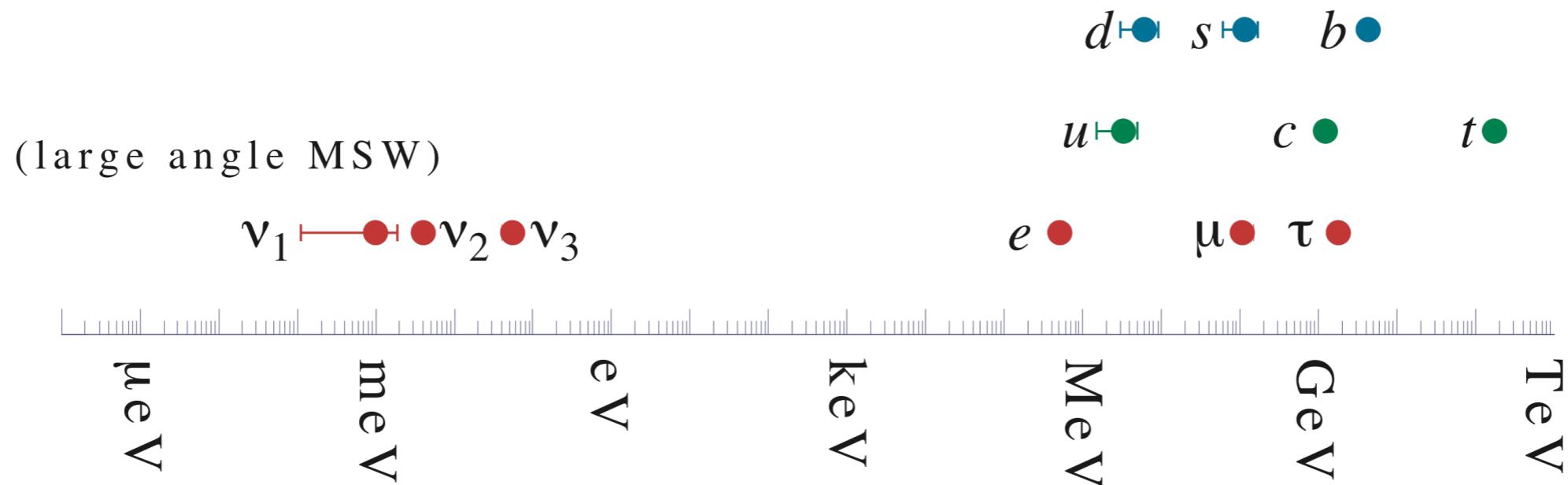
Majorana



$$\nu_L = (\nu_R)^C \quad (\nu_L)^C = \nu_R$$

$$-\mathcal{L}_{Majorana} = \bar{\nu}_L m_\nu \nu_L^c + h.c.$$

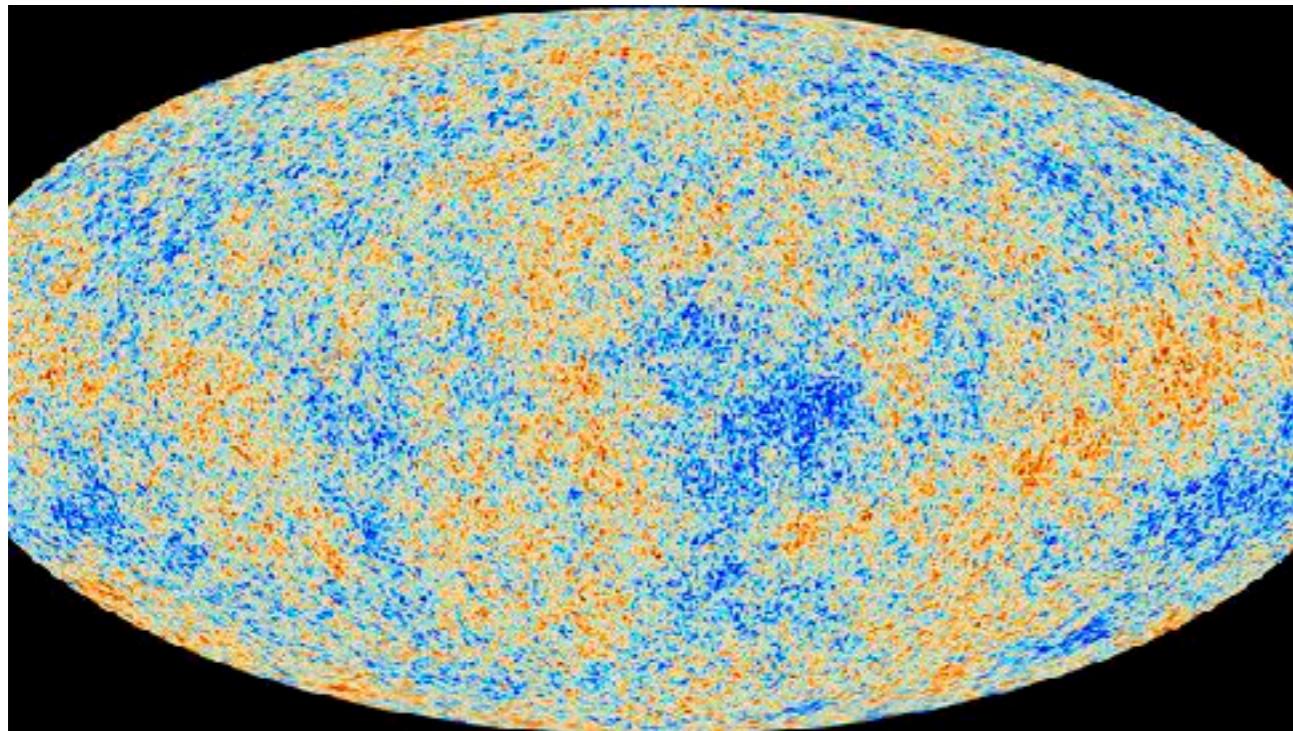
Las masas pequeñas de los neutrinos



Con neutrinos de Majorana es fácil explicar por que la masa de los neutrinos es tan pequeña comparada con la de los otros fermiones. Con un campo violador de número de lepton total 2 partículas tienen que existir una con masa Λ y otra con masa $\sim 1/\Lambda$

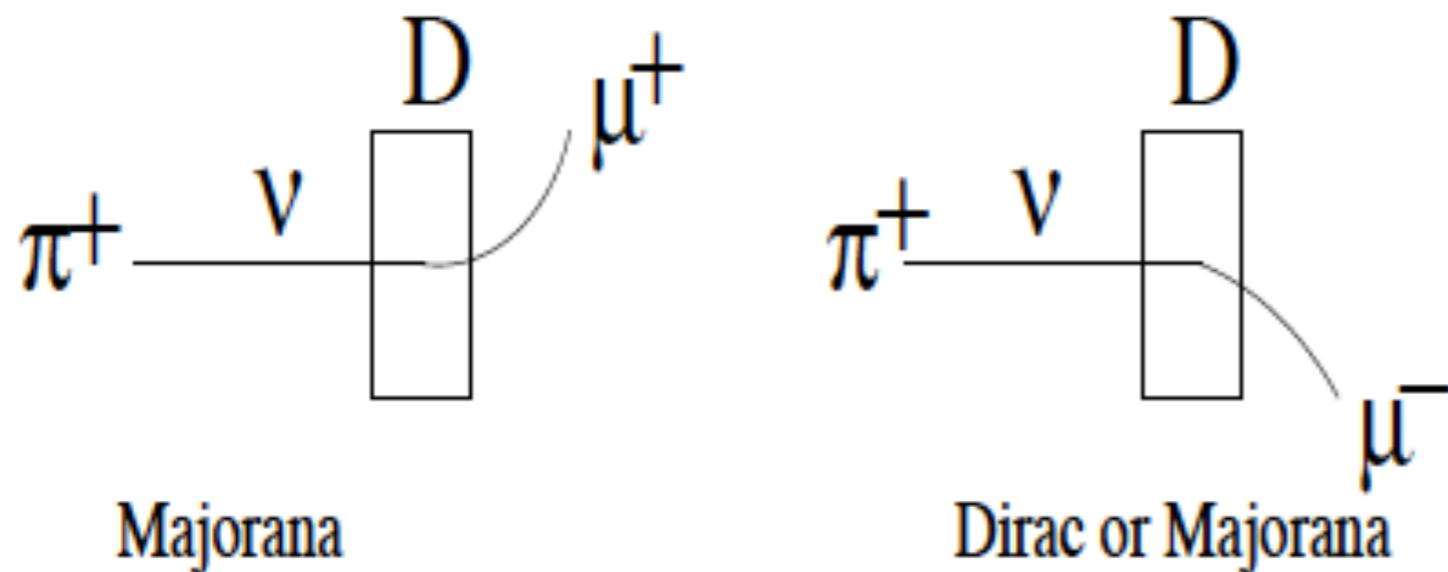
Leptogénesis

Leptogénesis es una teoría que describe la evolución del Universo. Con neutrinos Majorana y ruptura de CP en leptones pueden describir la falta de equilibrio entre materia y anti-materia.



**¿Cómo podemos
determinar la naturaleza
de los neutrinos?**

¿Podemos ver un efecto en las interacciones?



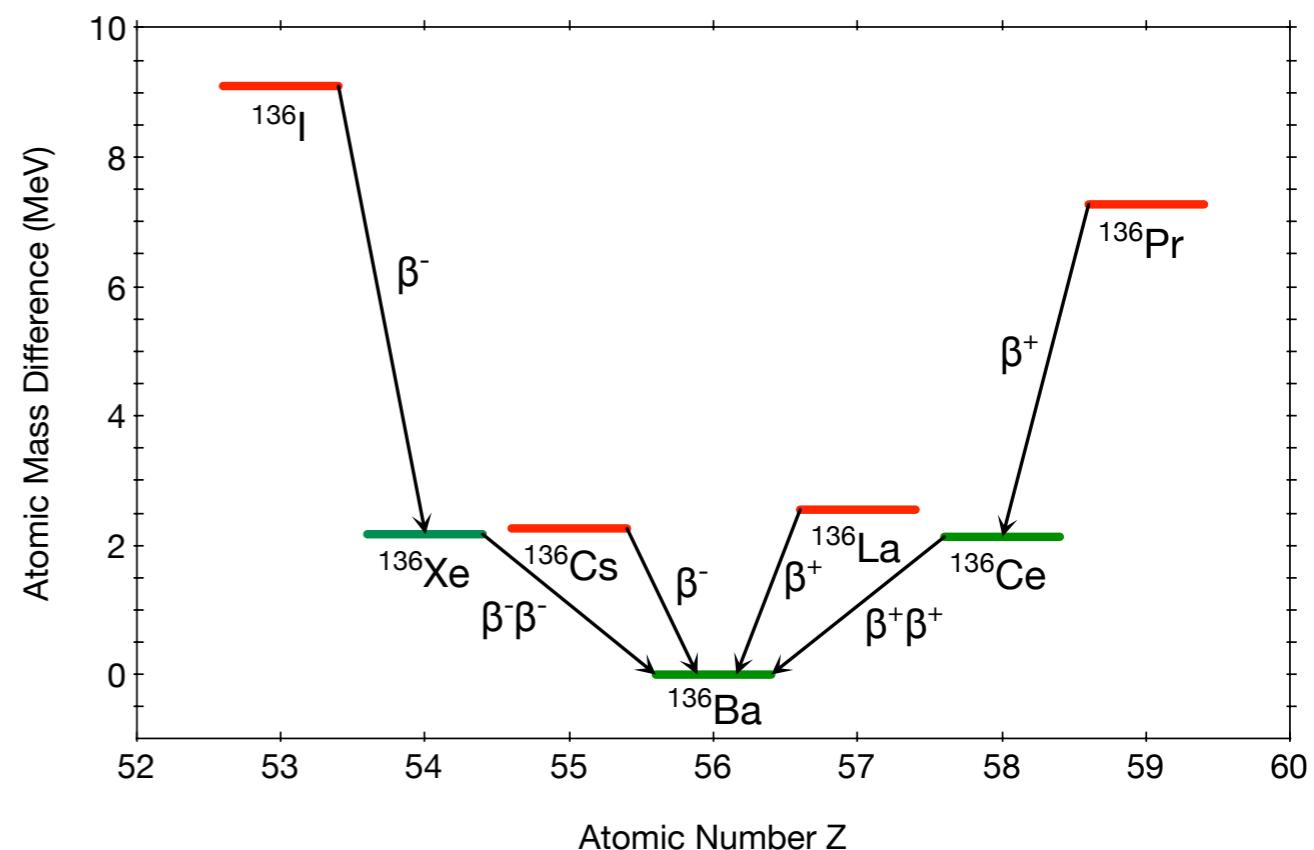
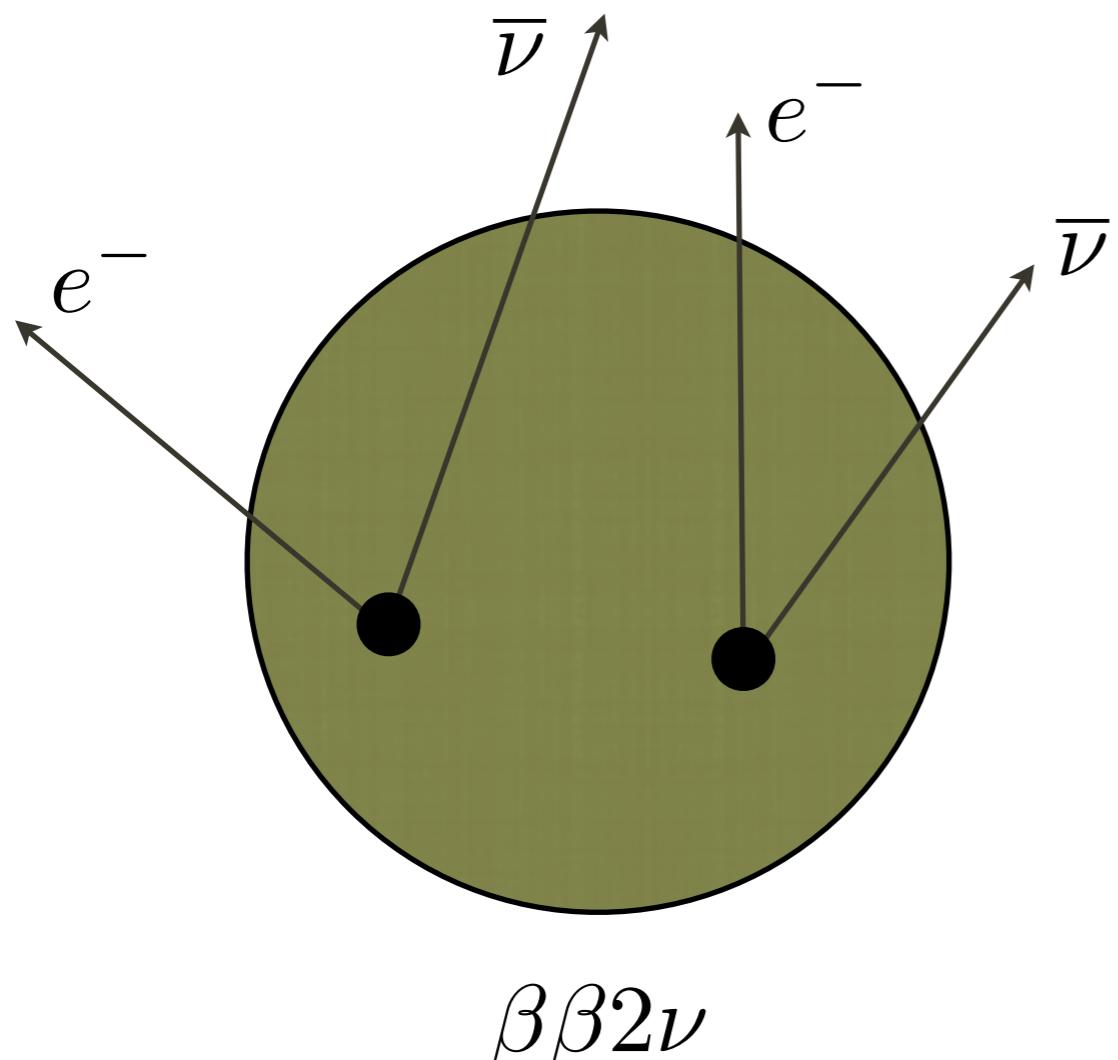
En principio un neutrino Majorana podría interactuar como anti neutrino produciendo un leptón positivo.

En la práctica, debido a la necesidad de cambiar de spin, se suprime la interacción:

$$\text{Rate}(+) = \text{Rate}(-) \left(\frac{m_\nu}{E} \right)^2$$

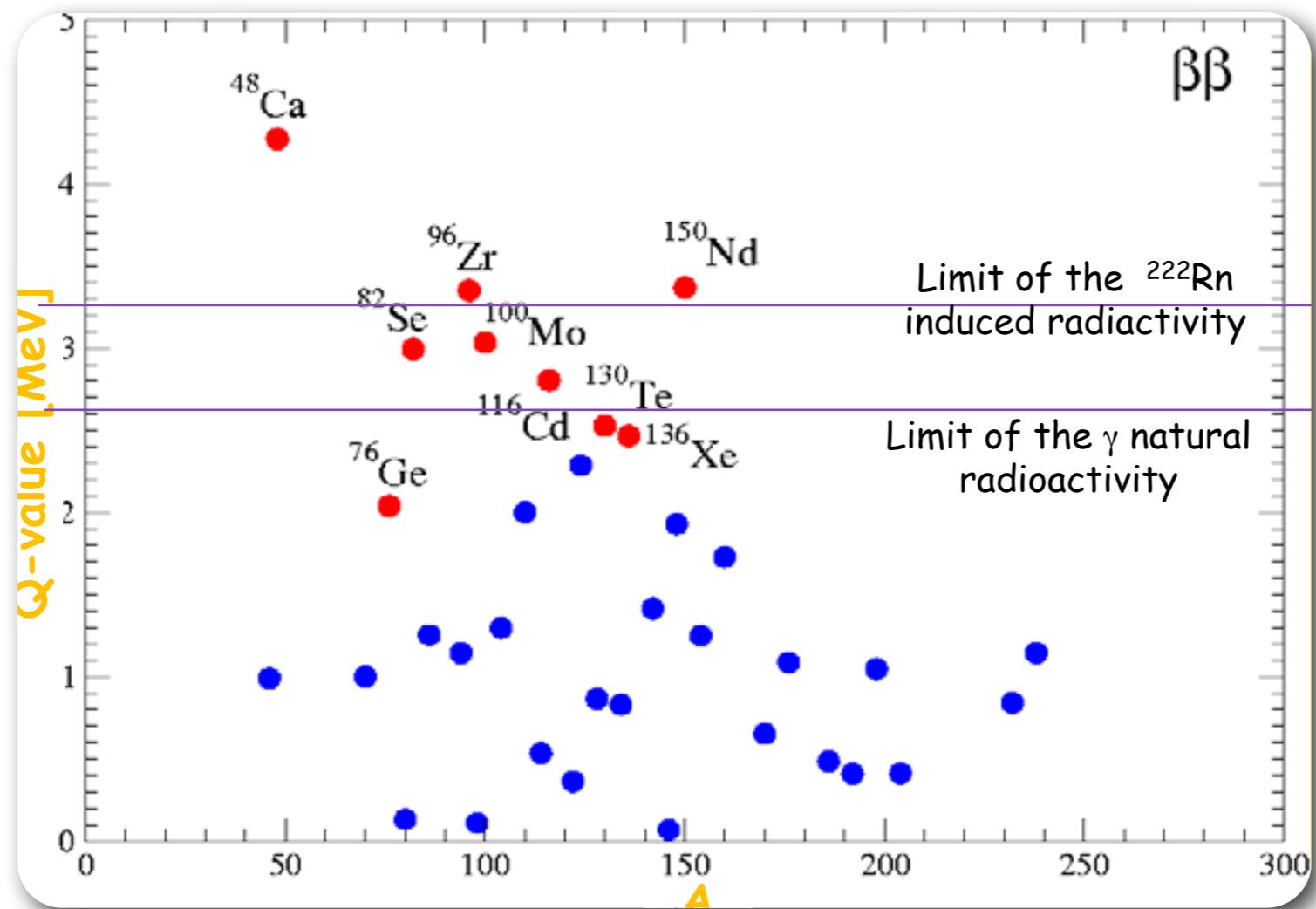
Para un neutrino de energía 1 GeV y masa 100 meV pasaría en 1 de cada 10^{20} interacciones

Nuestro amigo la desintegración beta, pero doble



Favorable energéticamente en algunos casos pero raro:
 $T_{1/2} \sim 10^{18} - 10^{20}$ años

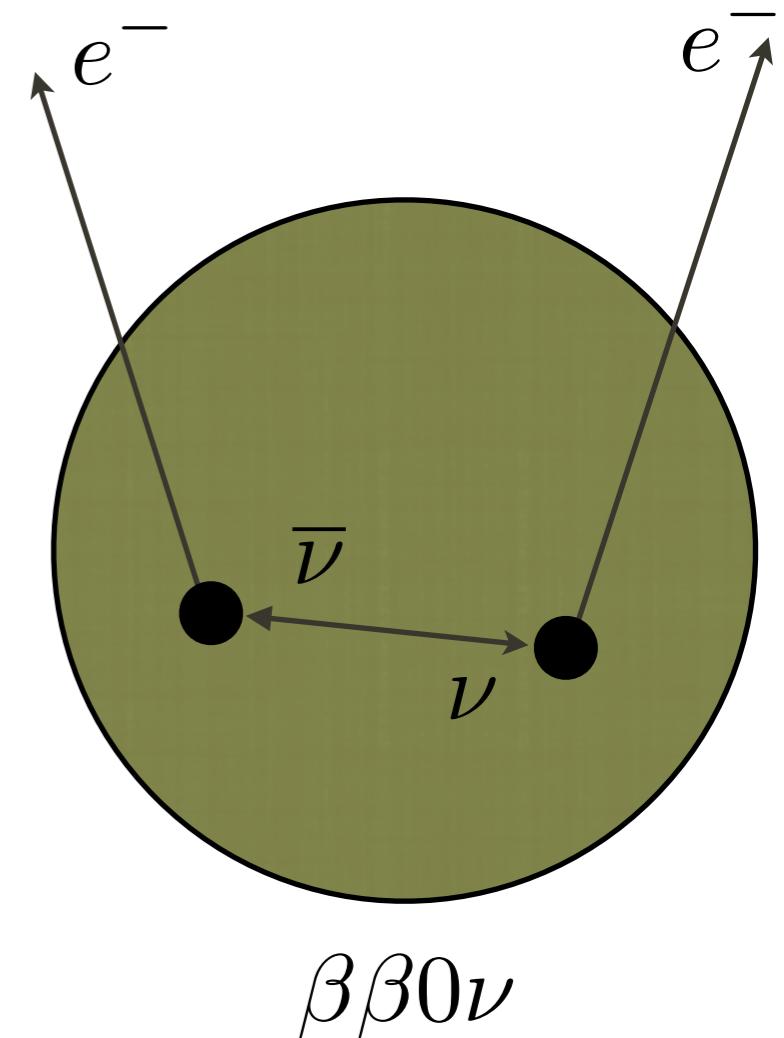
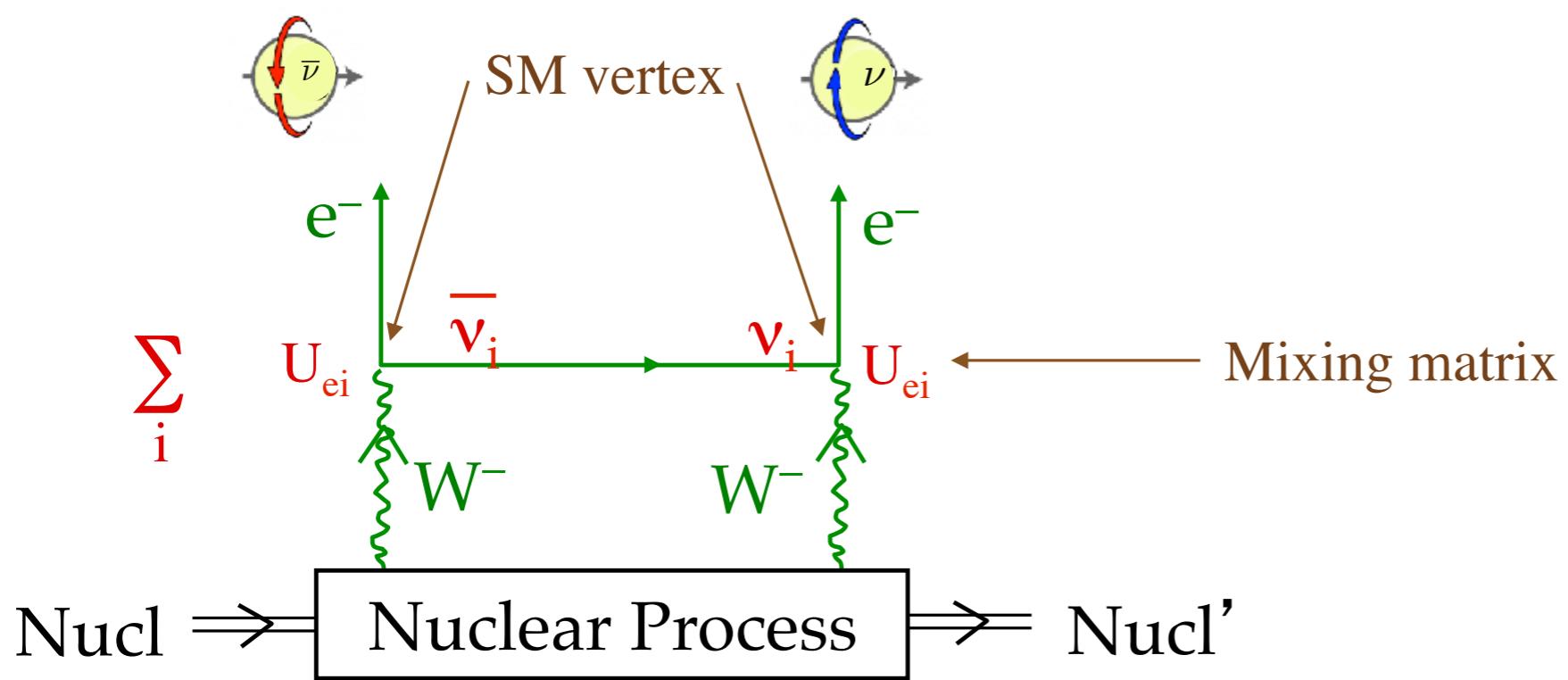
Isótopos



Desintegración observada en multiples isótopos

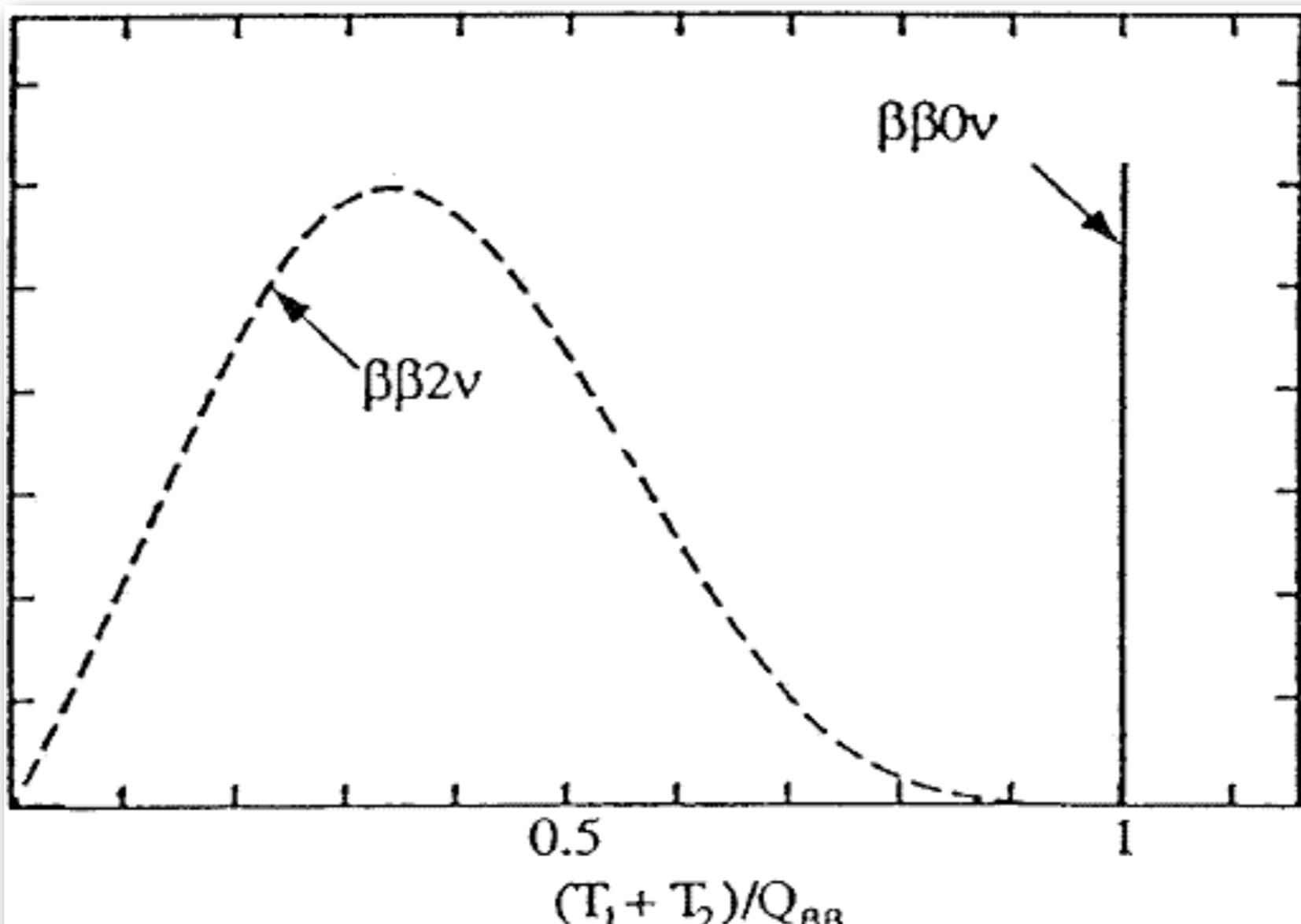
¿Y si tenemos fermiones Majorana?

Si los neutrinos son fermiones Majorana dentro del núcleo hay una posibilidad de intercambio de neutrinos que resultaría en una desintegración sin emitir neutrinos



¿Cómo podemos detectar esta desintegración?

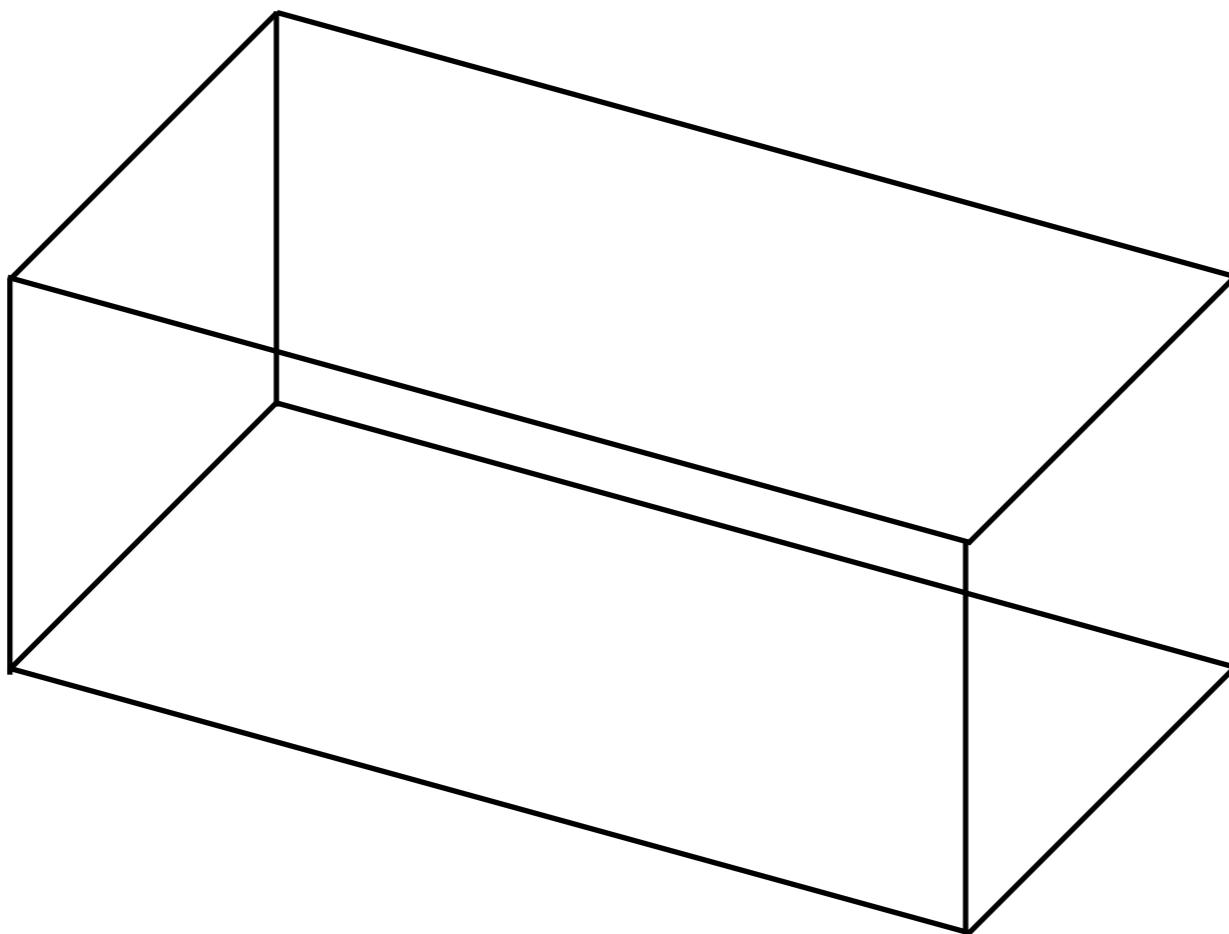
Otra vez la energía



$$T_{1/2} > 10^{25} \text{ y}$$

La desintegración doble beta es extremadamente rara y la forma sin neutrinos aún más

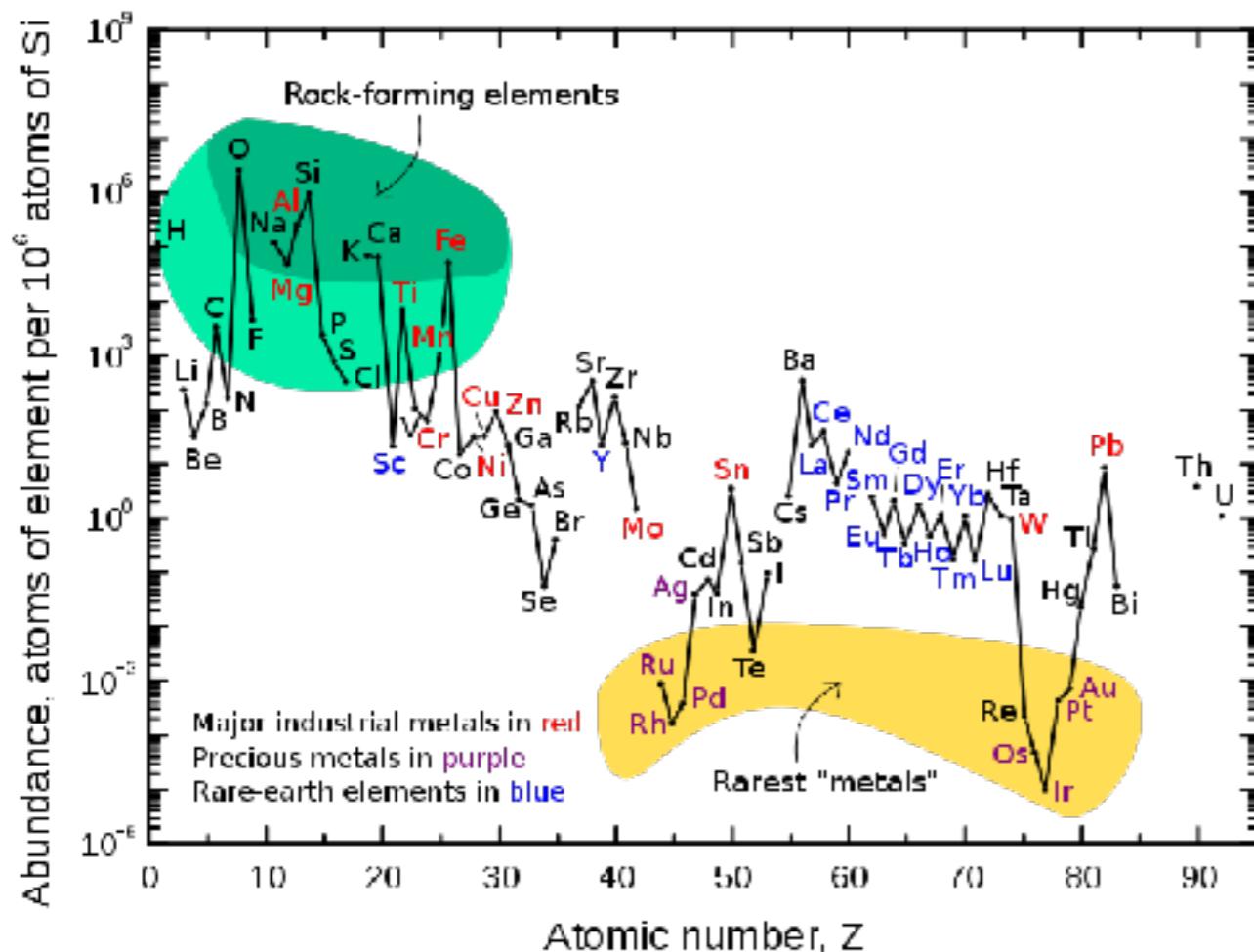
¿Qué necesitamos para nuestro detector?



Isótopo

Un detector automágico: solo necesitamos nucleos

¿Qué puede limitar sensibilidad?



Abundancia en la tierra de los elementos

Abundancia de los isótopos doble beta

^{76}Ge	7.8%
^{136}Xe	8.9%
^{130}Te	34.5%
^{82}Se	9.2%
^{96}Zr	2.8%
^{48}Ca	0.187%
^{116}Cd	7.5%
^{100}Mo	9.6%

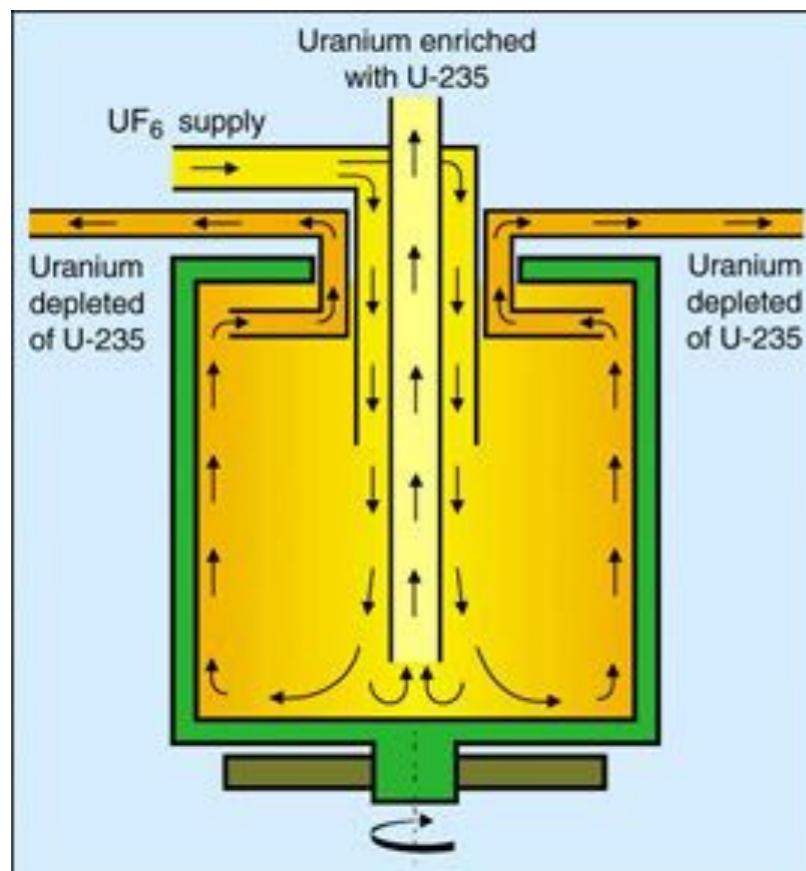
Detector perfecto, con más masa más sensibilidad

$$N_{\beta\beta} \propto \varepsilon \cdot \frac{M \cdot t}{T_{1/2}^{0\nu}}$$

Enriquecimiento

Hay formas para enriquecer en isótopos deseados.

El método más común para enriquecer isótopos usa centrifugadores y requiere un gas o una molécula gaseosa a temperatura ambiente.



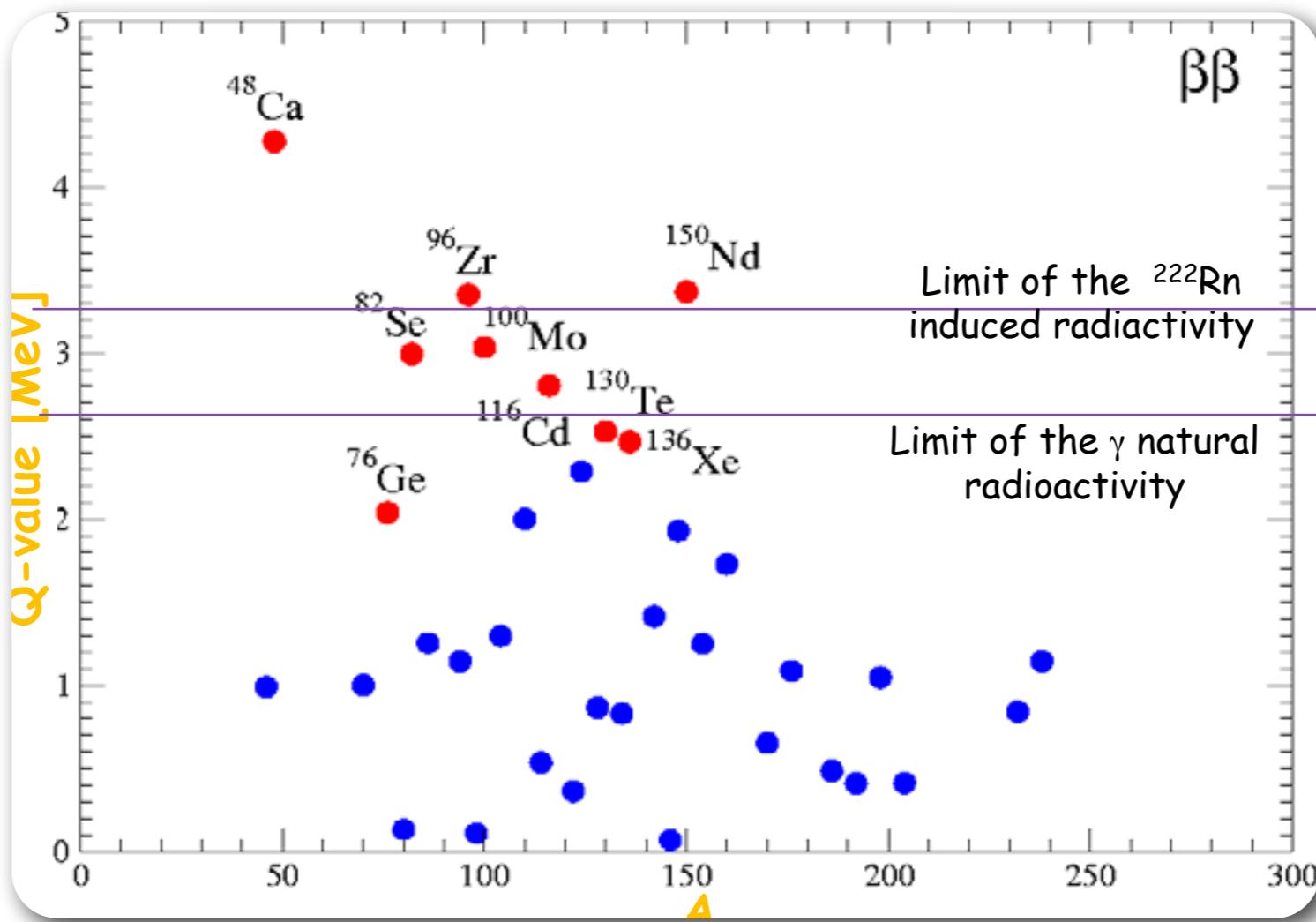
**Xe se puede enriquecer directamente
Ge, Se, Mo y Te son fáciles usando
compuestos con flúor**

**Otros isótopos no se pueden enriquecer de
esta forma.**

**Detector perfecto, con más masa más
sensibilidad**

$$N_{\beta\beta} \propto \varepsilon \cdot \frac{M \cdot t}{T_{1/2}^{0\nu}}$$

Energía de desintegración: $Q_{\beta\beta}$

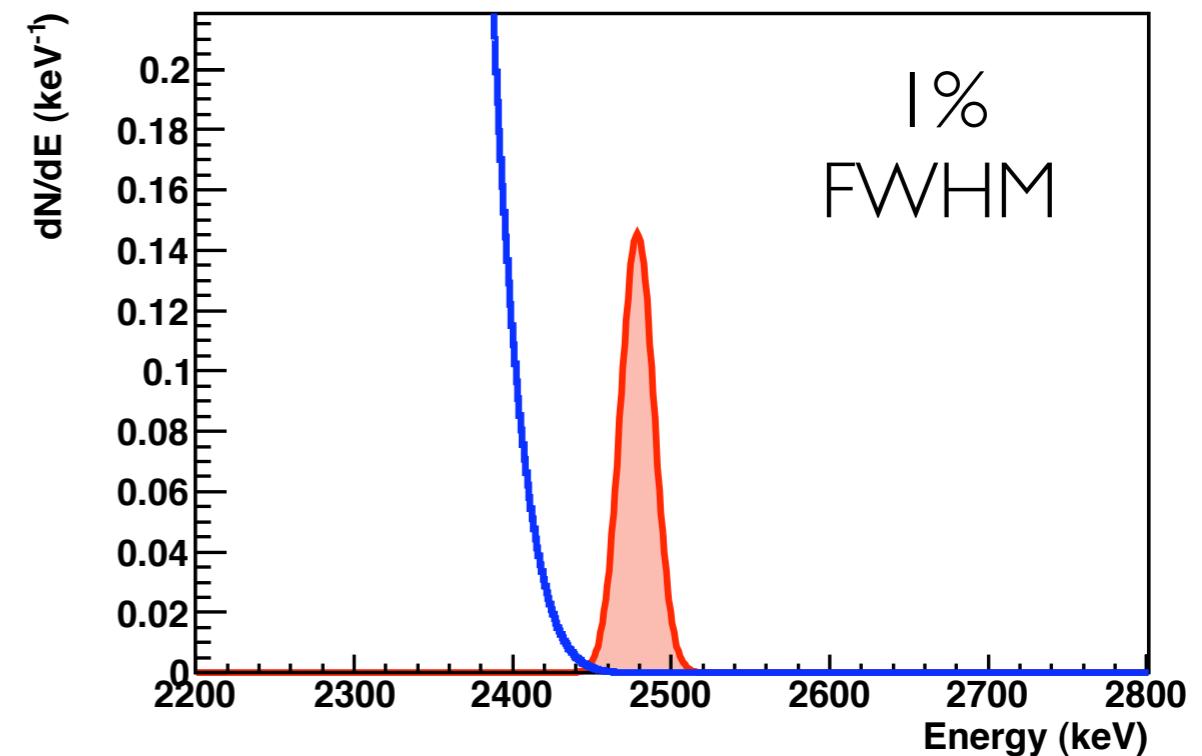
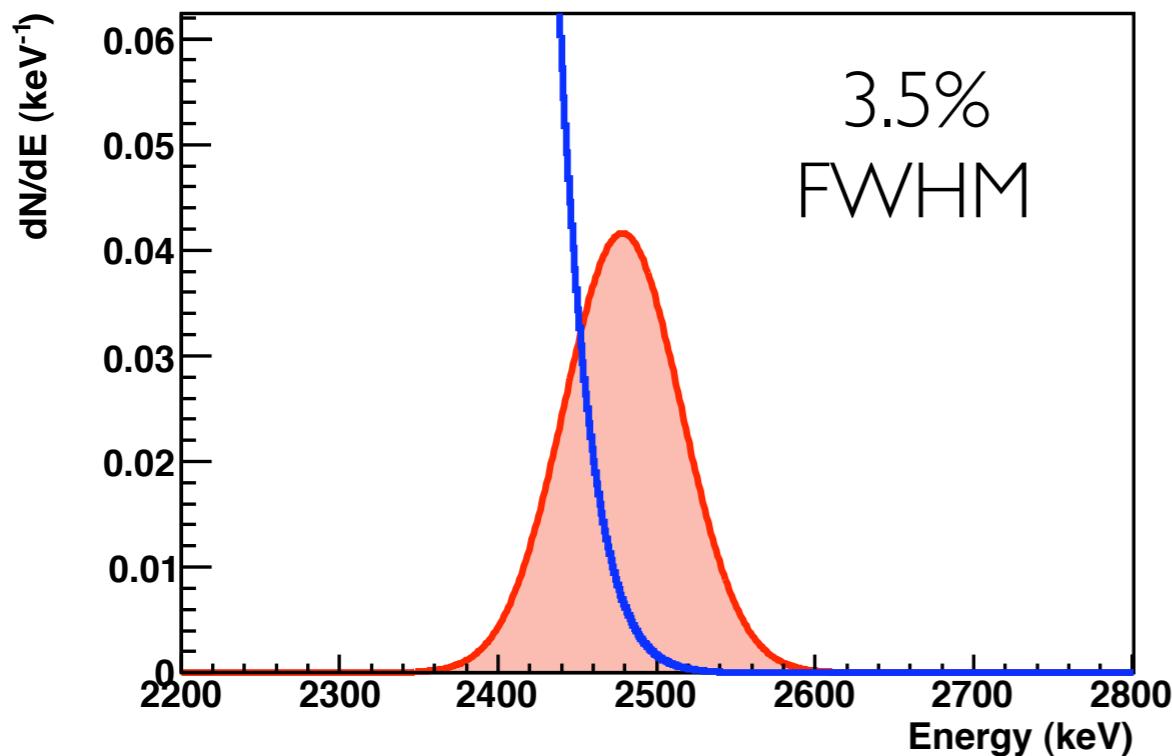


Con $Q_{\beta\beta}$ más alto la desintegración suele ser más rápido.

También con más energía depositada suele ser más fácil de detectar.

Ventajas también relacionadas con fondos externos

Fondo intrínseco: $2\nu\beta\beta$



Con nuestro detector perfecto y materia enriquecido solo tenemos un fondo importante, $2\nu\beta\beta$.

La única forma de separar los dos canales es con mejoras en la medición de la energía.

Sensibilidad

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto \sqrt{\frac{M t}{c \Delta E}}$$

detector efficiency

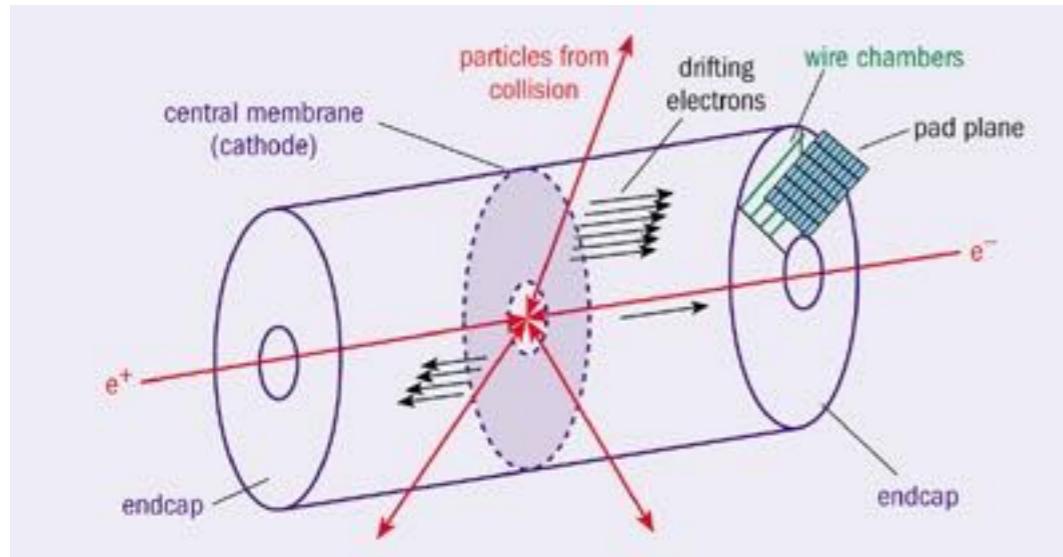
background rate

exposure (mass x time)

energy resolution

Con una resolución energética mejorada podemos distinguir más señal de fondo

Propiedades de detección



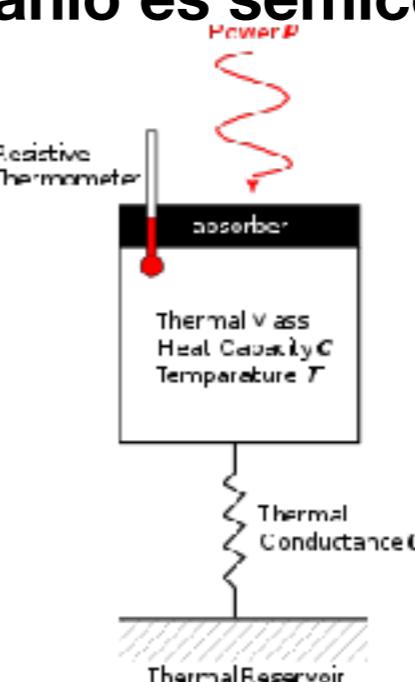
Con gases hay muchas opciones entre ellos la cámara de proyección temporal



¿Podemos dopar centelladores?

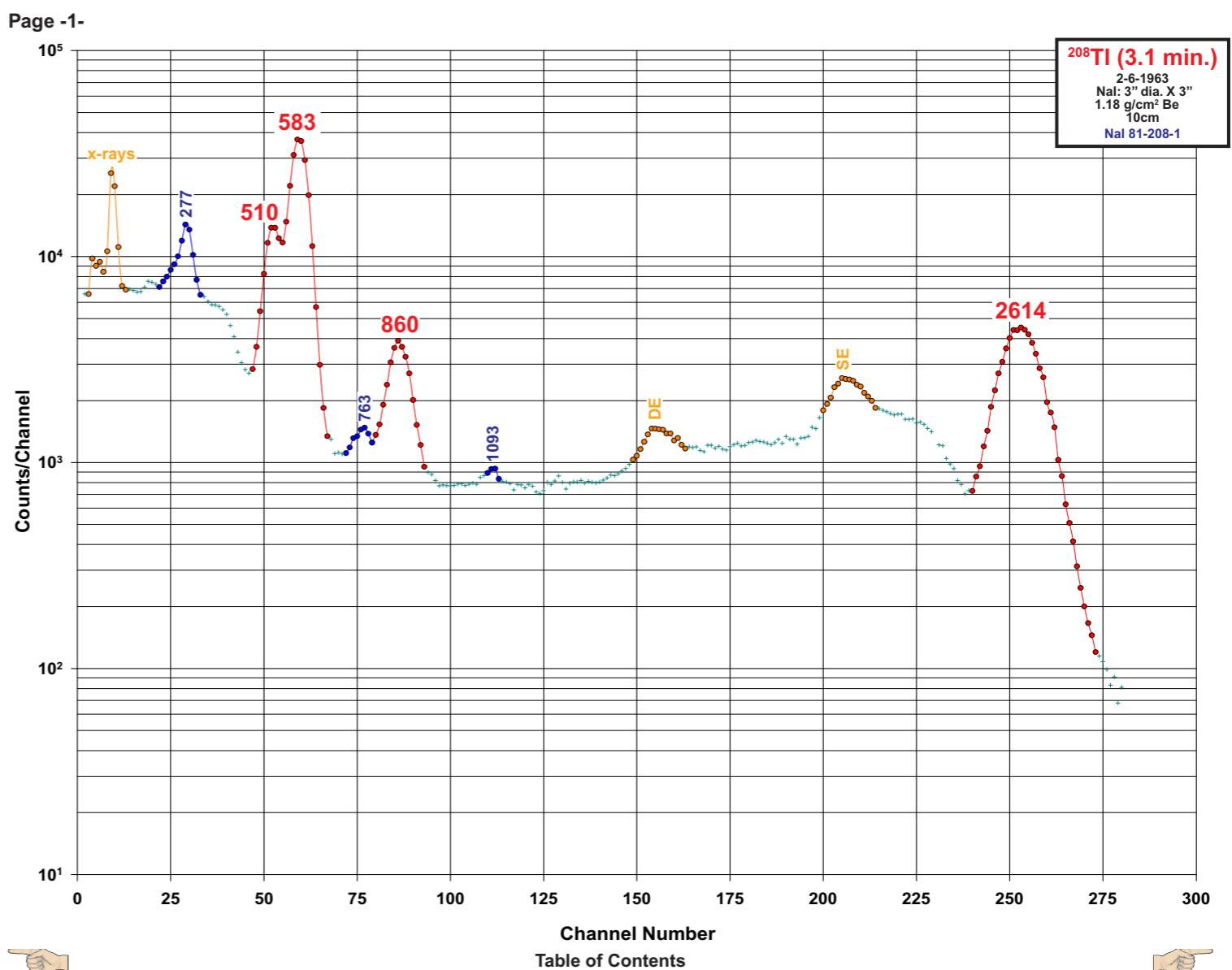
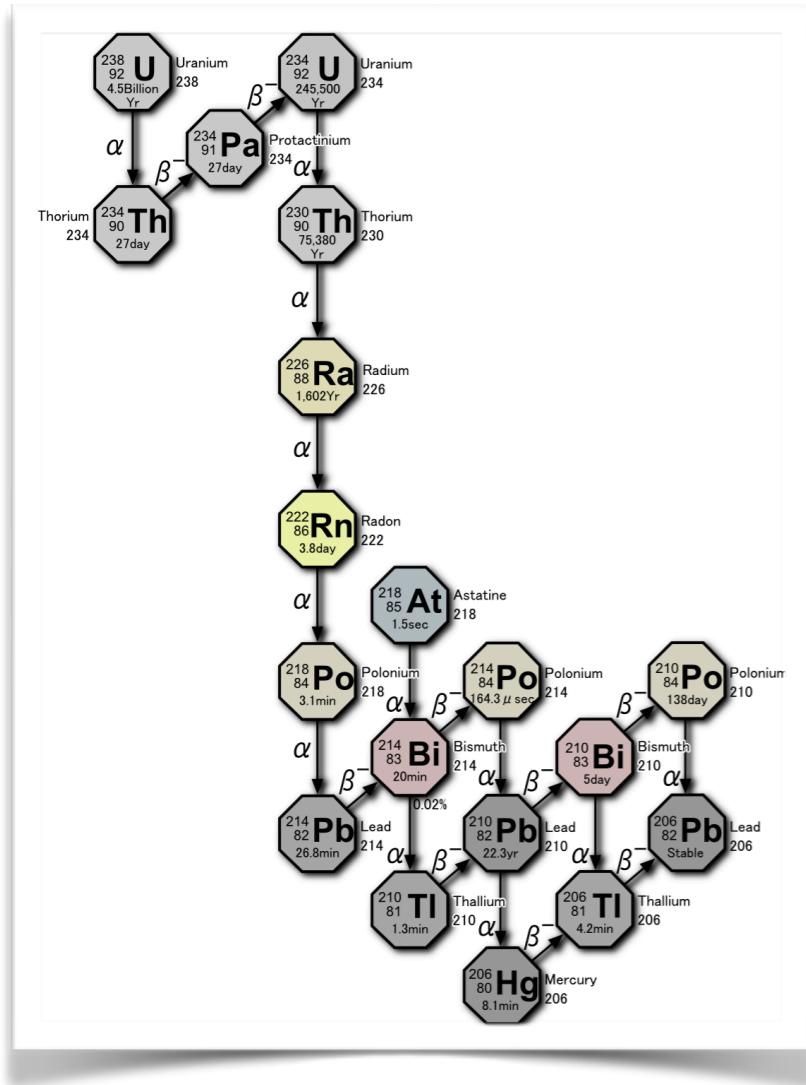


Germanio es semiconductor



Bolómetros pueden ser una opción

Lo que viene de fuera



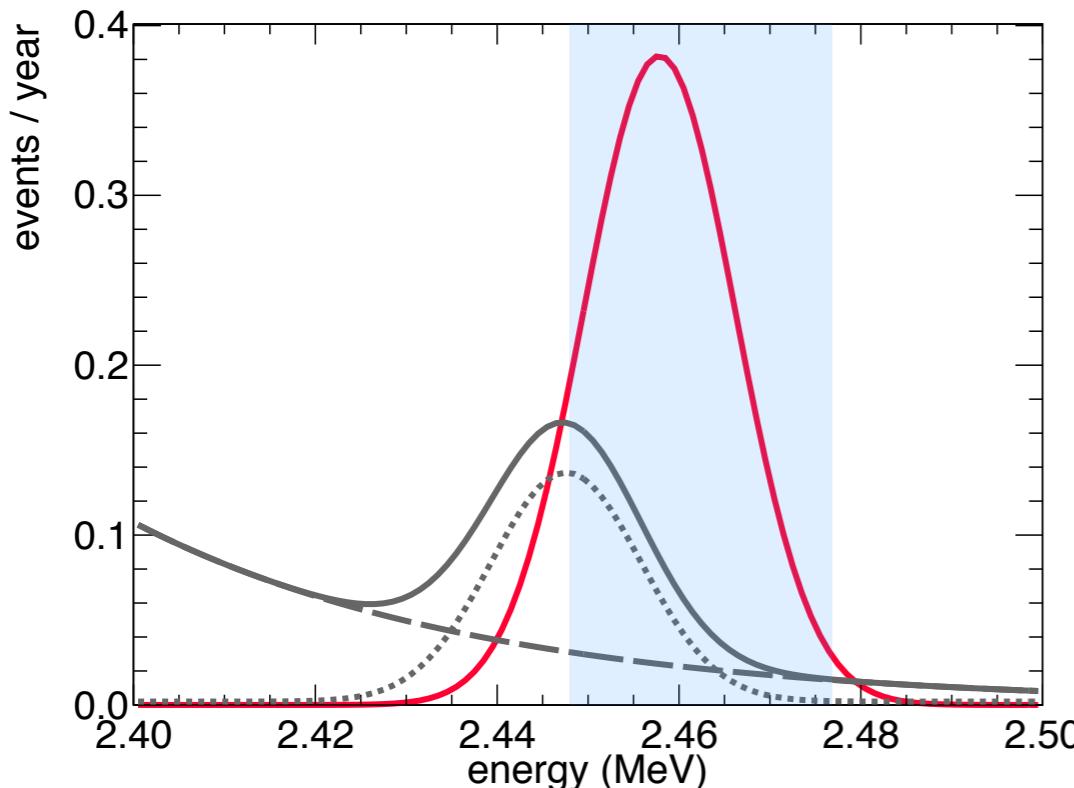
En realidad hay fondos procedentes de contaminaciones de radioisótopos naturales en las materiales del detector.

¿Cómo podemos reducir su efecto en los datos?

Selección de materiales

La tierra es radiactiva.

Todos los metales y otros materiales contienen polución de radioisótopos



Isótopos con $T_{1/2}$ cortos no importan.

Isótopos duraderos con desintegraciones con energías por encima o cerca a $Q_{\beta\beta}$ pueden formar fondos importantes.

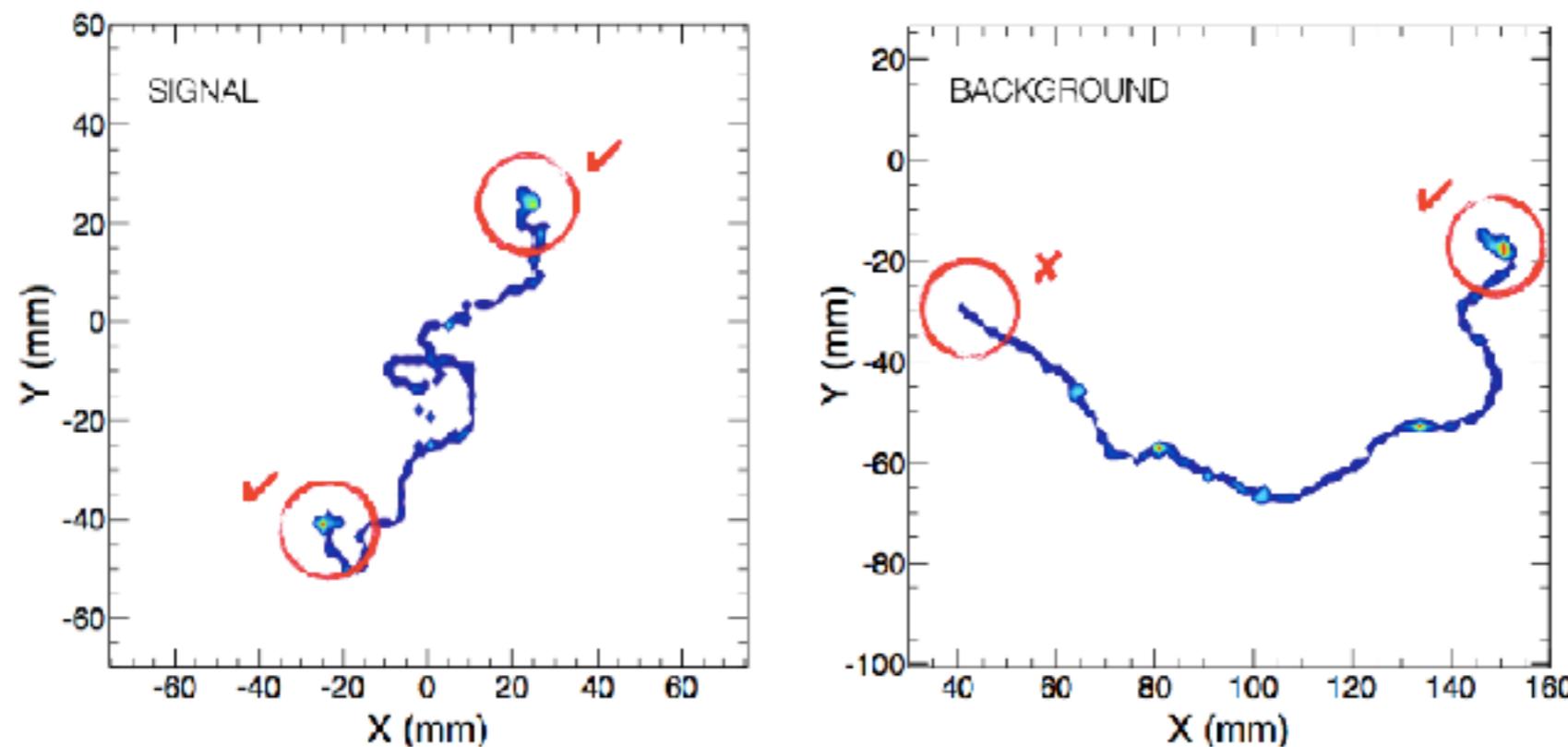
Algunos núcleos pueden activarse por neutrones o muones.

Todo que forma parte del detector tiene que seleccionarse estudiando su contenido de isótopos importantes.

Rechazo de fondos

Solo midiendo la energía, habrá fondos importantes y solo podemos reducirlos seleccionando materiales.

**Identificando alfas, betas, gammas
podemos rechazar más fondo.**



**Nuestra señal se forma de 2 electrones saliendo de un núcleo
podemos separar más señal de ruido**

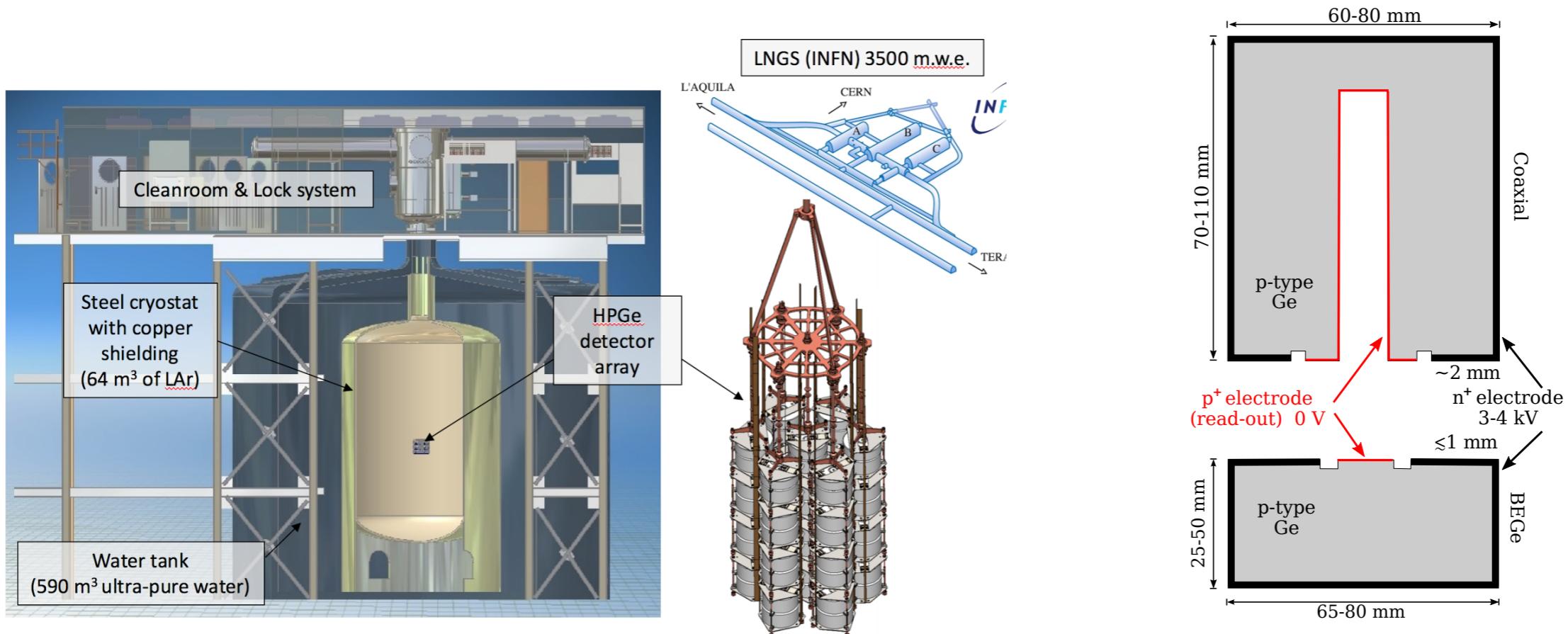
Resumen

- La naturaleza del neutrino podría ser distinta a los demás fermiones.
- La única forma conocida viable para distinguir entre neutrinos Dirac y Majorana es desintegración doble beta sin neutrinos.
- Construir un experimento viable requiere mucho estudio.

Clase V: La naturaleza del neutrino 2

Los experimentos

Ge: Gerda



[EPJC 73 (2013) 2330]

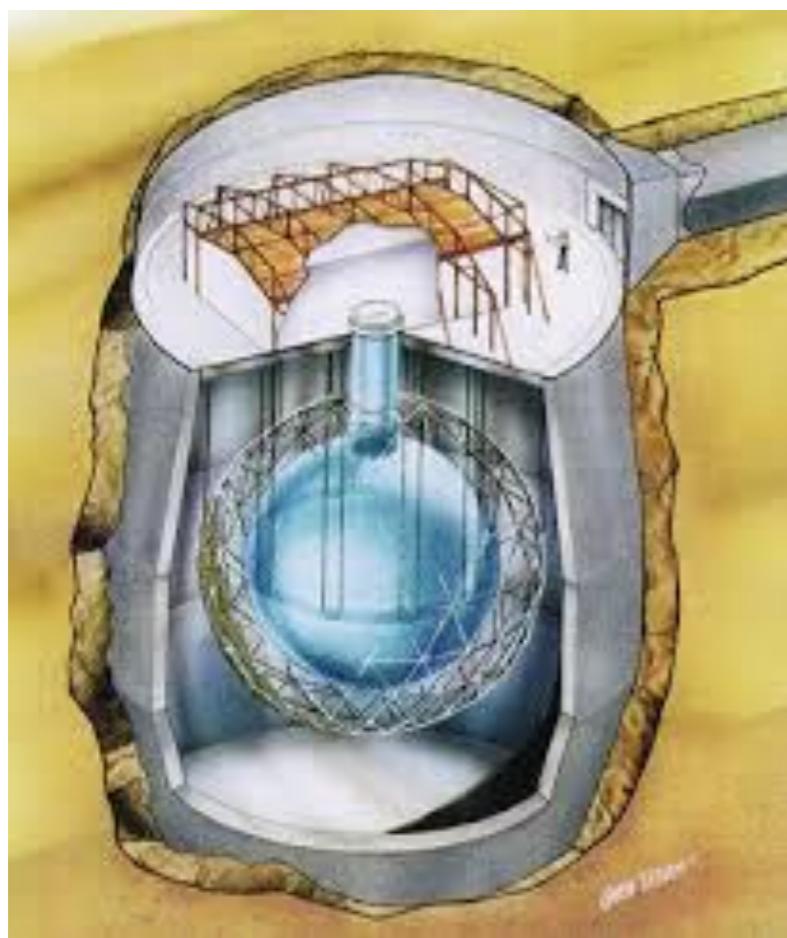
Matteo Agostini (GSSI/LNGS)

Después de ~46.7 kg yr de datos limitan:

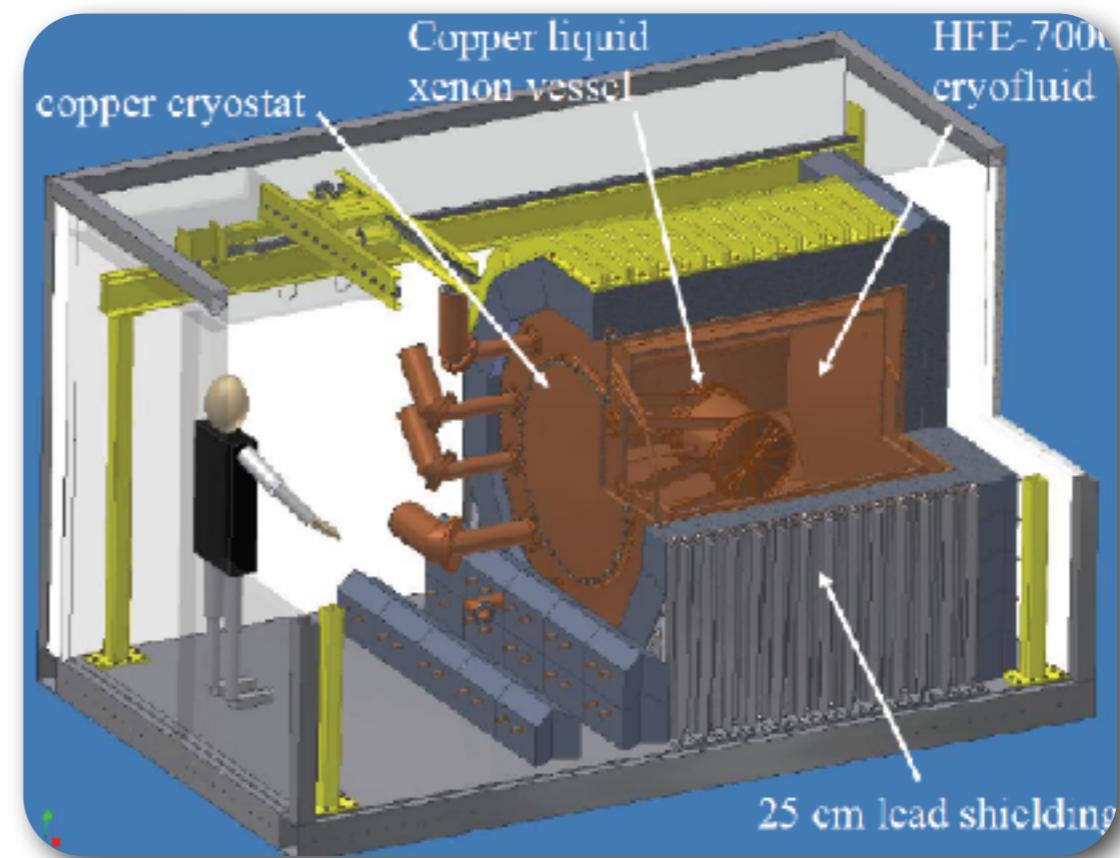
$$T_{1/2}^{0\nu} > 8.0 \times 10^{25} \text{ yr}$$

Phys.Rev.Lett. 120 (2018) 132503

Xe: la moda actual



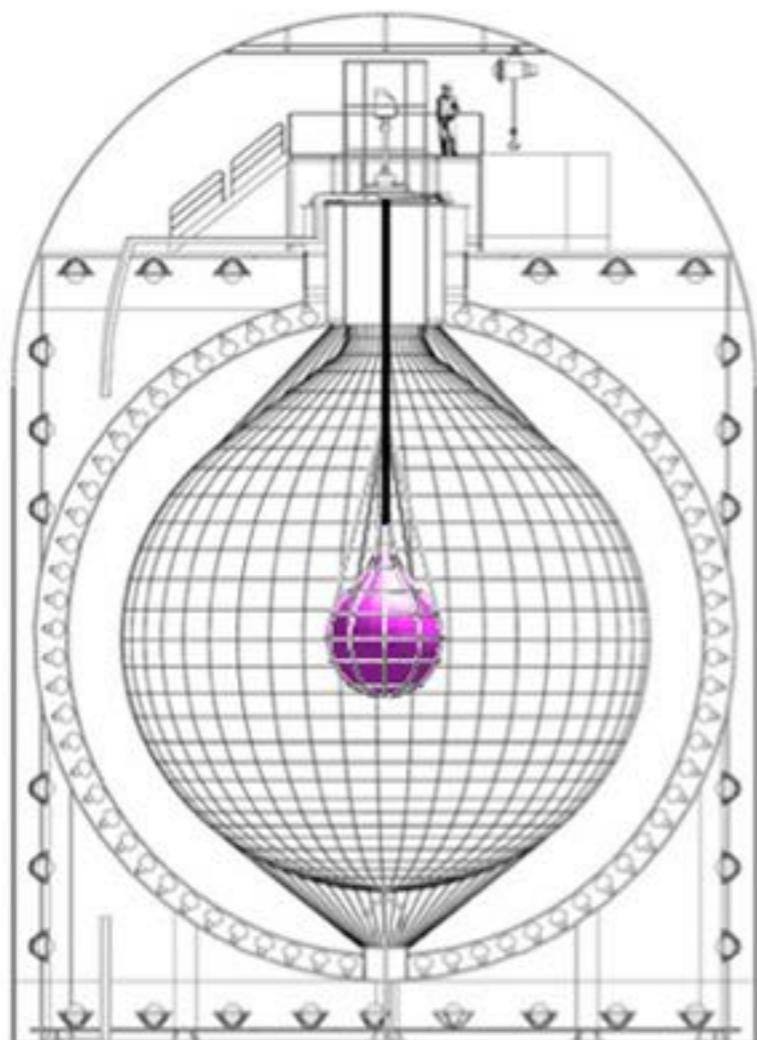
KamLAND-Zen



EXO

Dos experimentos exitosos que actualmente imponen los límites más estrictos.

KamLAND-Zen



Globo de diametro de 3.08 m con 13 toneladas de Xe + centellador líquido.

2.91% ^{136}Xe (~378 kg)

Luz de centelleo se detecta en los PMTs de KamLAND

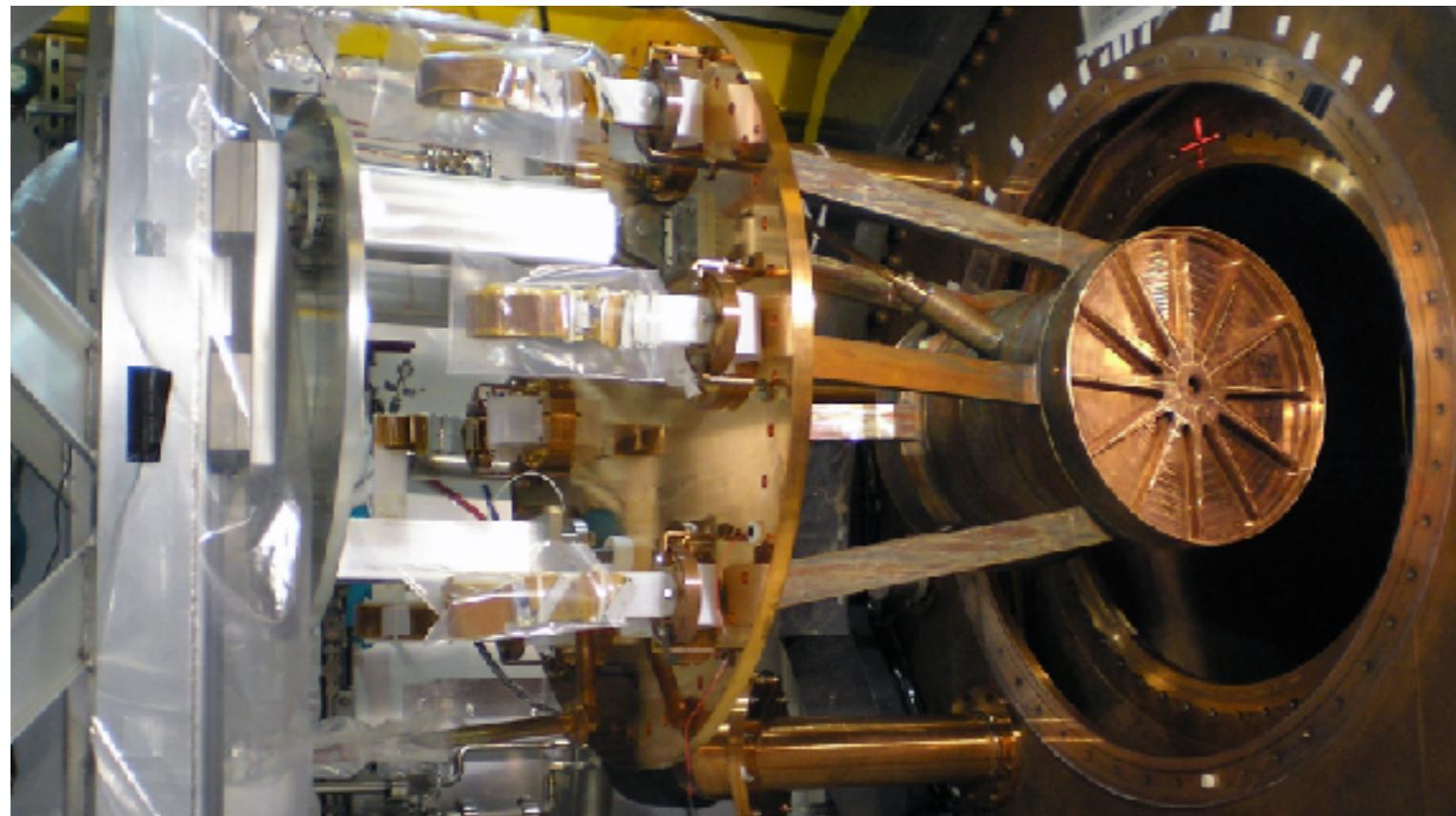
Veto activo usando centellador líquido en el globo más grande.

Después de ~1745.6 kg yr de datos limitan:

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.07 \times 10^{26} \text{ yr}$$

Phys.Rev.Lett. 117 (2016) 082503

EXO



TPC criogénico de xenón líquido

Mide Luz de centelleo del Xe en APDs y los electrones de deriva en hilos metálicos.

Combina las dos medidas para mejorar resolución.

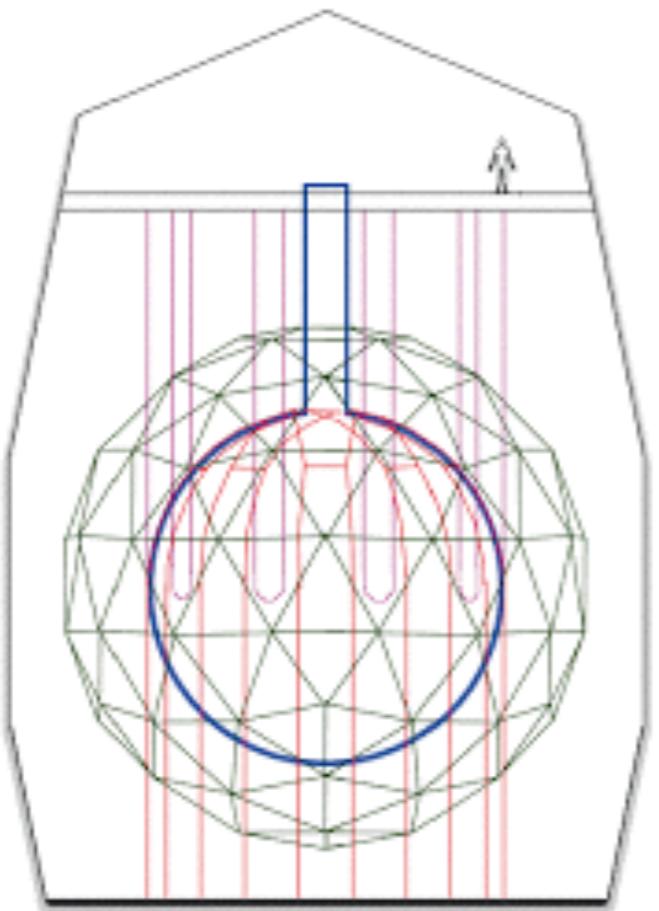
Sucesos detectados en más de un hilo rechazados.

Después de ~177.6 kg yr de datos limitan:

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.8 \times 10^{25} \text{ yr}$$

Phys.Rev.Lett. 120 (2018) 072701

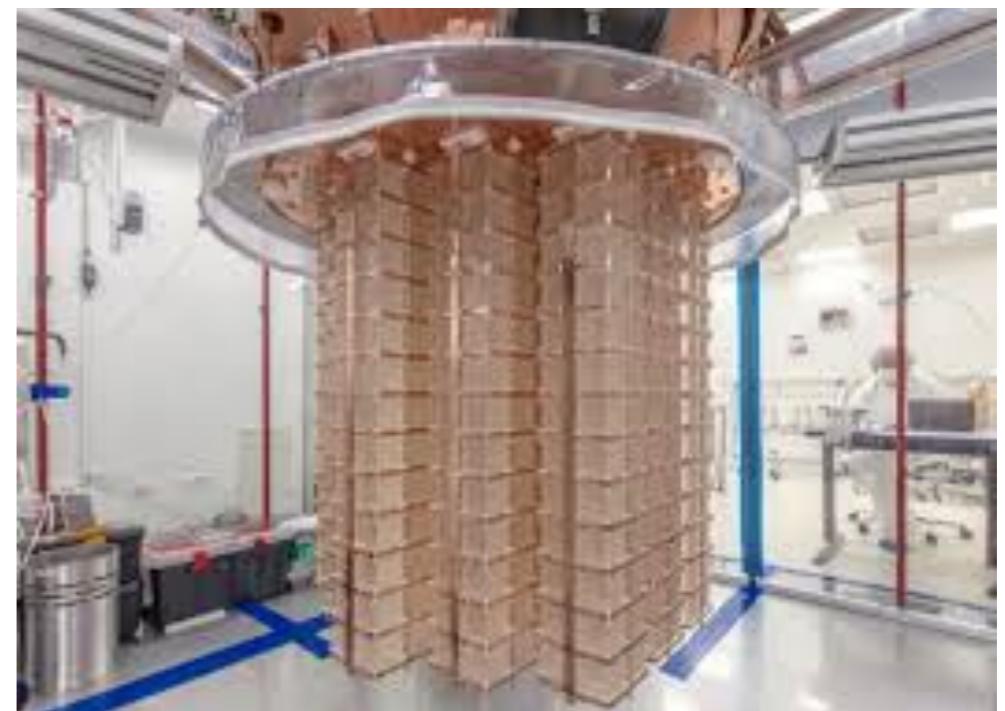
Te: SNO+ y CUORE



~800 kg ^{130}Te disuelto en centellador líquido

Los PMTs de SNO con concentradores

Resolución mala pero mucha masa

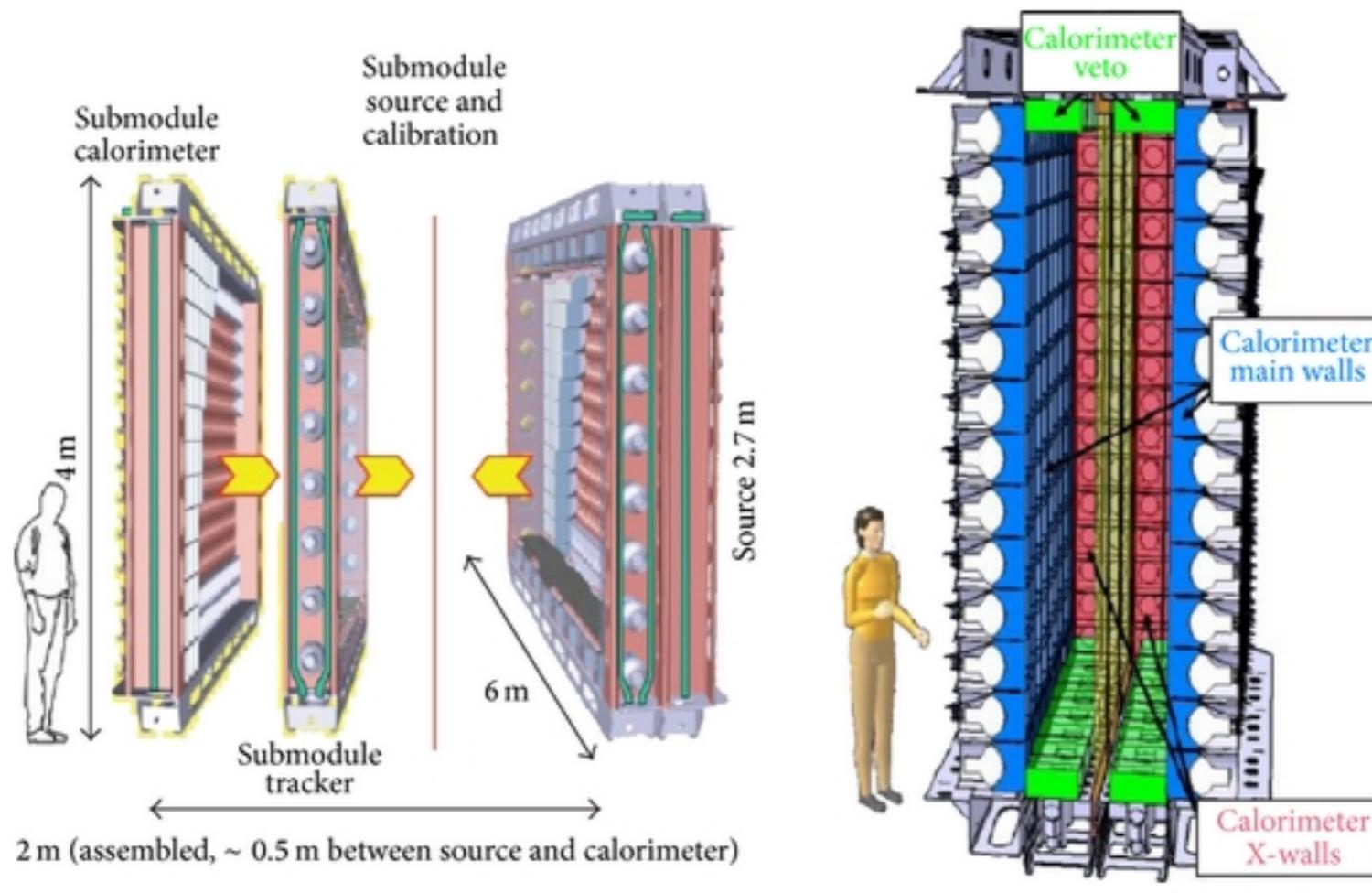


998 $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ Bolometers
Hechos de TeO_2
Masa de Te: 206 kg

Buena resolución ~0.2 % FWHM

Amontonamiento de eventos posible

Se: SuperNEMO



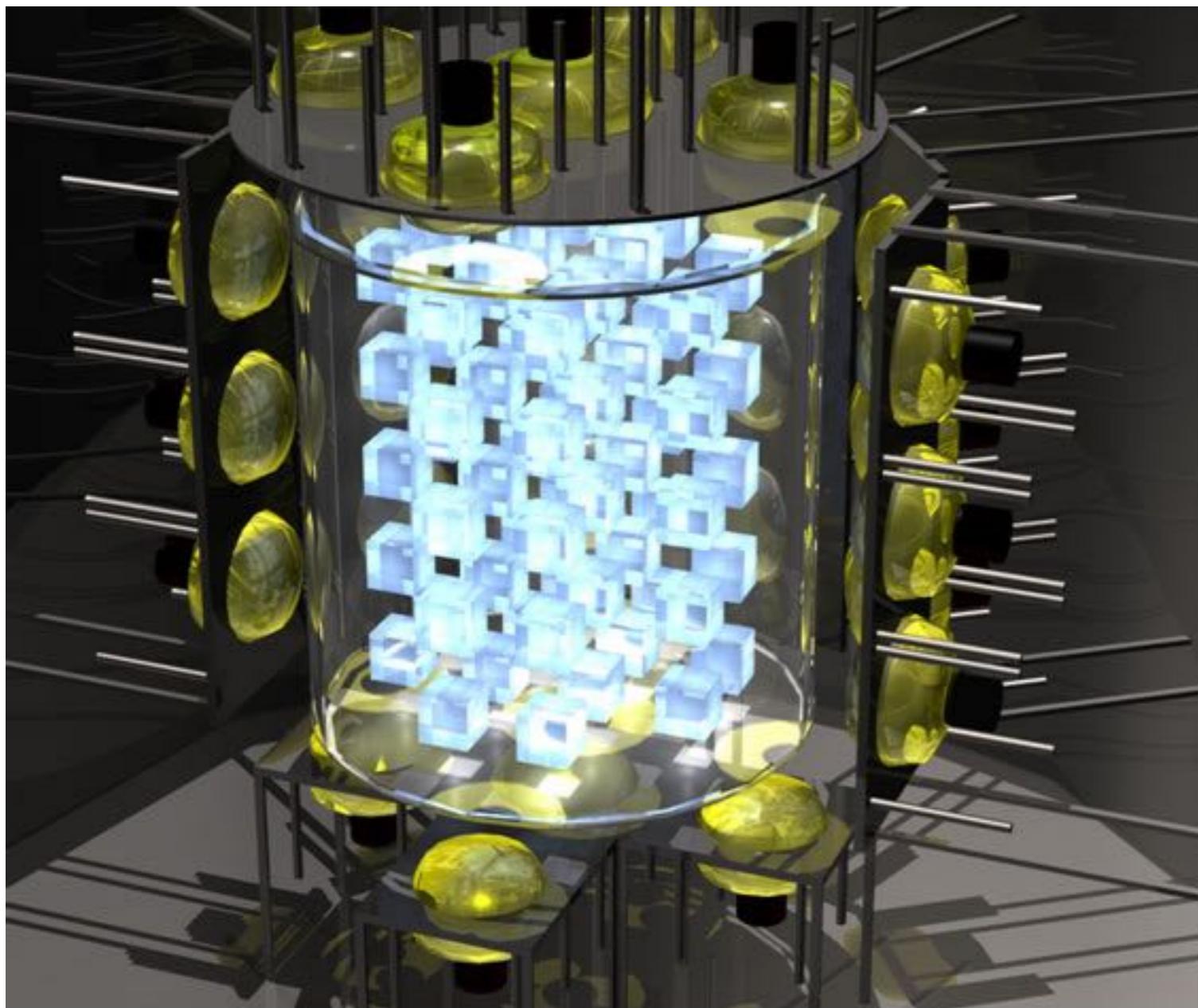
Calorimetría y reconstrucción de trazas

Se en una lámina en el centro.

Actualmente construyendo detector con ~7 kg.

Muy caro y grande para la masa. Podría usar otras fuentes.

Ca: CANDLES



Cristales centelladores de CaF_2

Enriquecimiento muy complicado

$Q_{\beta\beta}$ alto lo hace atractivo.

Veto activo en centellador líquido.

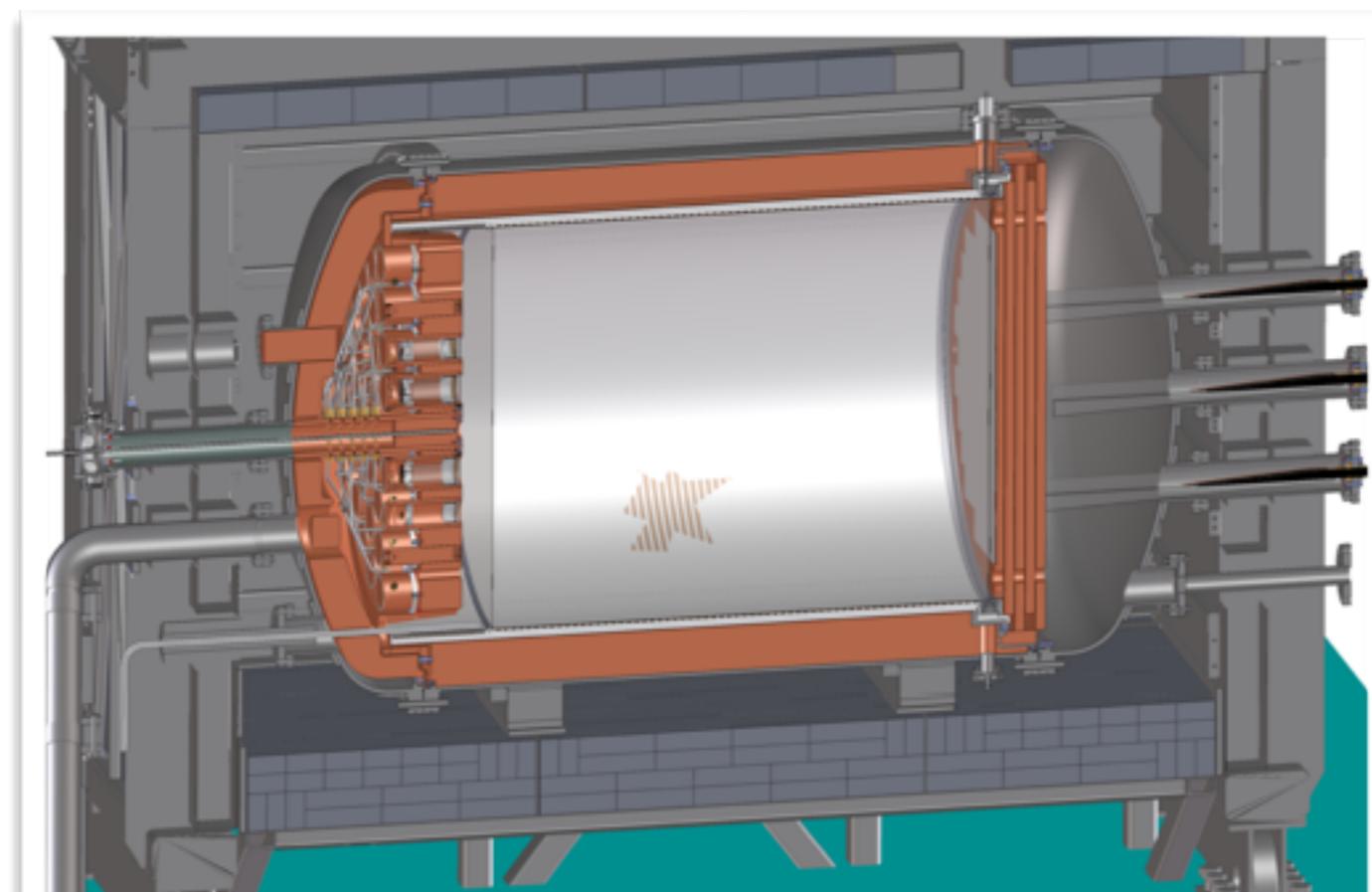
**Colaboración activa en la búsqueda
de una forma de enriquecer en ^{48}Ca**

Reviews:

Riv.Nuovo Cim. 35 (2012) 29-98

PoS NOW2016 (2017) 059

NEXT: un ejemplo detallado



Xe gaseoso para resolución mejorada y reconstrucción topológica

THE NEXT COLLABORATION



IFIC (Valencia), Santiago de Compostela, Girona, Politécnica Valencia, Autónoma Madrid



Coimbra GIAN, Coimbra LIP, Aveiro



ANL, FNAL, Iowa State, Ohio State, Texas
A&M, Texas Arlington, Harvard



JINR (Dubna)



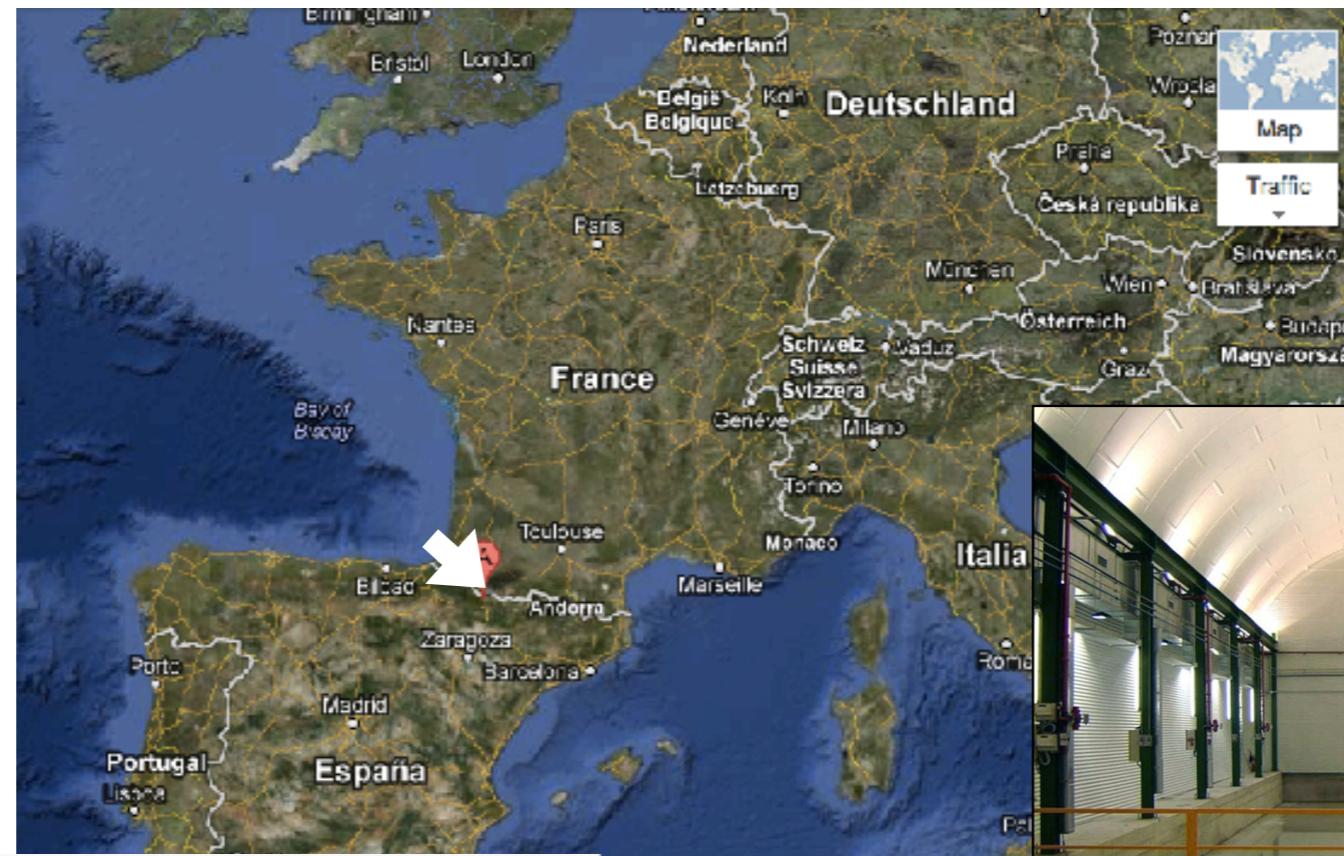
A.Nariño (Bogotá)



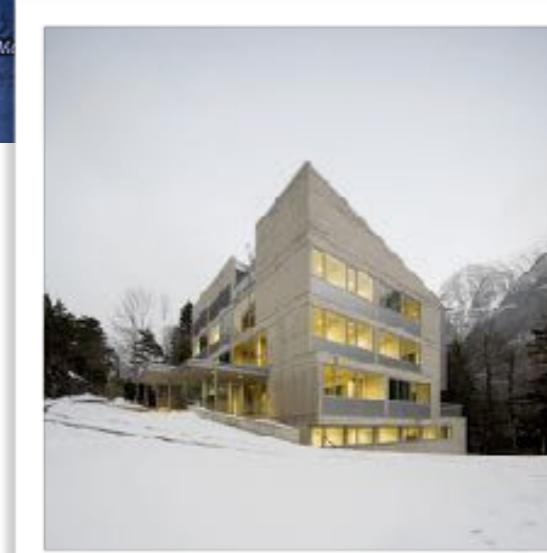
Ben Gurion

Laboratorio Subterráneo de Canfranc

- 2500 m water equivalent

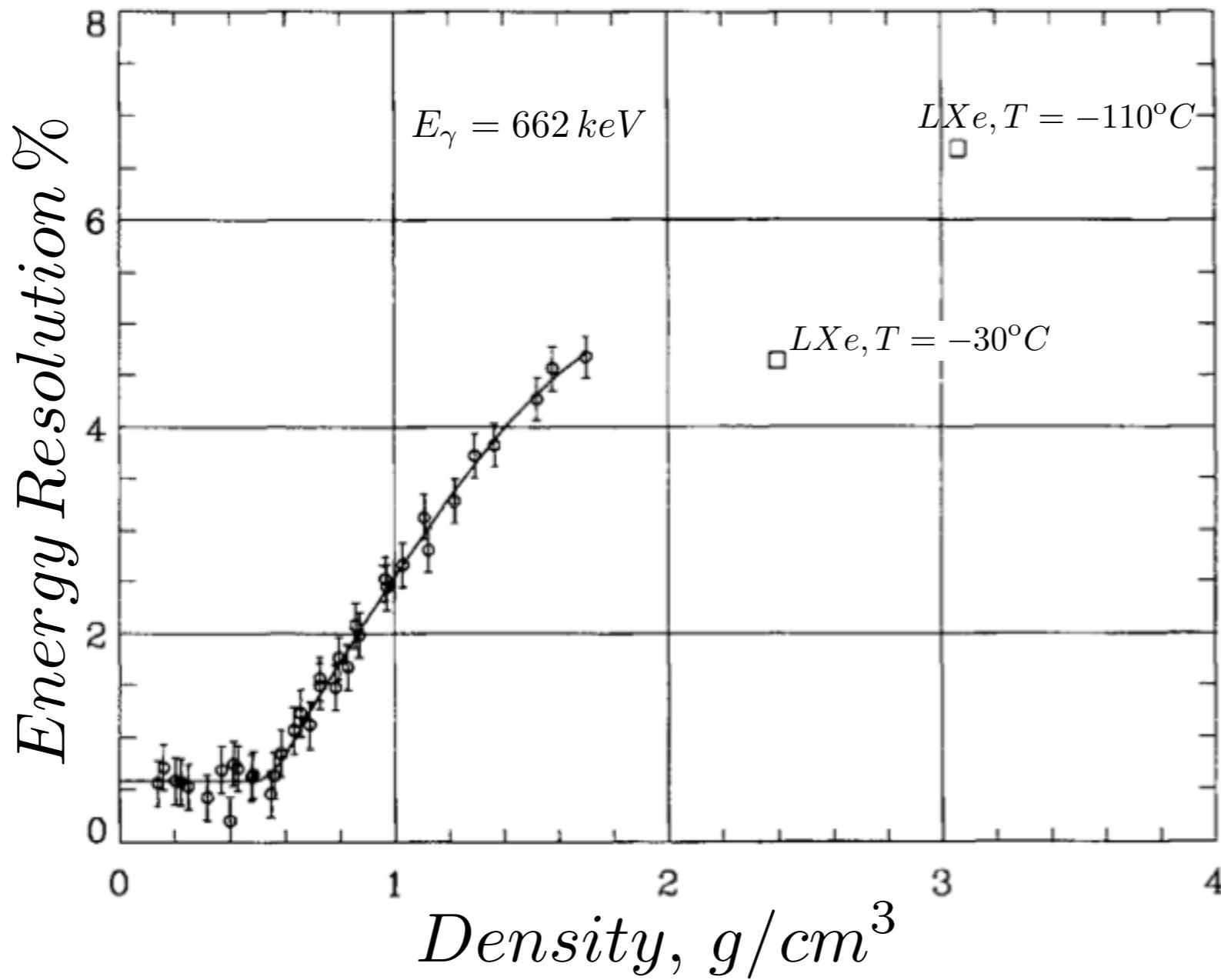


Laboratorio Subterráneo de Canfranc



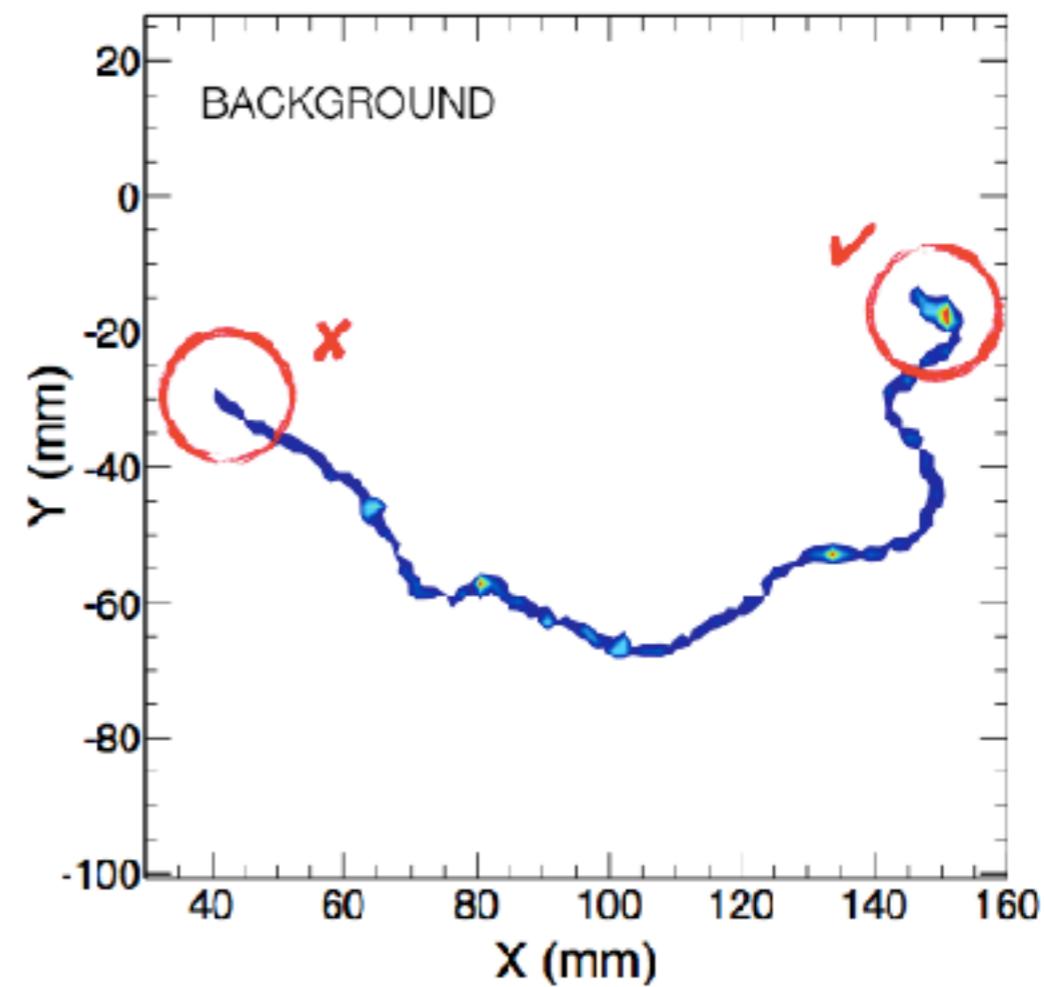
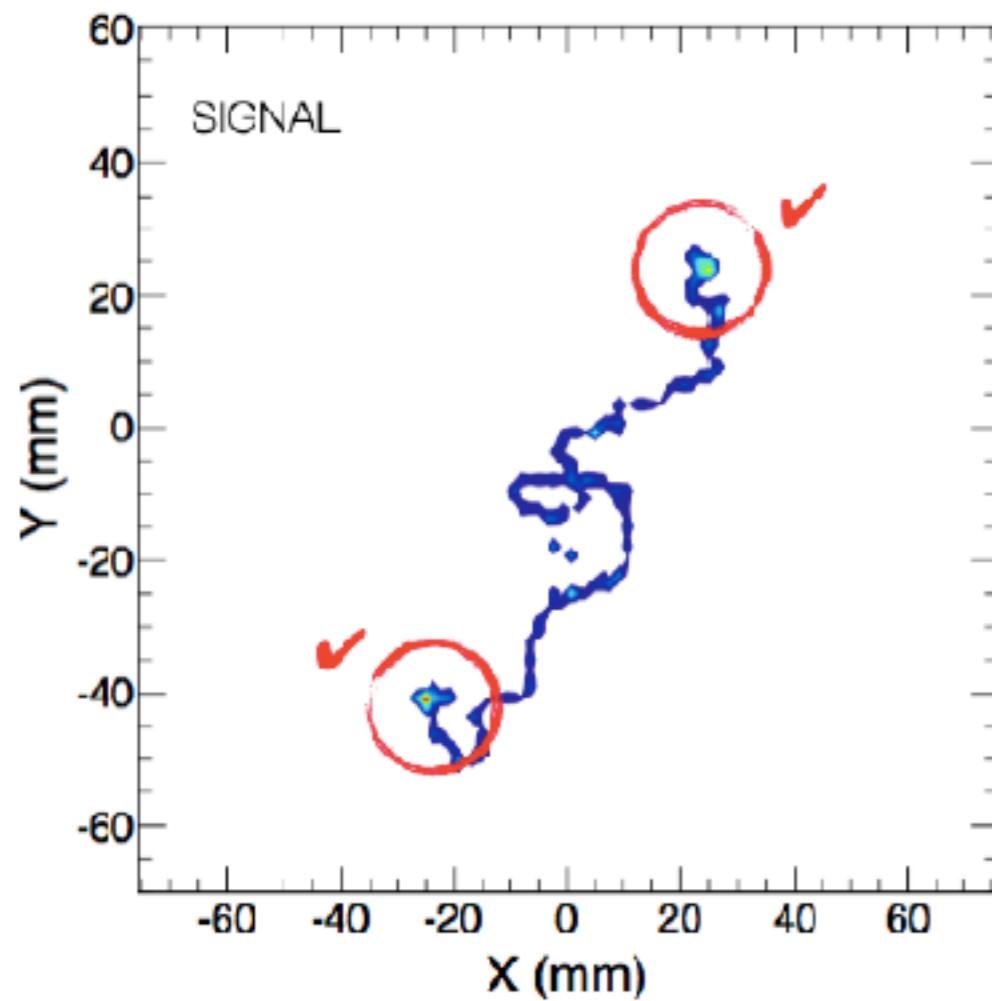
¿Por qué gas?

Plot from Bolotnikov and Ramsey, Nucl.Instrum.Meth.A 396 (1997) 360-370.



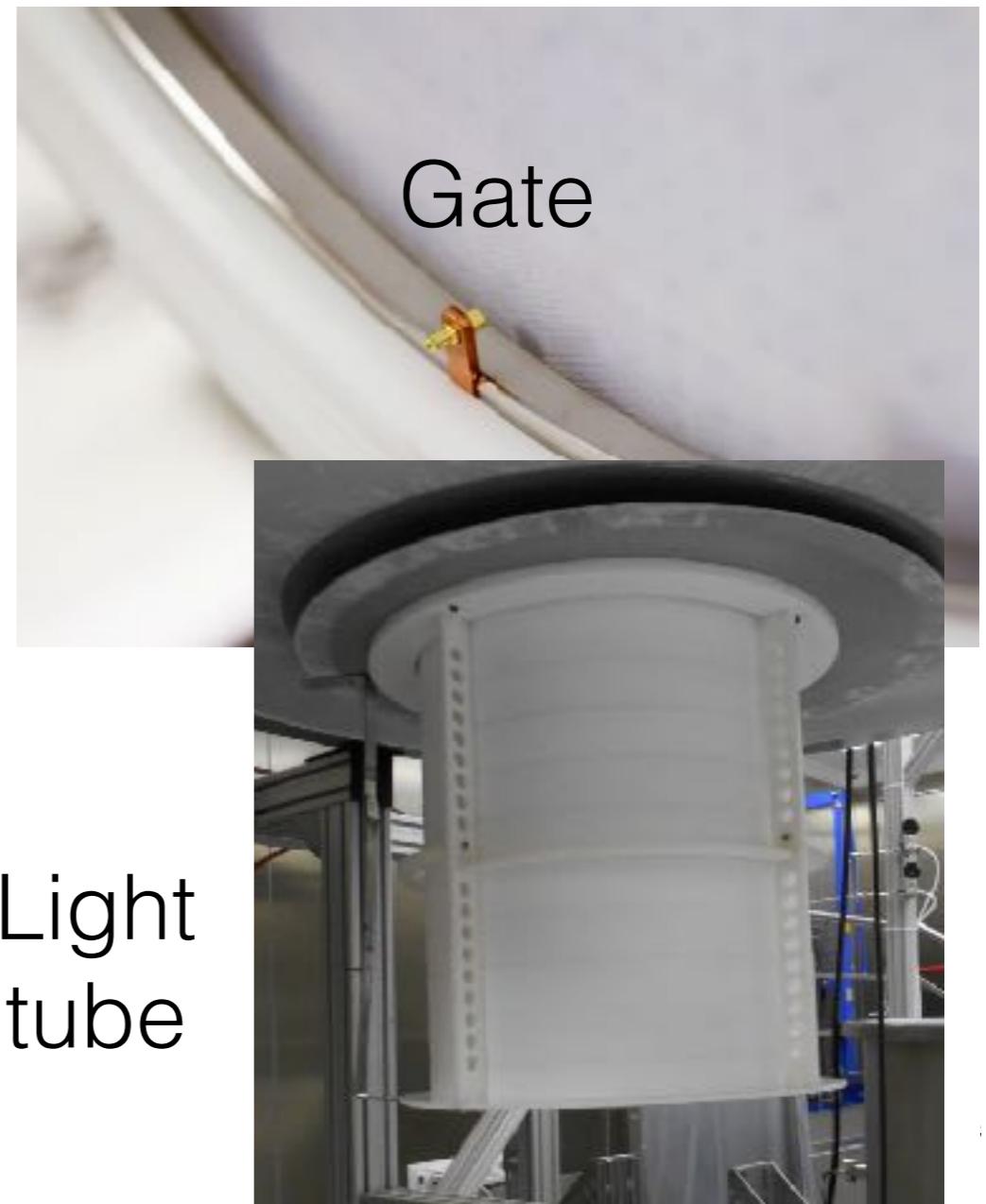
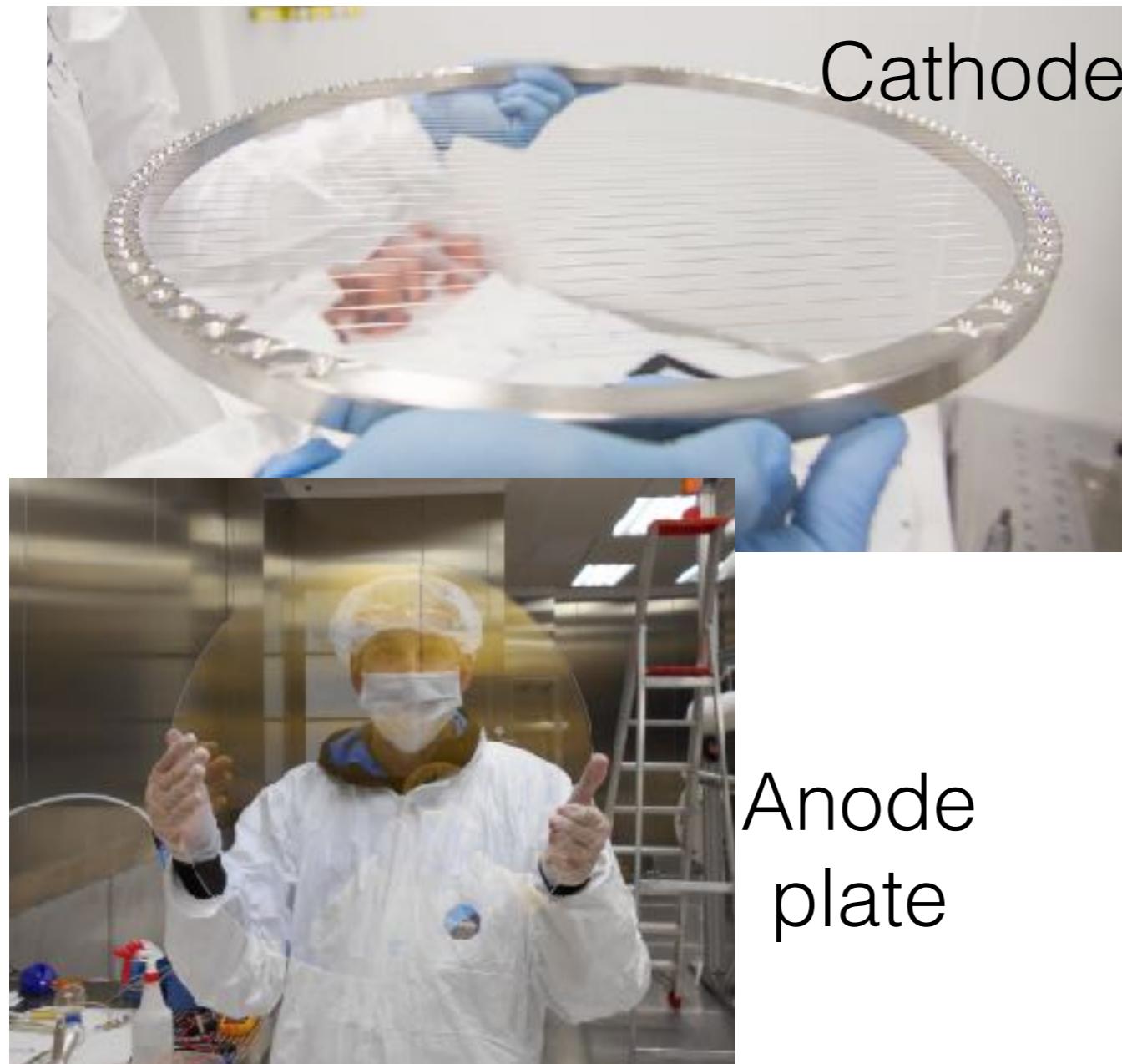
Distribución de energía depositada entre ionización y excitación menos compleja.

Tamaño de evento

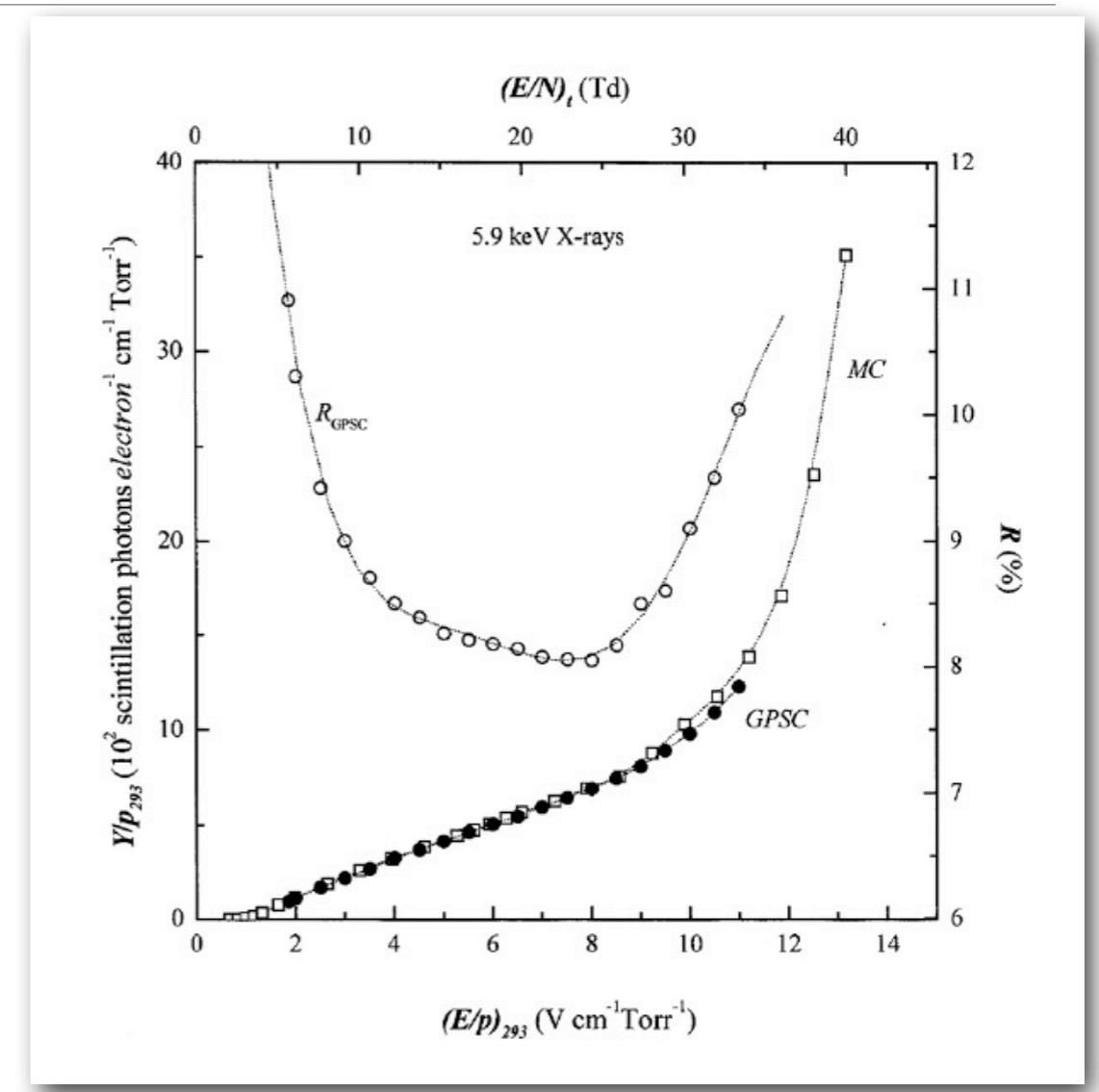
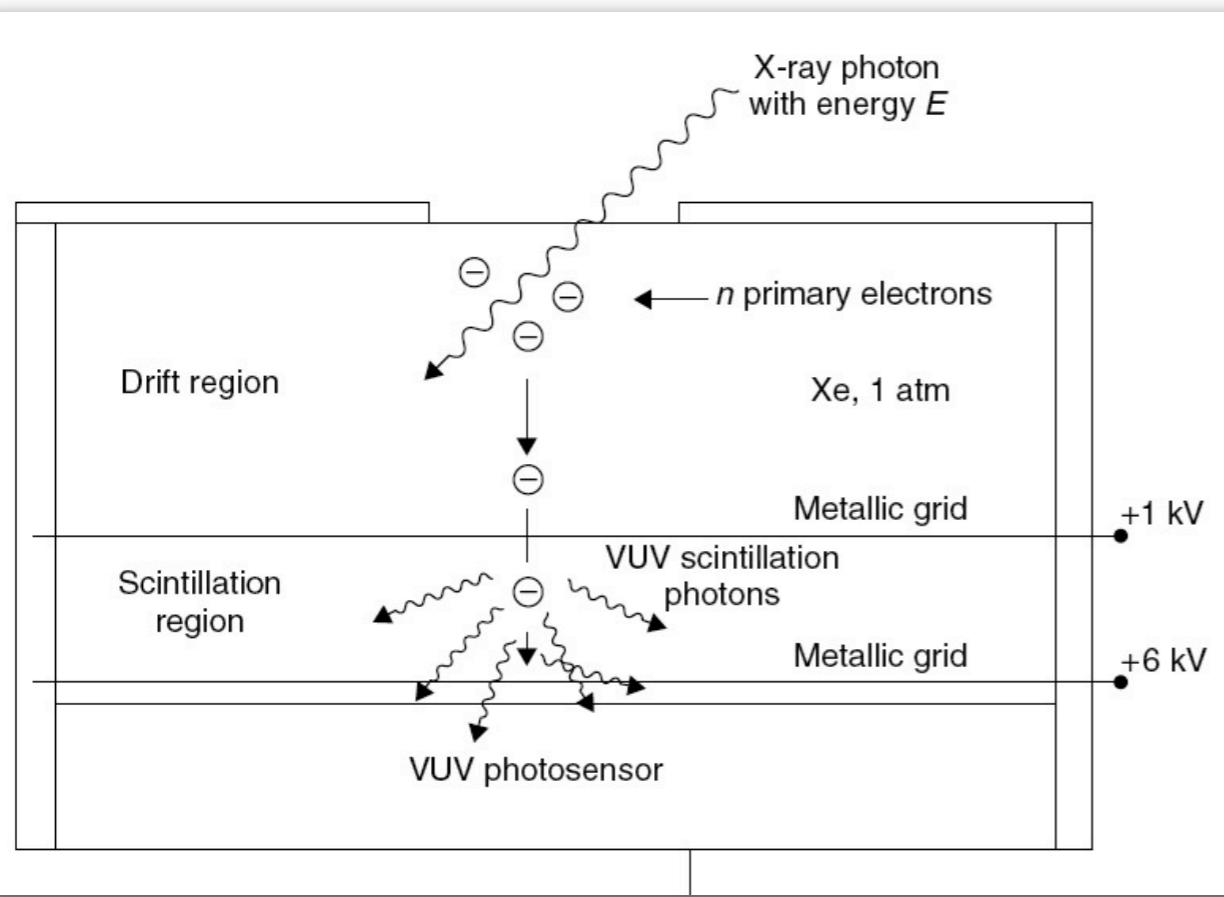


Con densidad baja, los electrones depositan energía en el gas en una área más grande

Time Projection Chamber



Electroluminescencia

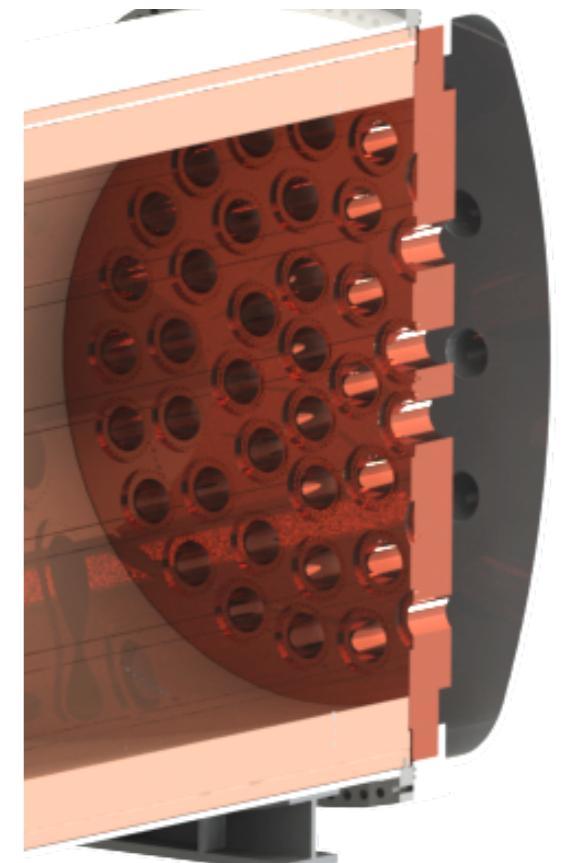


Amplificación de la señal de ionización a través de re-excitación del gas.

Electrones llegan a una región con más campo eléctrico donde se aceleran lo suficiente para excitar el gas.

Produce mucha luz de forma lineal con poca fluctuación.

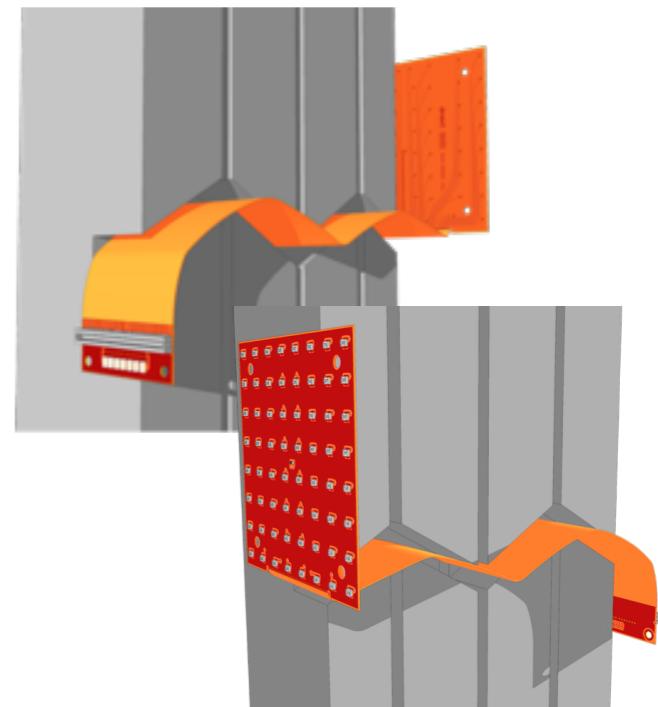
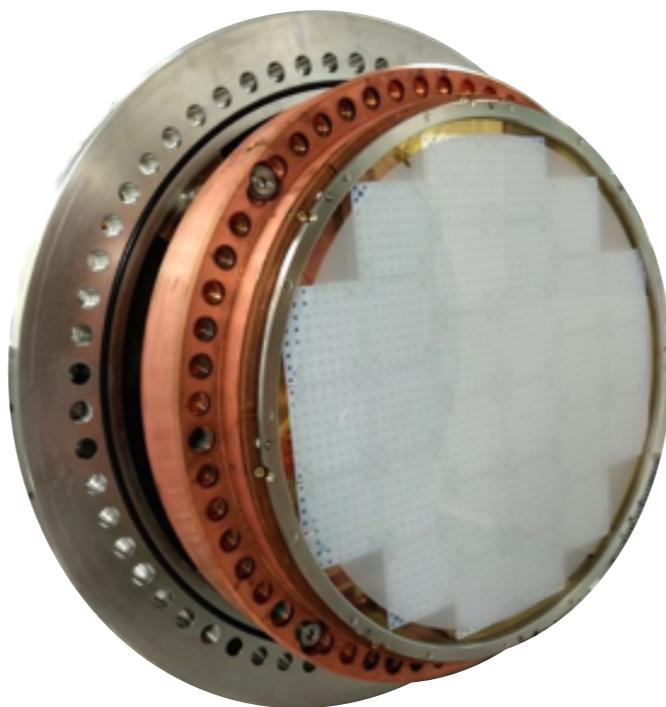
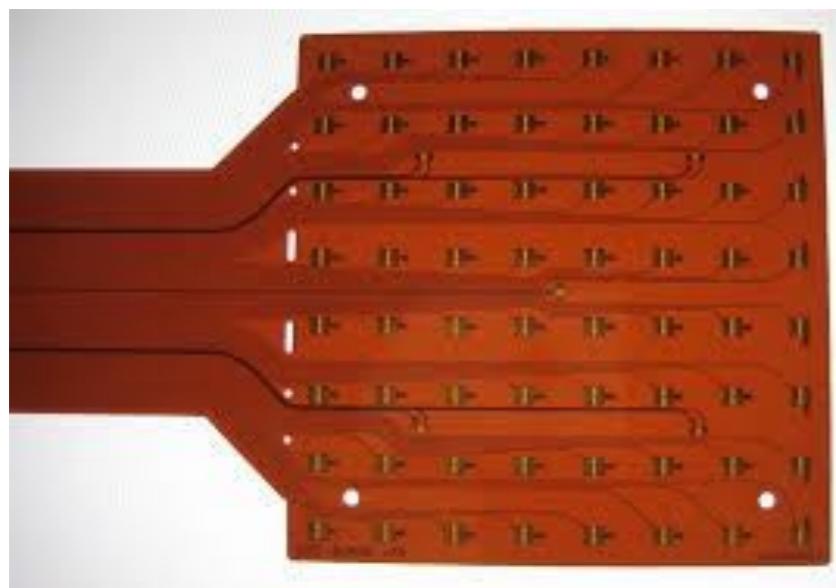
Energía y to: PMTs



Tecnología entendida, con poca corriente oscura y con ruido bajo.

Resolución de carga y radiactividad pueden ser problemas.

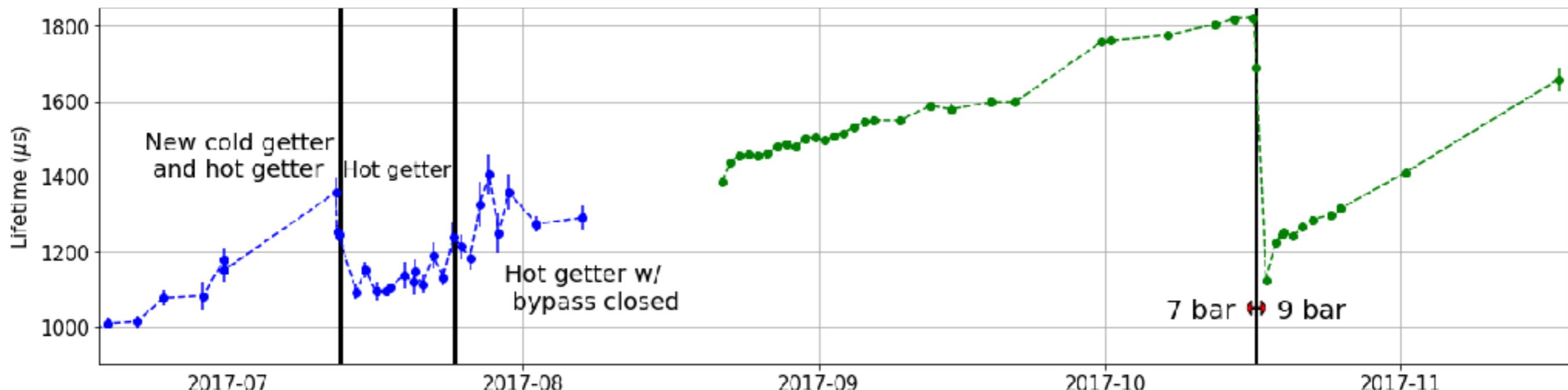
Reconstrucción topológica: SiPM



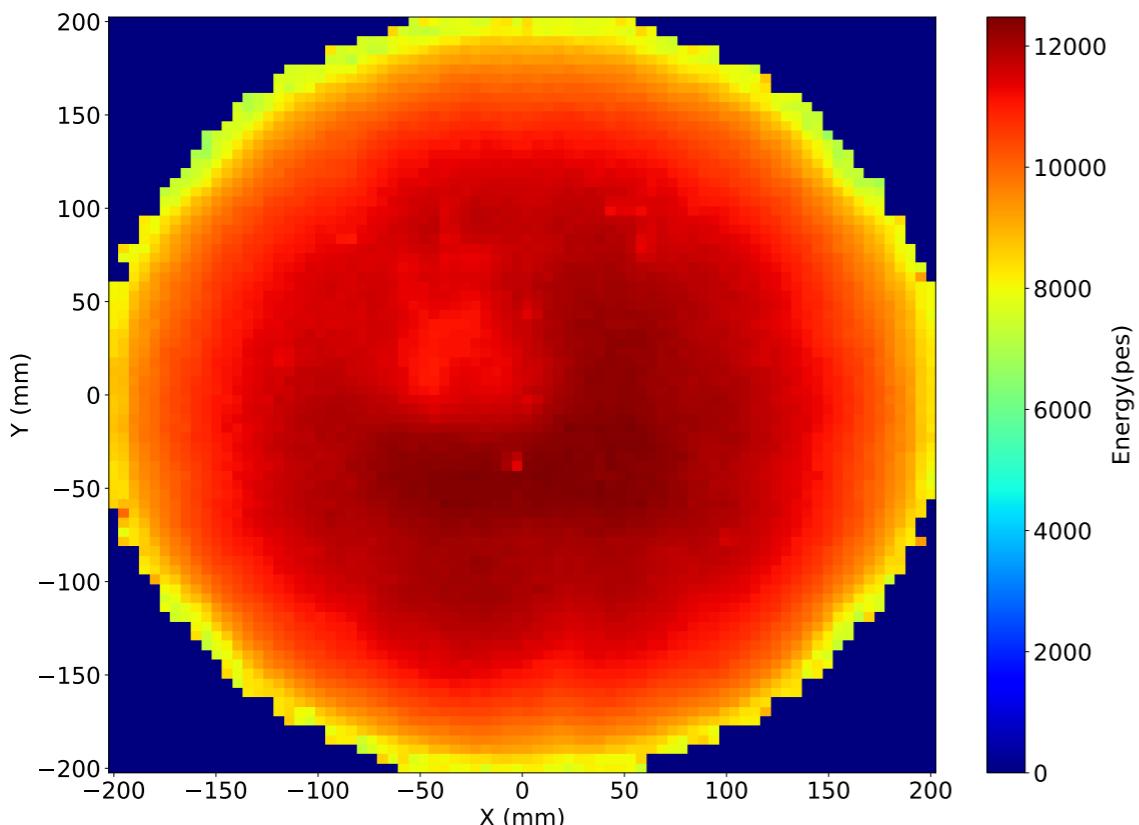
Pequeña masa, sensibilidad alta.

Corriente oscura alta pero tecnología en desarrollo.

Calibración del detector



Pérdida de electrones de deriva

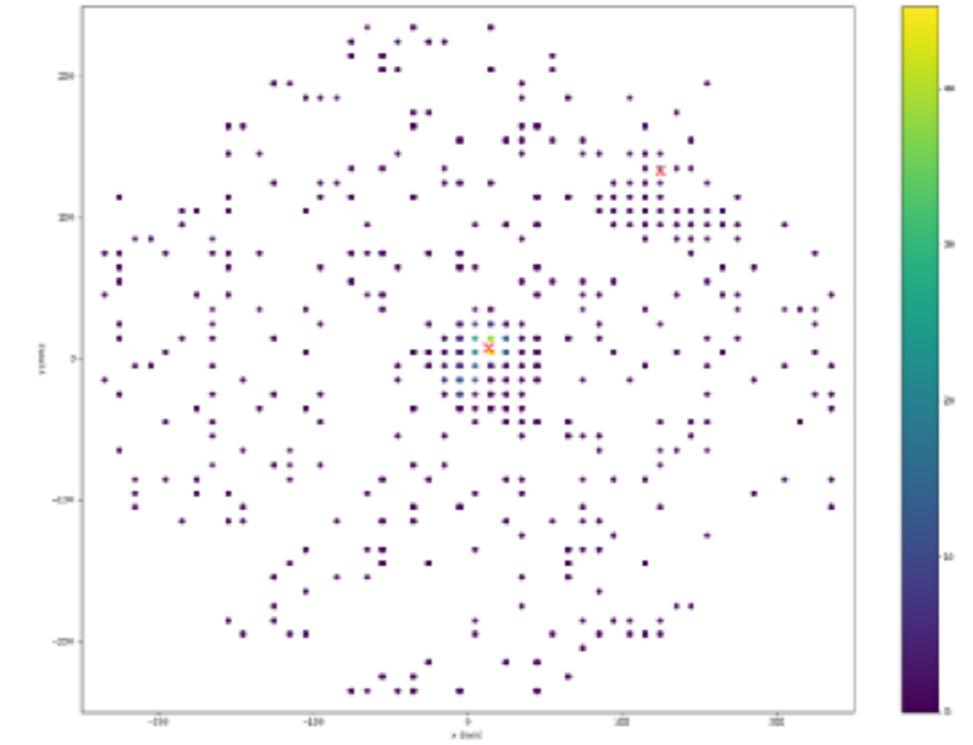
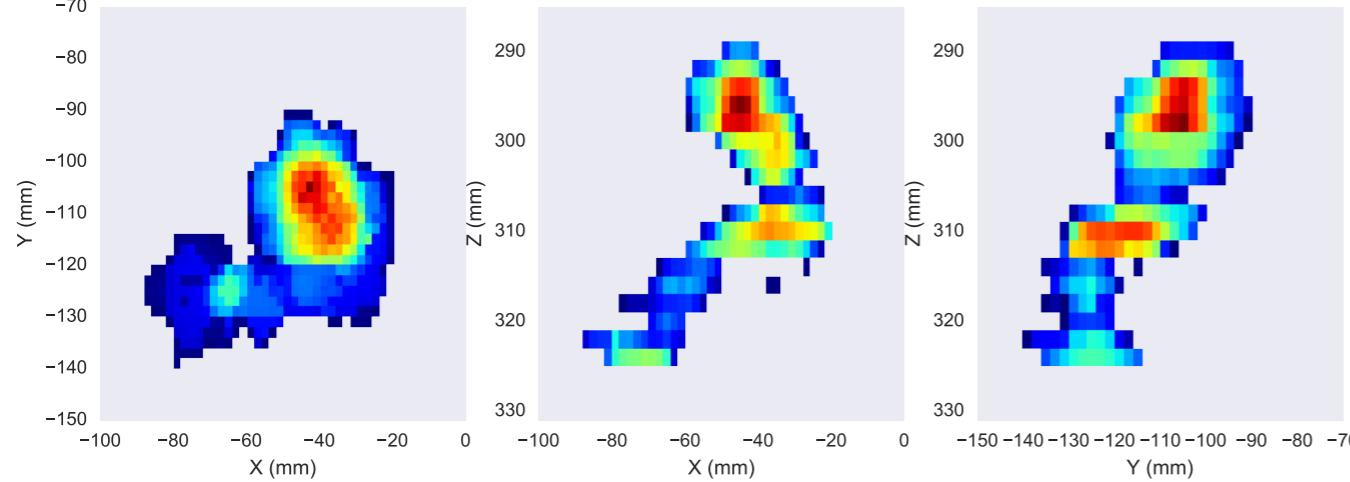


Variación de respuesta según posición.

Estos efectos pueden ser disminuidos calibrando con una fuente de baja energía.

En NEXT usamos ^{83m}Kr procedente de ^{83}Rb

Topología



Simplest topological cut: Blob ratio

