

Identificación de Partículas Neutras

Módulo de Instrumentación

Mayly Sanchez (Iowa State, USA)



Latin American alliance for
Capacity building in Advanced physics

LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea



Identificación de Partículas Neutras: Neutrinos! y un poquito de neutrones

Módulo de Instrumentación

Mayly Sanchez (Iowa State, USA)



Latin American alliance for
Capacity building in Advanced physics

LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea





- Introducción histórica a la detección de neutrinos.
- Principios básicos de la detección de neutrinos.
- Técnicas de detección de neutrinos:
 - Calorimetría
 - Detectores Cherenkov
 - Centelladores líquidos y otras técnicas
 - Cámaras de proyección temporal
- Retos y el futuro.

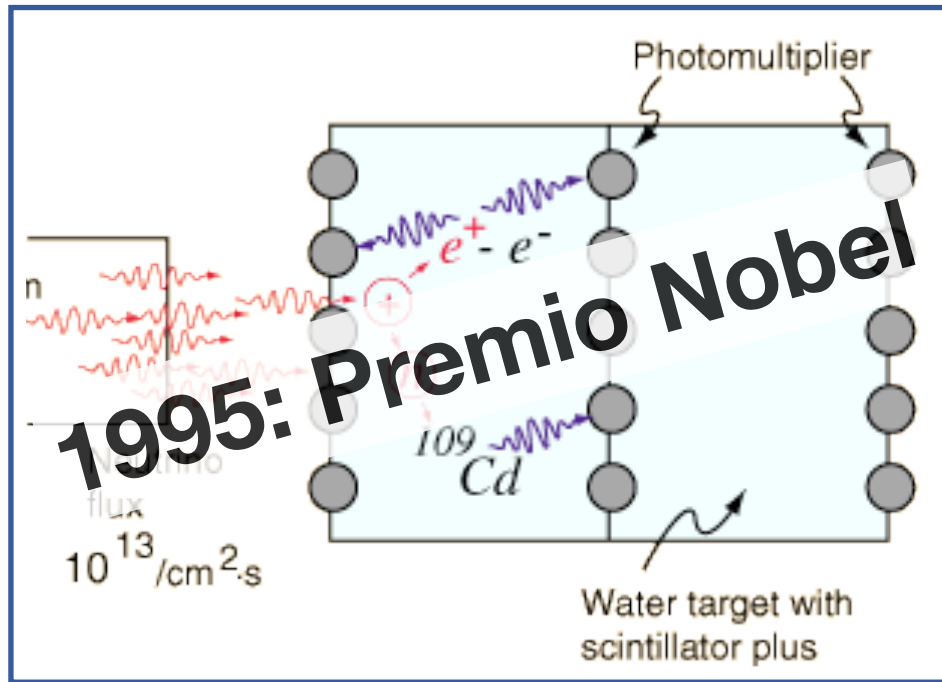
Esta clase esta basada en otras dadas en la International Neutrino Summer School, para saber mas:
2019: <https://indico.cern.ch/event/1011452/overview>
2021: <https://indico.cern.ch/event/1011452/>

Introducción Histórica





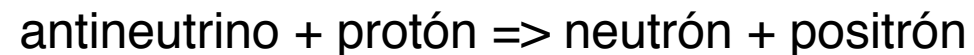
Detección de Neutrinos: Los primeros tiempos



“Observamos pacientemente, esperando uno cada pocas horas. Y hubieron muchas horas en un día, en un mes, en un año.”

Clyde Cowan

- Pauli propone el neutrino en 1930 como un “remedio desesperado” para salvar la ley de conservación de la energía en el decaimiento beta.
- En 1953 Reines y Cowan proponen un experimento con neutrinos saliendo de un reactor nuclear para capturar neutrinos en la siguiente reacción:



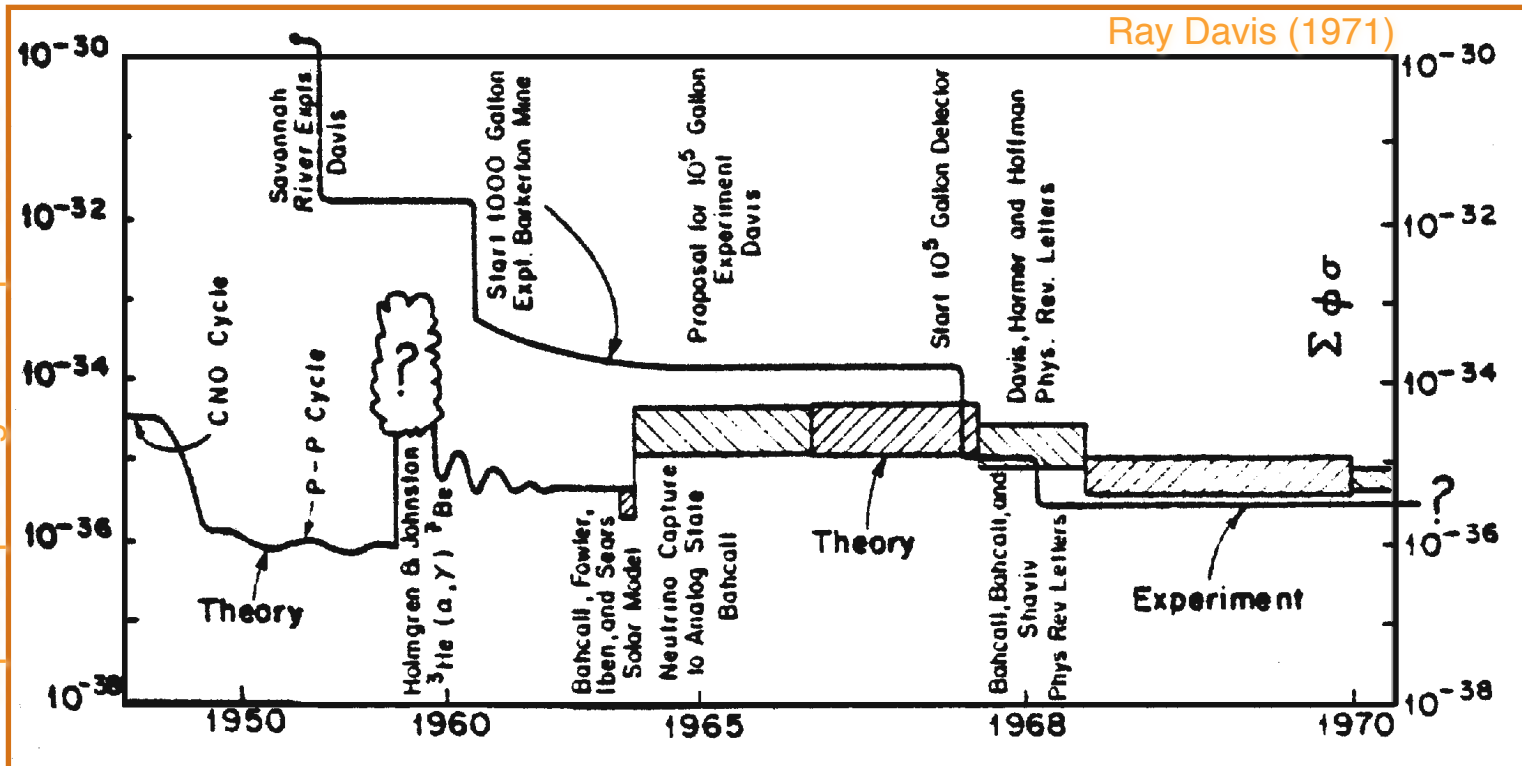
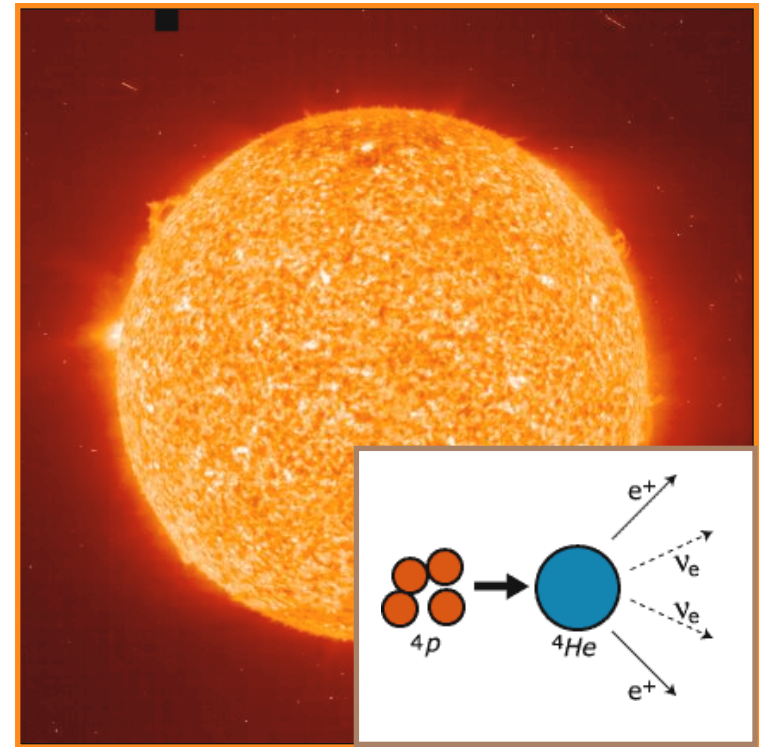
- La señal que buscaban era la aniquilación del positron y la captura (retardada) del neutron al ritmo de 3 eventos cada hora!
- En 1956 publicaron la primera detección directa de neutrinos.

Por qué es tan difícil observar neutrinos?



Detección de Neutrinos: El problema de los neutrinos solares

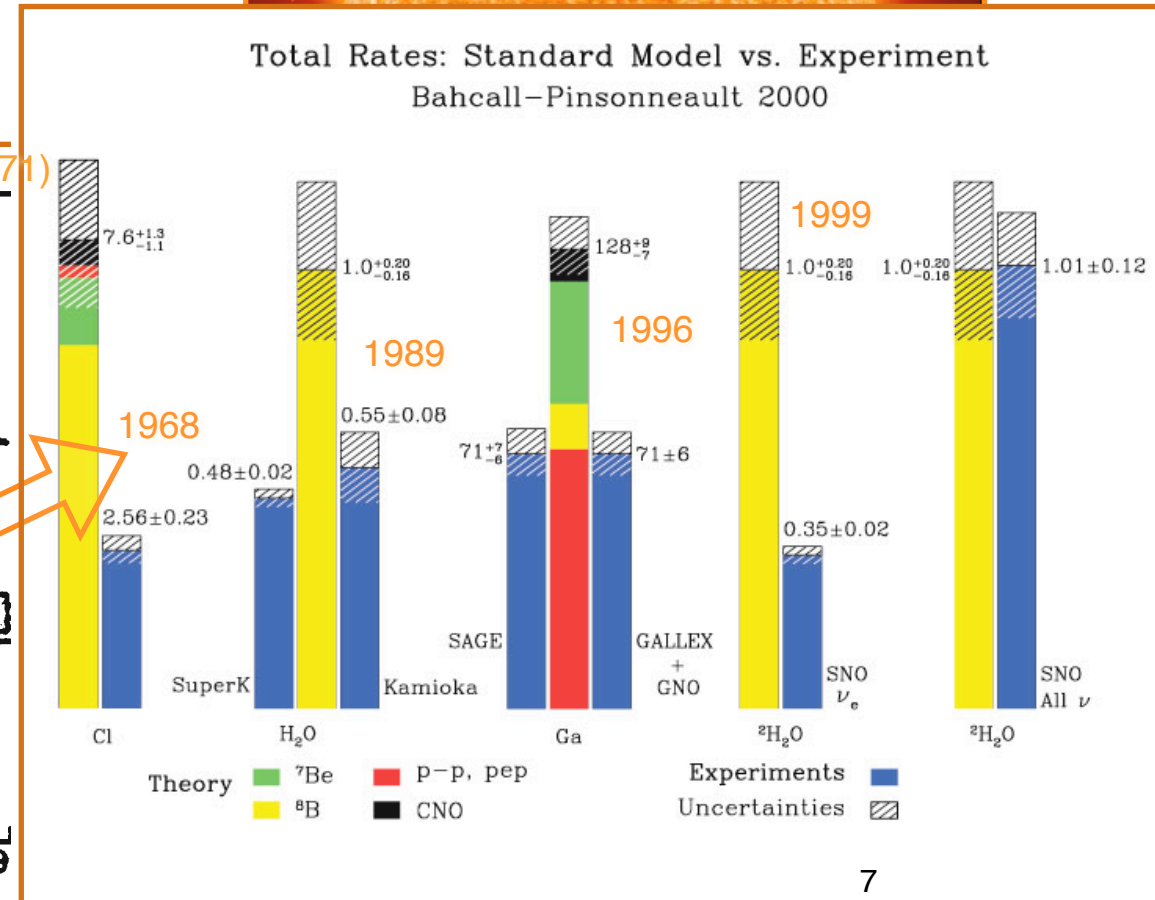
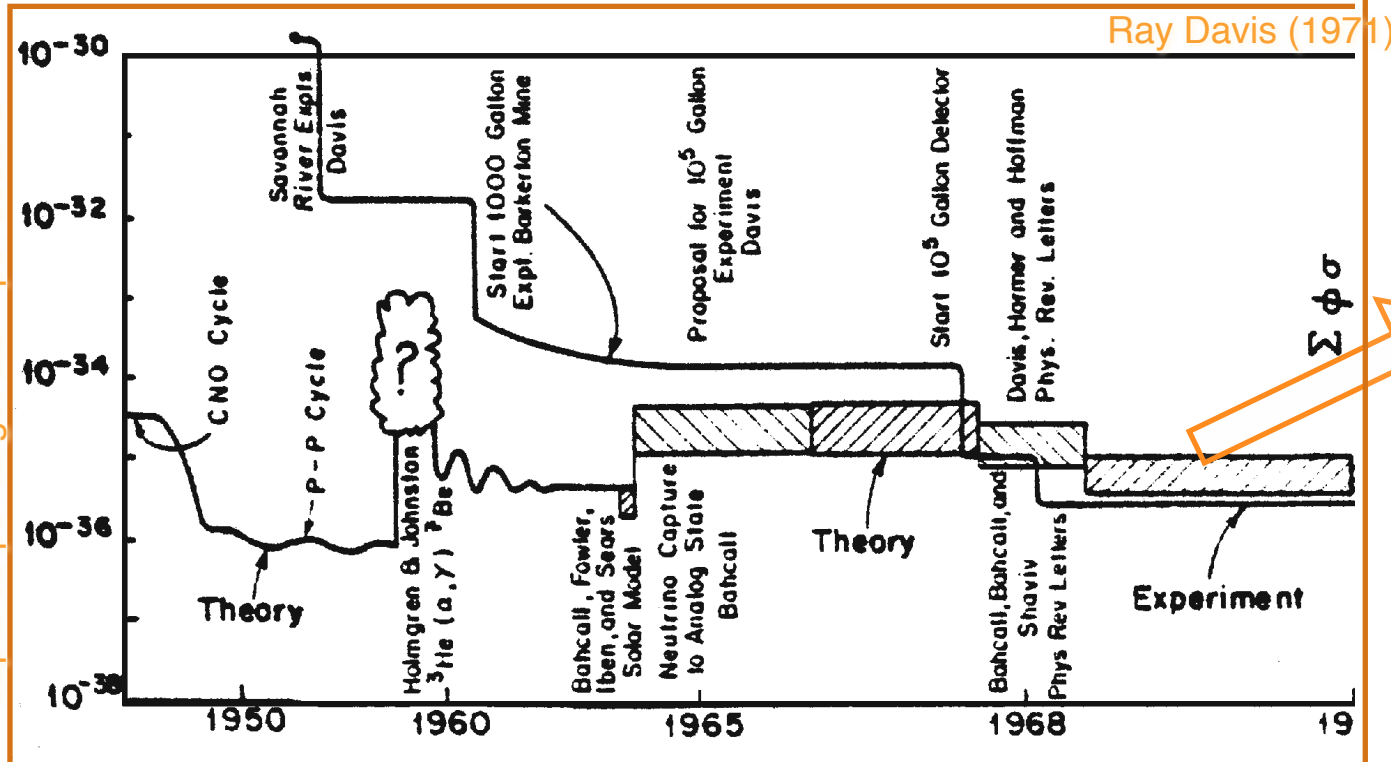
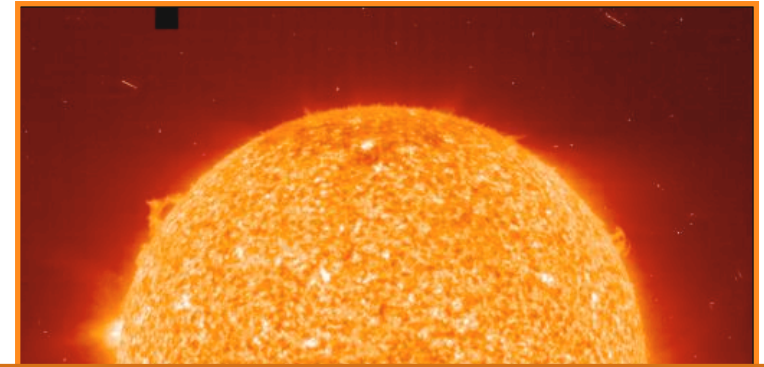
- En la década siguiente Ray Davis y John Bahcall propusieron un detector para observar neutrinos solares.
- En 1968 Davis (Premio Nobel 2002) publica una observación de un deficit de 1/3 de los neutrinos solares.





Detección de Neutrinos: El problema de los neutrinos solares

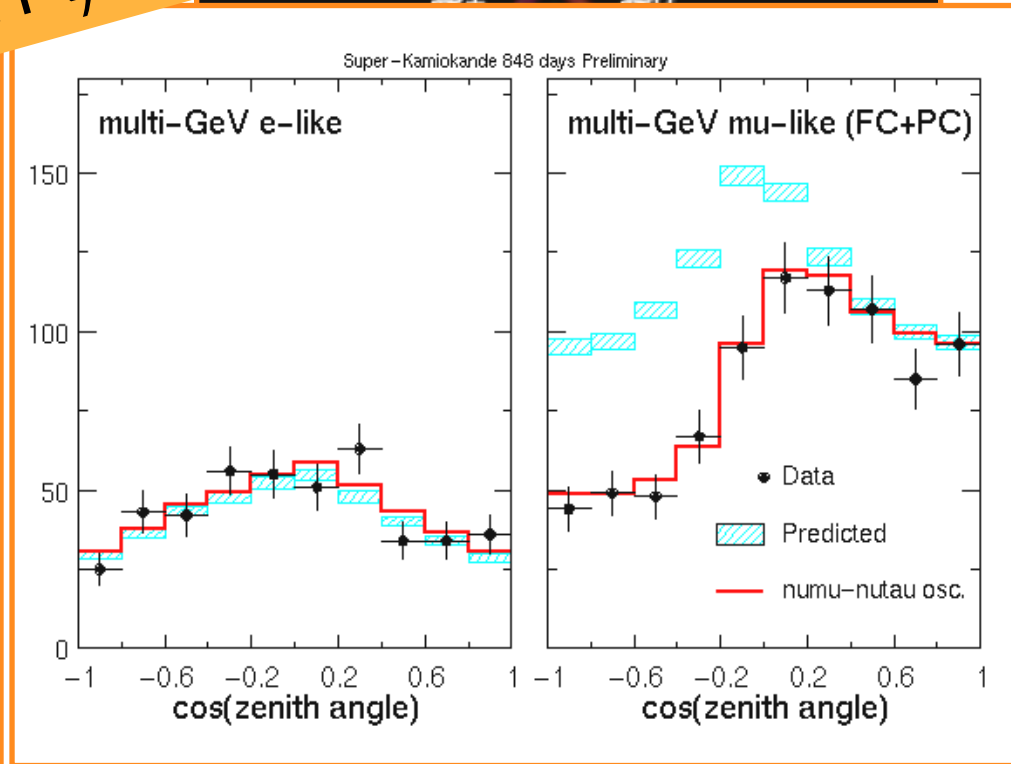
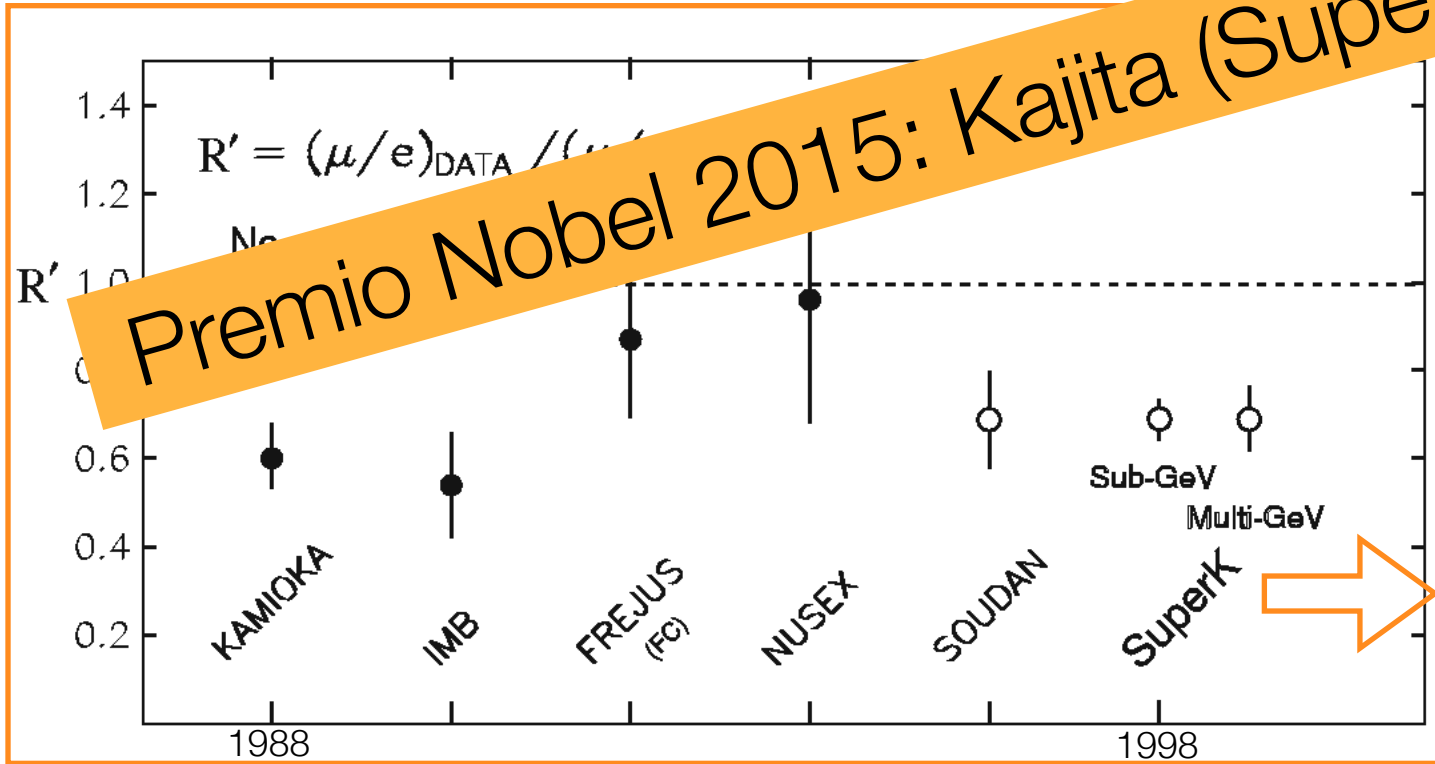
- En la década siguiente Ray Davis y John Bahcall propusieron un detector para observar neutrinos solares.
- En 1989 el experimento Kamiokande confirma el deficit. En 1999 el experimento de SNO confirma el resultado.





Detección de Neutrinos: La anomalía de los neutrinos atmosféricos

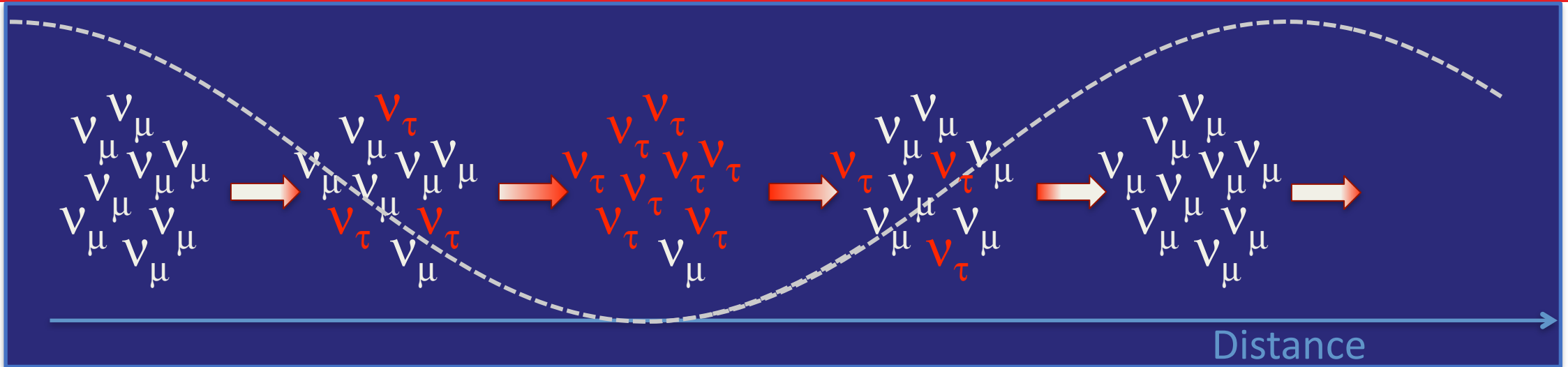
- El deficit de neutrinos atmosféricos fue observado por primera vez por Kamioka e IMB (detectores Cherenkov). Fue una década antes de que se observara con detectores calorimétricos.
- En 1998 SuperKamiokande observa las oscilaciones de neutrinos explicando el deficit.



Premio Nobel 2015: Kajita (SuperK) and McDonald (SNO)



Detección de Neutrinos: Oscilaciones de Neutrinos



- Dado que los auto-estados de sabor son combinaciones lineales de los auto-estados de masa:

$$\begin{pmatrix} \nu_{\mu} \\ \nu_{\tau} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

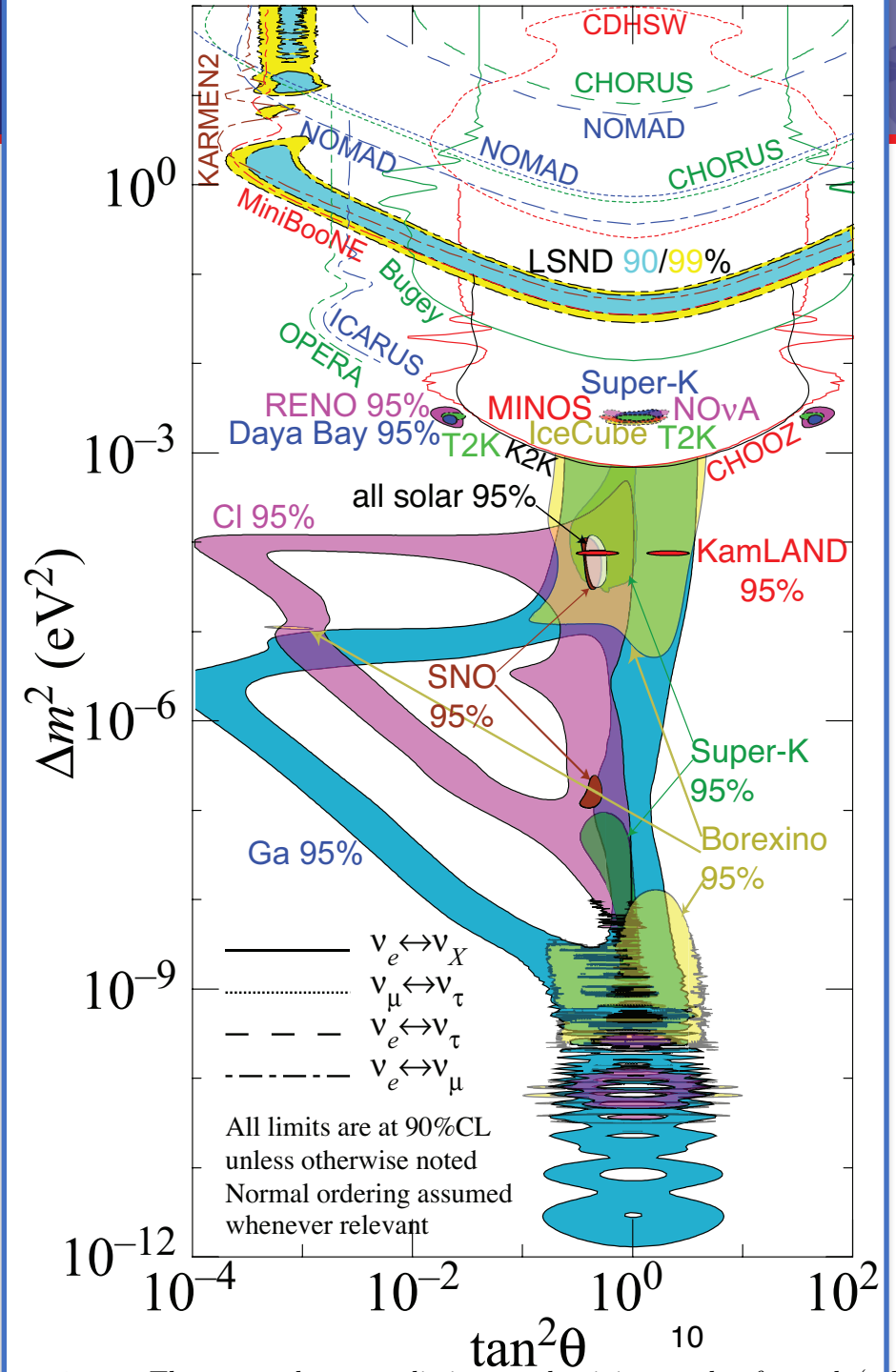
- Hay una probabilidad (diferente de cero) de detectar un sabor de neutrino diferente que el que se produjo en la fuente:

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m_{23}^2 L}{E_{\nu}}\right)$$



Detección de Neutrinos: Hoy

- En las últimas décadas hemos obtenido datos de alta precisión indicando que los neutrinos oscilan con una precisión de tecnologías de detección y fuentes de neutrinos naturales y artificiales.
- Sin embargo, nos quedan muchas cosas por descubrir y medir:
 - Hay violación de CP en el sector léptonico?
 - Es el orden de la jerarquía de la masa de los neutrinos normal o invertida?
 - Es máximo el ángulo de mezcla de los neutrinos muónicos y tauónicos?
 - Se comportan de la misma manera los neutrinos y los antineutrinos?
 - ¿Cuál es la masa de los neutrinos?
 - ¿Son los neutrinos partículas de tipo Majorana?
 - ¿Podemos detectar neutrinos del fondo cósmico?



Principios Básicos





El Reto de los Neutrinos

M. Messier

$$N_{\text{obs}} = \left[\int \mathcal{F}(E_\nu) \sigma(E_\nu, \dots) \epsilon(E_\nu, \dots) dE_\nu d\dots \right] \frac{M}{A m_N} T$$

N_{obs} : number of neutrino events recorded

\mathcal{F} : Flux of neutrinos (#/cm²/s)

σ : neutrino cross section per nucleon $\simeq 0.7 \frac{E_\nu}{[\text{GeV}]} \times 10^{-38} \text{cm}^2$

ϵ : detection efficiency

M : total detector mass

A : effective atomic number of detector

m_N : nucleon mass

T : exposure time

typical "super-beam" flux at 1000 km

typical accelerator up time in one year

$$N_{\text{obs}} = \left[\frac{1}{\text{cm}^2 \text{s}} \right] \left[0.7 \times 10^{-38} \frac{E_\nu}{\text{GeV}} \text{cm}^2 \right] [\epsilon] [1 \text{ GeV}] \left[\frac{M}{20 \cdot 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}} \right] [2 \times 10^7 \text{ s}]$$

$$N_{\text{obs}} = 4 \times 10^{-6} \frac{E_\nu}{[\text{GeV}]} \epsilon \frac{M}{\text{kg}}$$

need detector masses of 10⁶ kg = 1 kton to get in the game

Challenge to the experimentalist: maximize efficiency and detector mass while minimizing cost

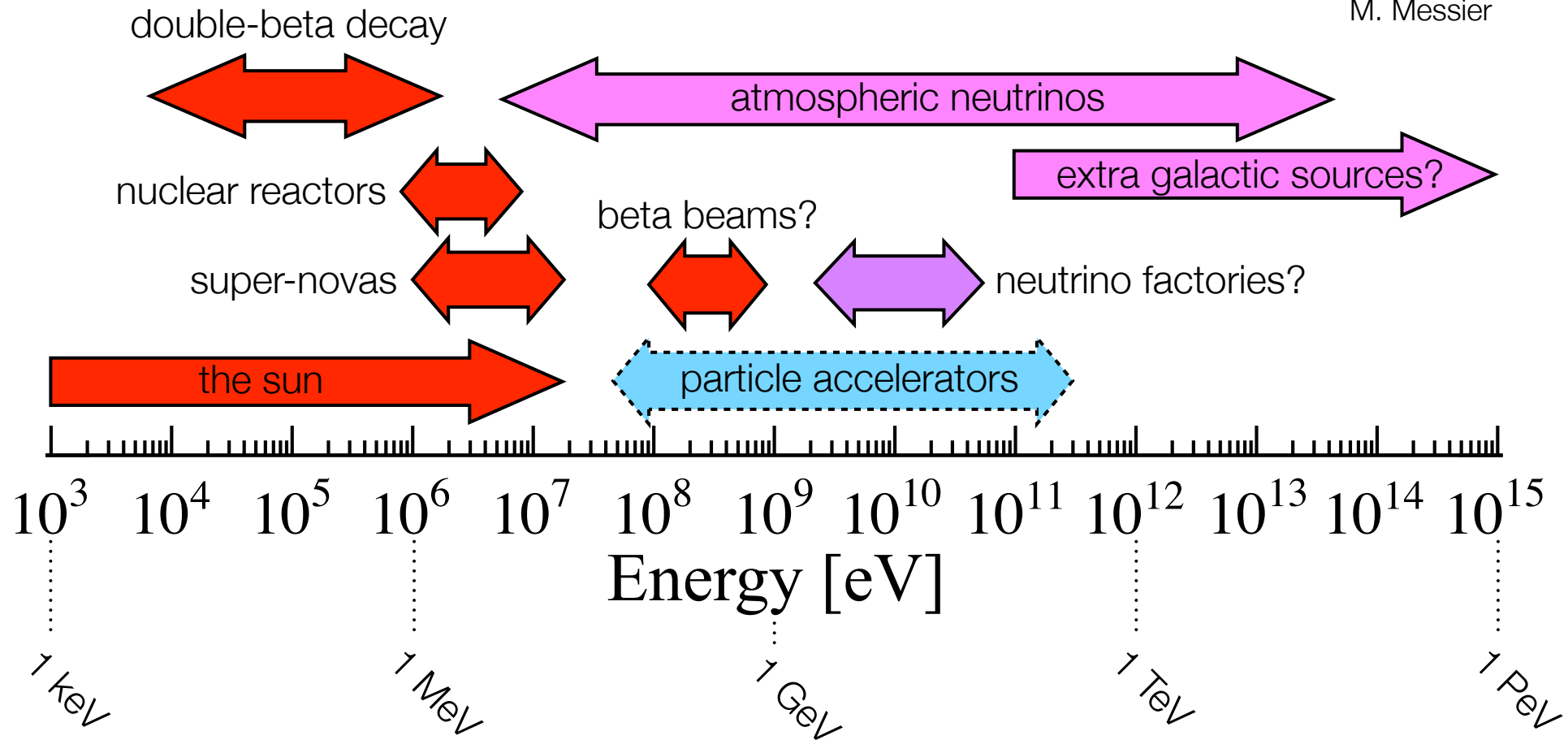
work at high energies if you can

push this as high as you can



Fuentes de Neutrinos y Rangos de Energia

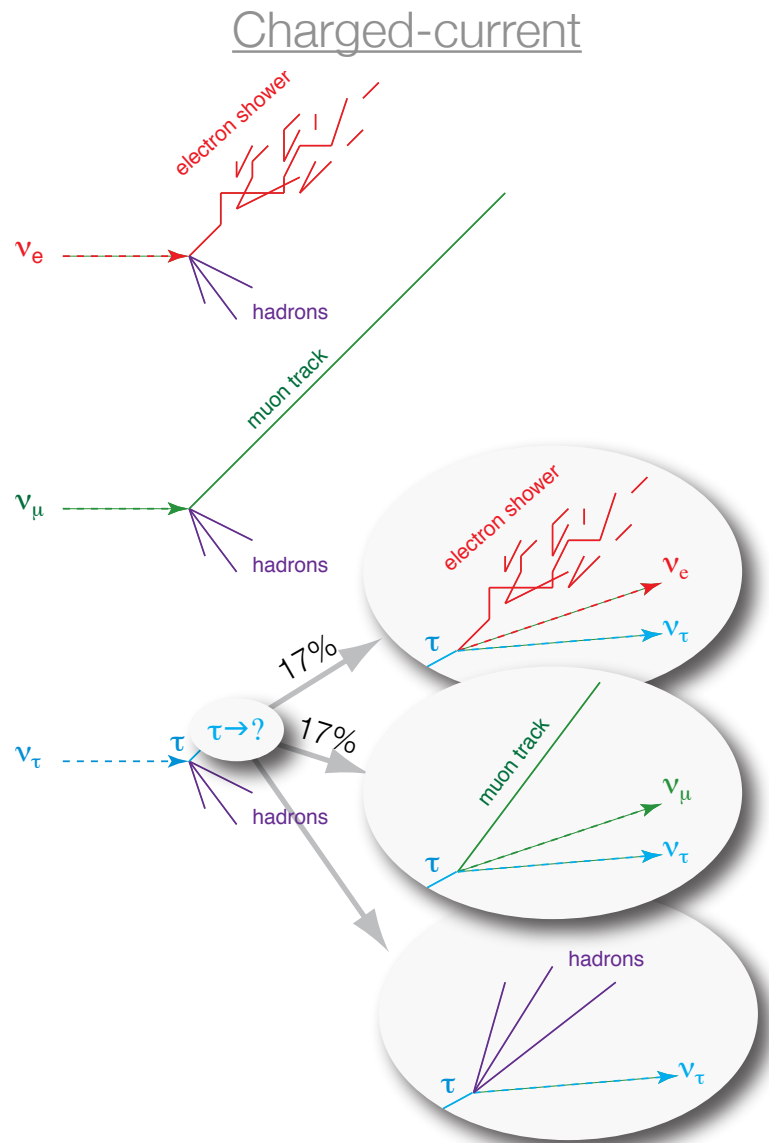
M. Messier



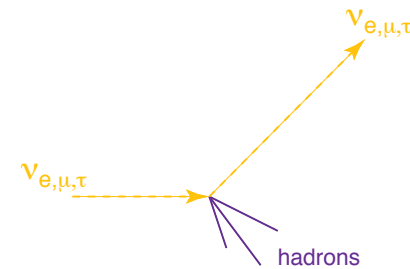
- primaria- ν_e o $\text{anti-}\nu_e$
 - mente ν_μ o $\text{anti-}\nu_\mu$
 - mezcla $\nu_e + \nu_\mu$
- } en la fuente



Canales de Detección de Neutrinos



Neutral-current

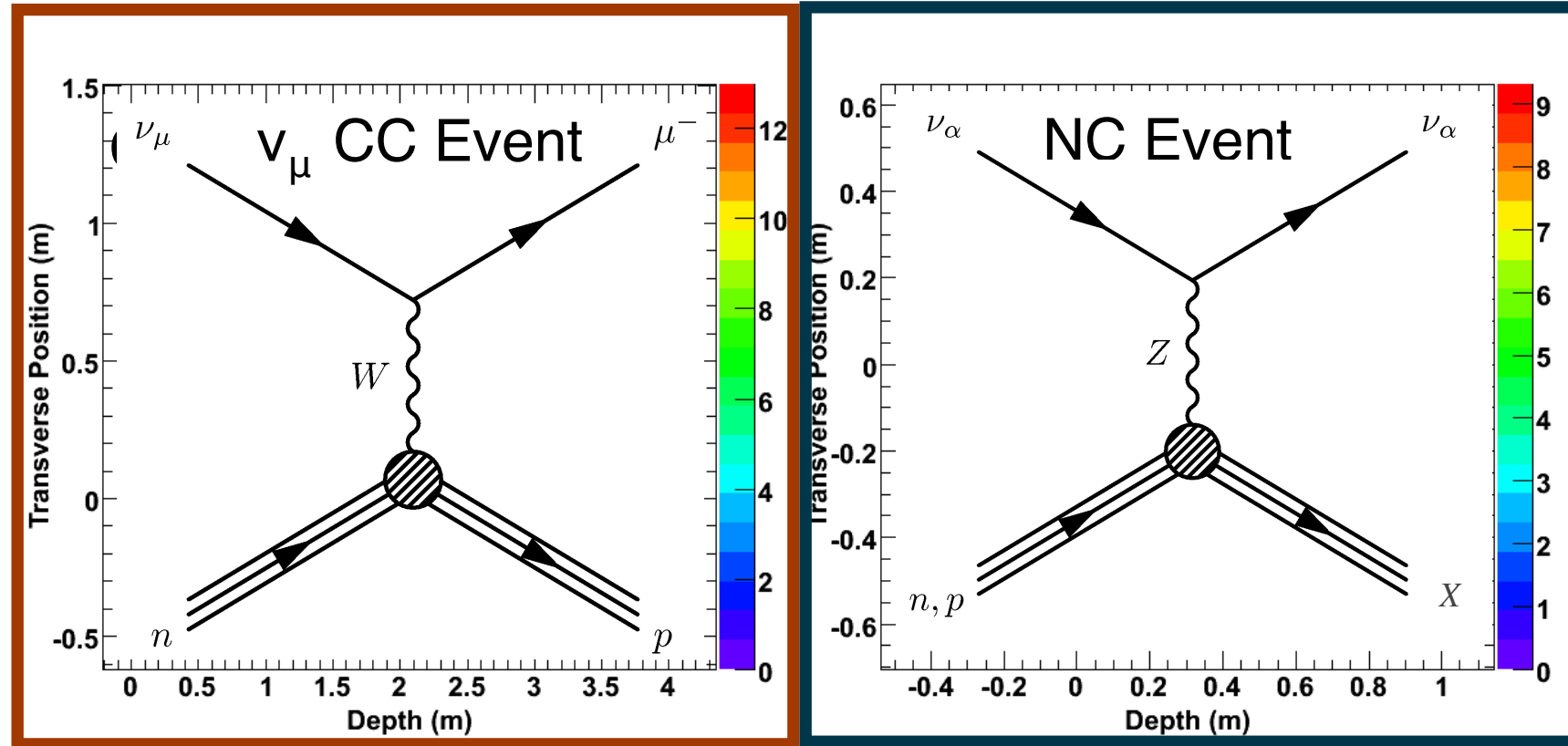


- Los eventos de corriente cargada (CC) nos permiten observar el sabor del lepton saliente, revelando el sabor del neutrino.
 - En el caso de los leptones tau, siendo un partícula inestable, debemos deducir su existencia a partir de su interacción.
- Los eventos de corriente neutra (NC) el sabor del neutrino original no se conoce pues es un neutrino el lepton saliente. La energía depositada en el detector es de tipo hadronico.

Cuál es el boson de intercambio en cada caso?



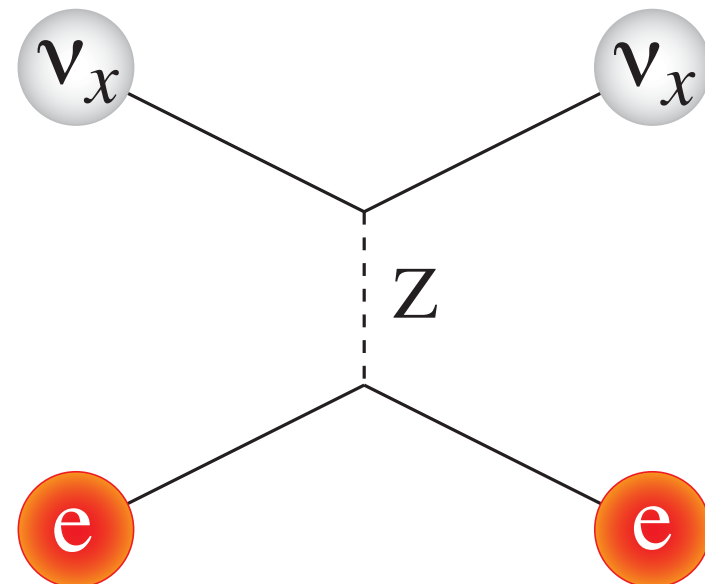
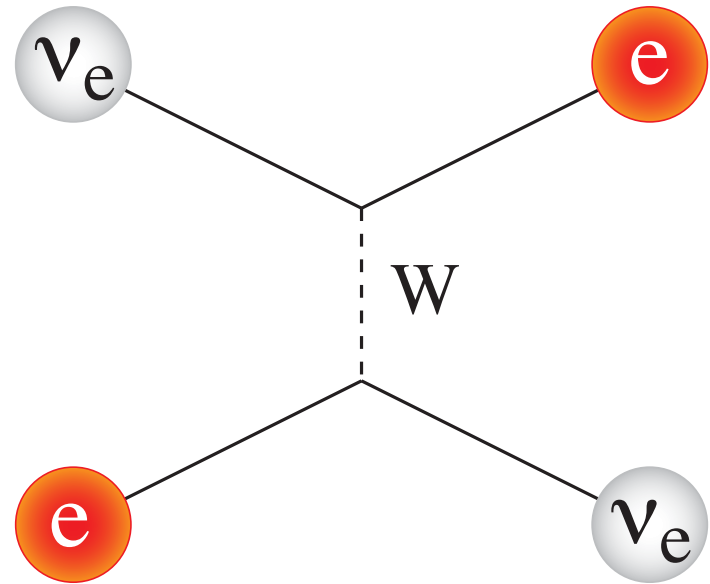
Canales de Detección de Neutrinos



- En los eventos de corriente cargada (CC) casi toda la energía es depositada en el detector y por tanto esa es una buena medida de la energía del neutrino original.
- Los eventos de corriente neutra (NC) depositan energía en el detector, pero el lepton saliente es el neutrino que se lleva algo de la energía. Por tanto la energía es igual o más pequeña que la del neutrino original.



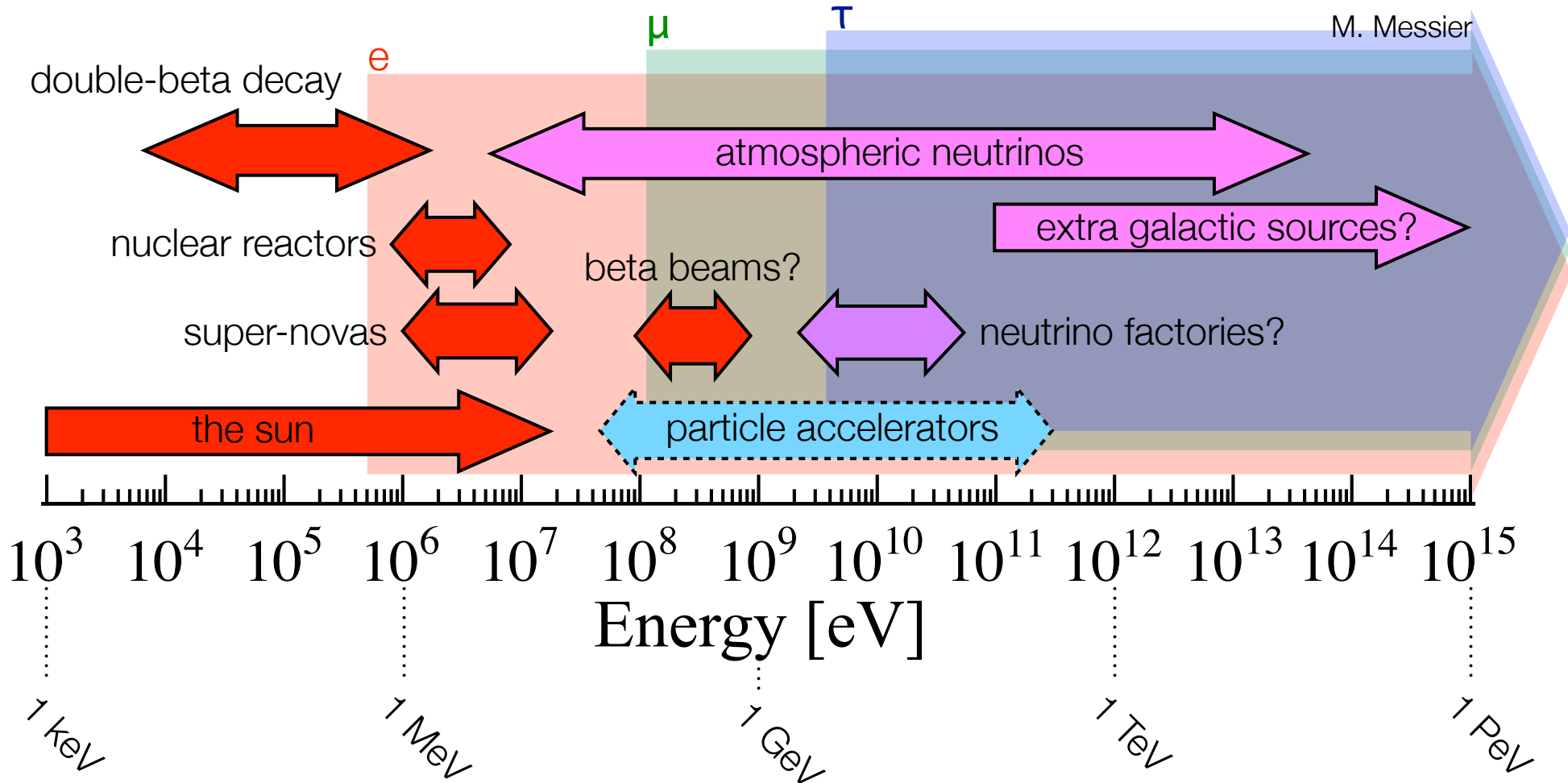
Canales de Detección de Neutrinos



- La sección eficaz para nucleones dentro del núcleo desaparece por debajo de ~ 200 MeV. A bajas energías debemos usar material con nucleones libres (ej. D₂O) o usar dispersión elástica.
- Para esta interacción el radio de CC and NC es $1/6$, el electron sale en la dirección hacia adelante y la energía del electron es entre 0 y la energía del neutrino original.



Fuentes de Neutrinos y Rangos de Energia



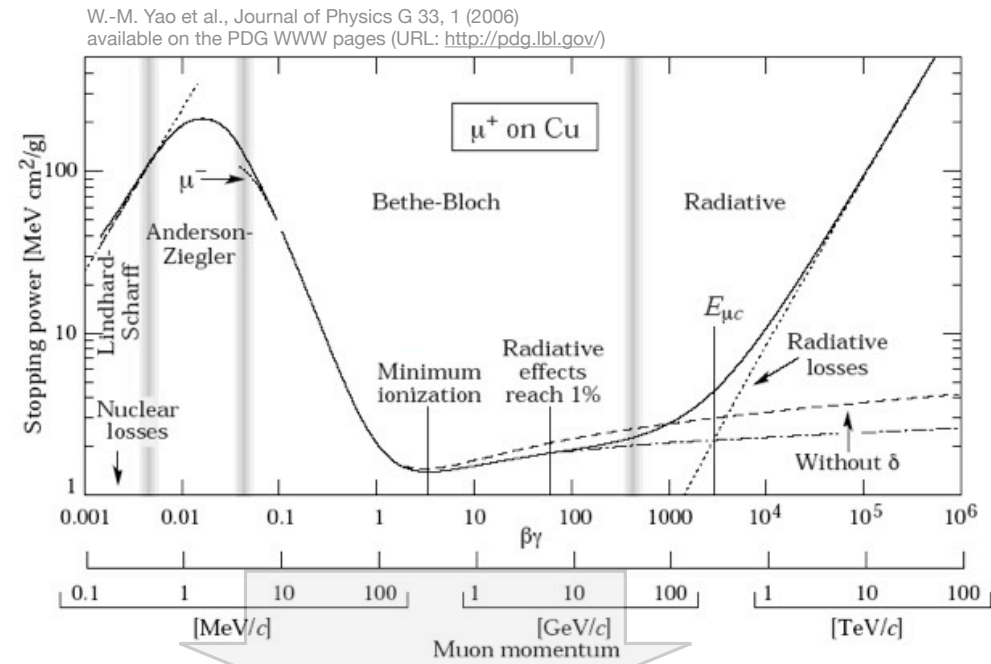
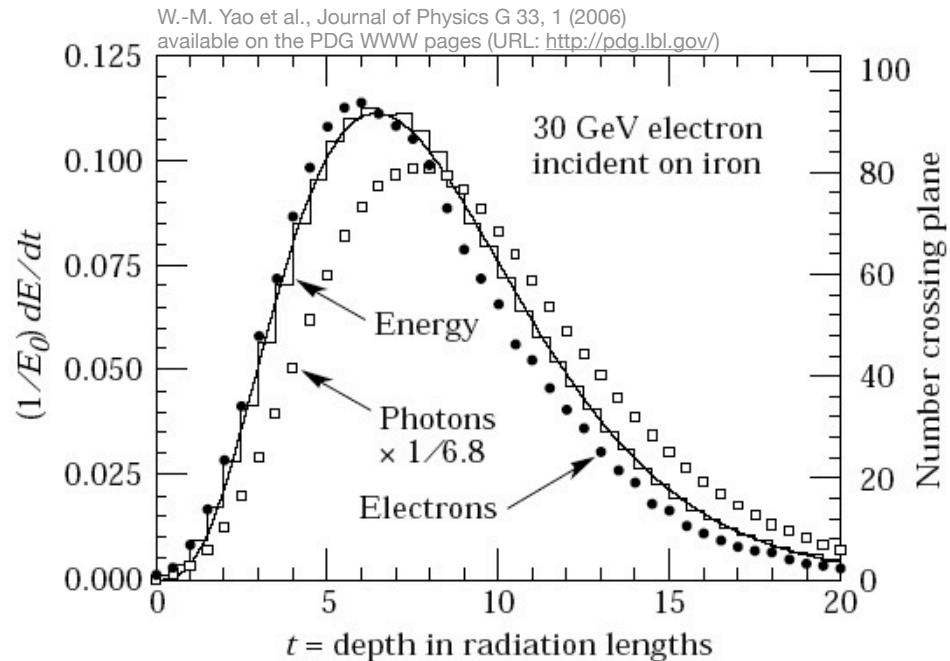
Considerando el umbral de producción de los leptones:

$l = e$	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	$P_{\text{thresh}} = 0.511 \text{ MeV}$
$l = \mu$	$m_\mu = 106 \text{ MeV}$	$P_{\text{thresh}} = 112 \text{ MeV}$
$l = \tau$	$m_\tau = 1.78 \text{ GeV}$	$P_{\text{thresh}} = 3.47 \text{ GeV}$



Identificación de Neutrinos

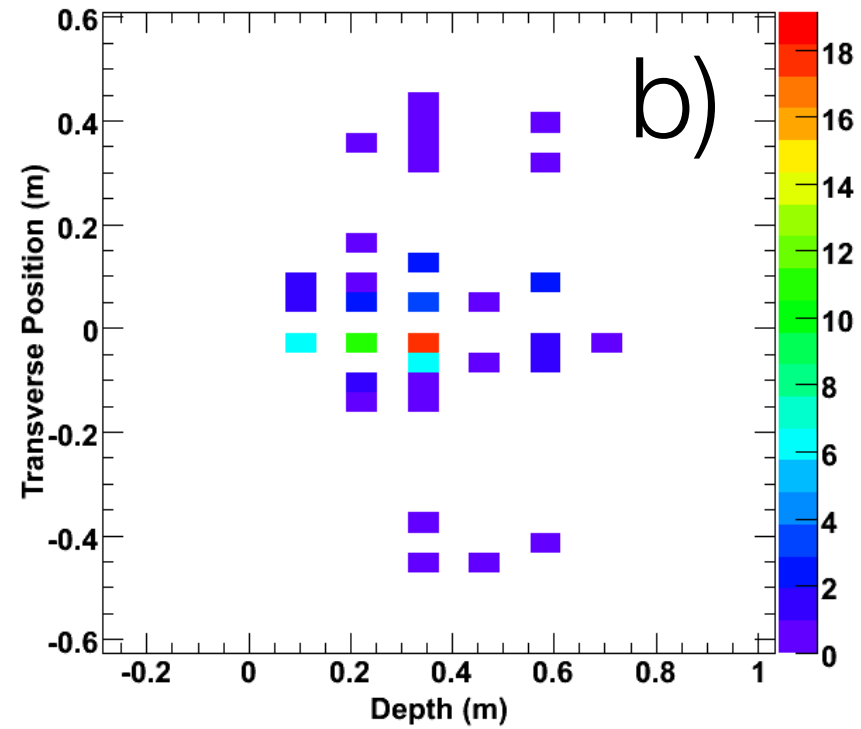
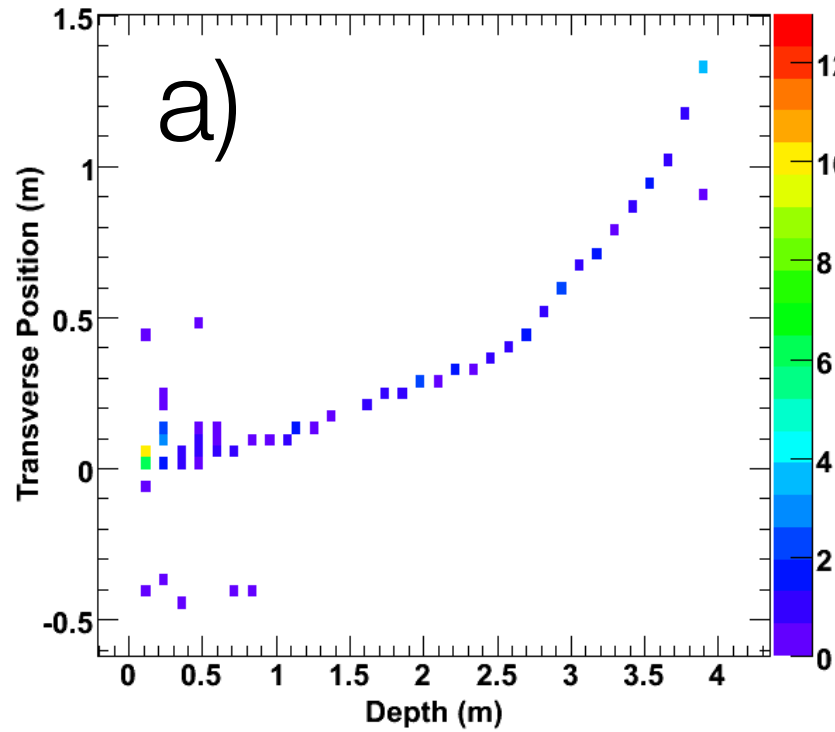
- Los eventos de corriente cargada (CC) nos permiten observar el sabor del lepton saliente, revelando el sabor del neutrino.
 - Queremos poder identificar el lepton saliente: electron, muon o tau.
 - Todo lo aprendido hasta ahora sobre cómo detectar partículas cargadas es igualmente relevante para detectar neutrinos.



Como distinguimos entre un electron y un muon?



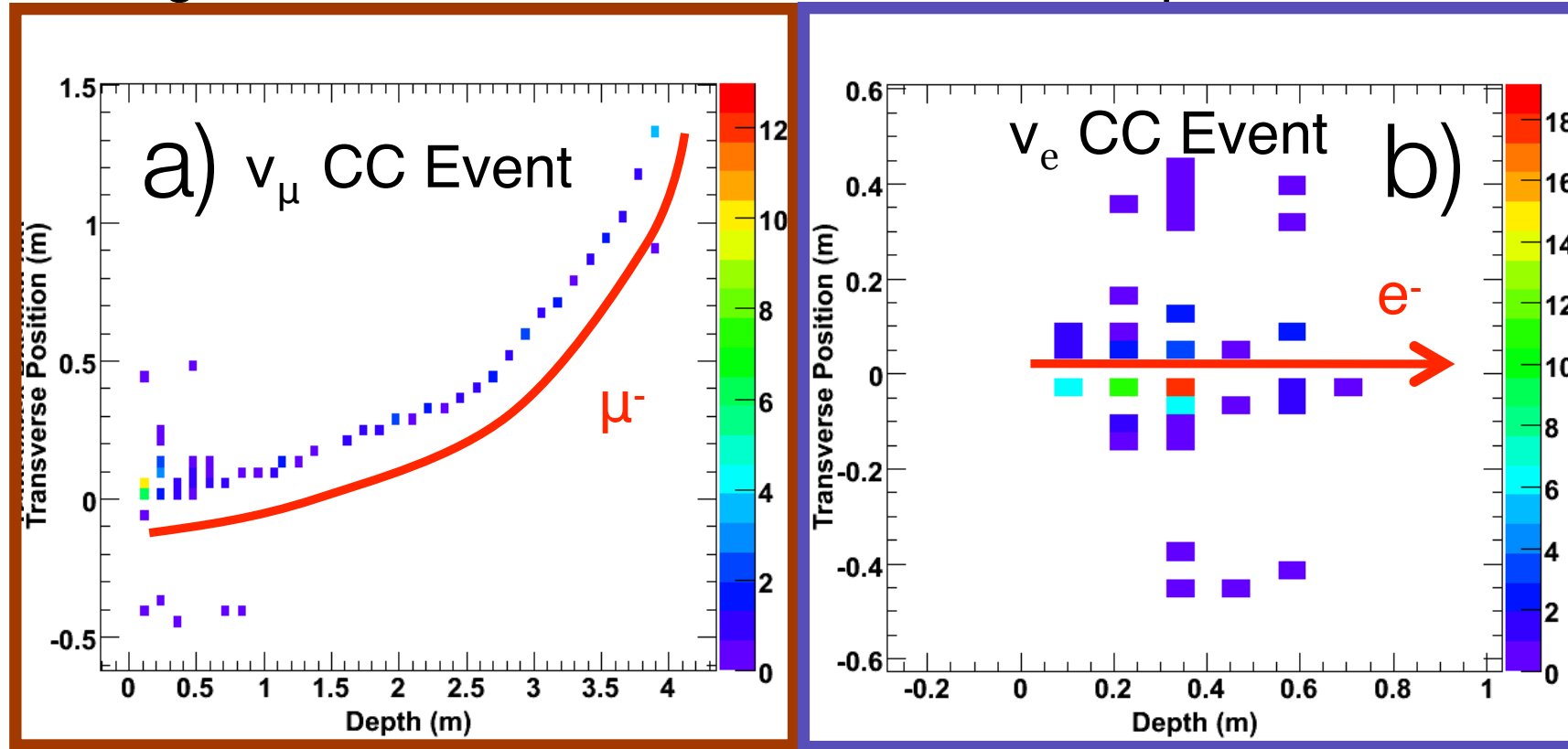
Puedes distinguir el sabor de cada neutrino en el experimento de MINOS?





Identificación de Neutrinos

Puedes distinguir el sabor de cada neutrino en el experimento de MINOS?



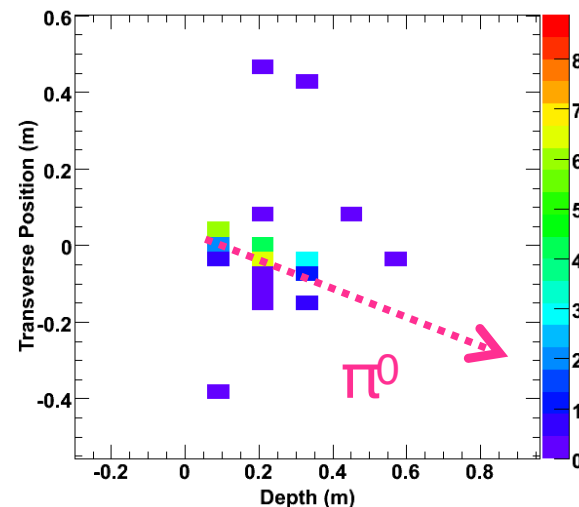
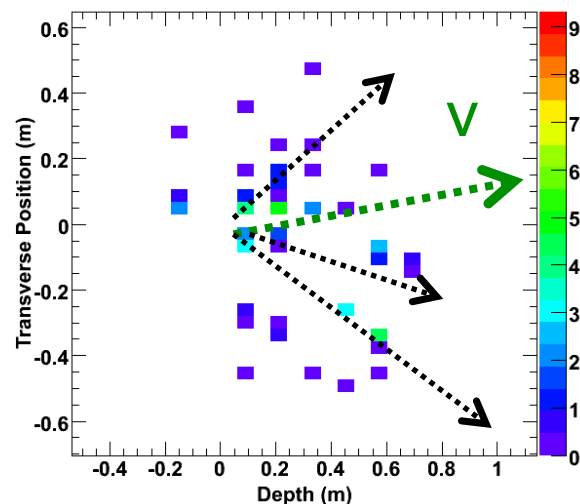
MINOS es un detector calorimétrico hecho de acero y centelleador. Nota la diferencia de escala entre las dos interacciones.

Cómo sería un neutrino tau en este detector?



Identificación de Neutrinos

- Si la señal son neutrinos con interacciones de corriente cargada, el fondo (background) pueden ser una variedad de interacciones.
 - Los electrones son cascadas electromagnéticas que se pueden confundir con fotones o con piones neutrales (con uno de los fotones).
 - Los muones son trazas largas que se pueden confundir con largos piones.
- En cada caso una interacción de corriente neutral se estaría haciendo pasar por una de corriente cargada.

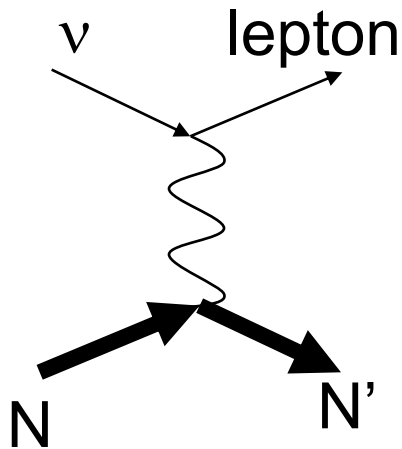




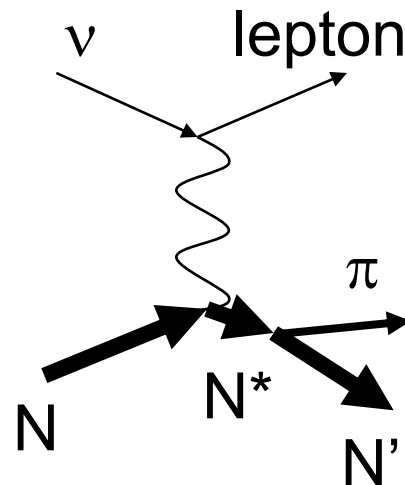
Tipos de interacciones

- Una ultima complicación, dependiendo de la energía los neutrinos interactúan de manera diferente con los nucleos/nucleones.
- Hay interacciones de tipo quasi-elastico, resonancia y inelastico profundo.

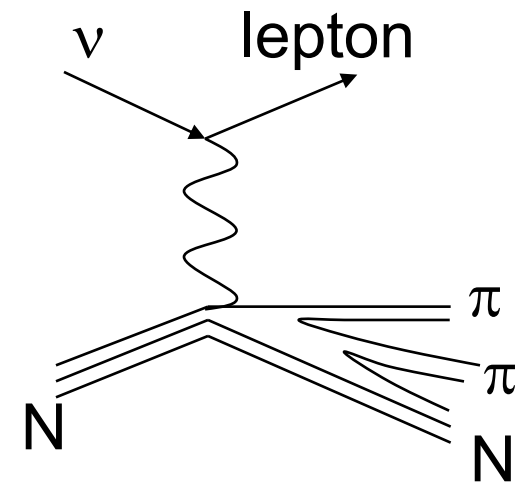
Quasi-elastic



1π production



Deep inelastic



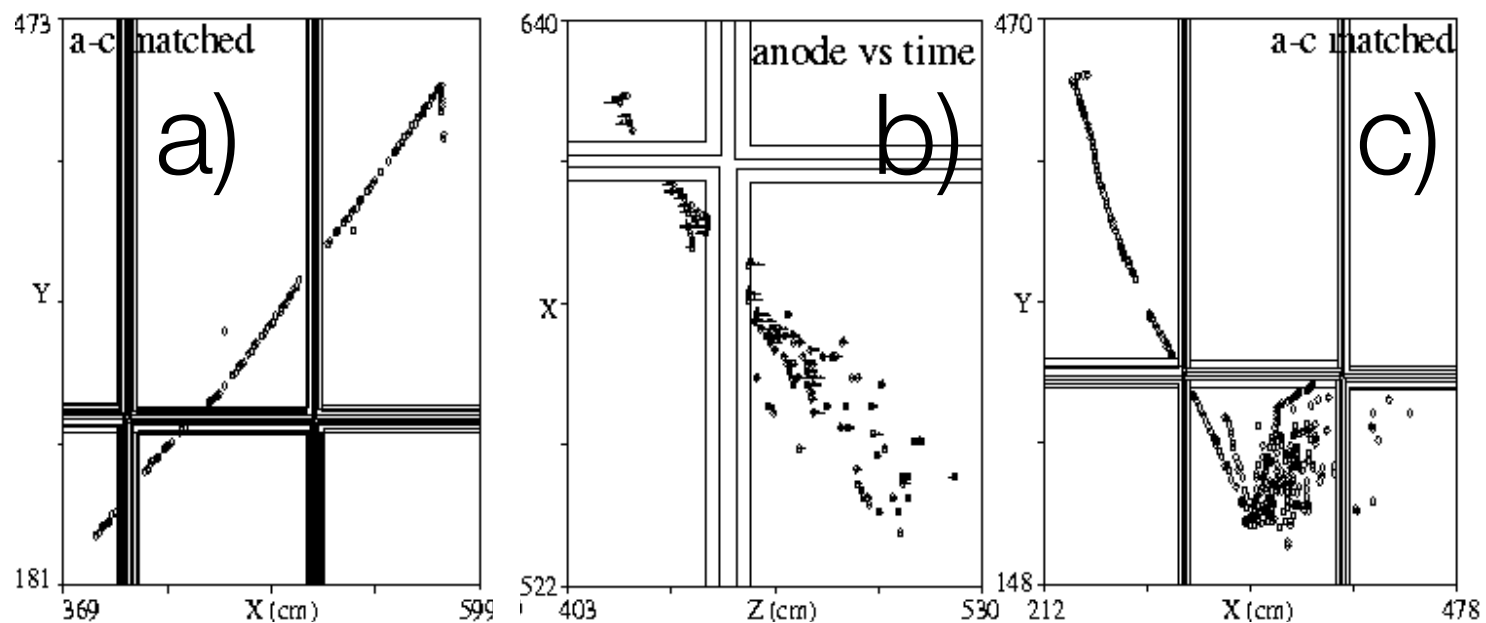
- Los hadrones resultantes y la cinemática de la interacción son diferentes en cada caso.

En qué nos pueden impactar estas diferencias?



Tipos de Interacciones de Neutrinos

- Una ultima complicación, dependiendo de la energía los neutrinos interactúan de manera diferente con los nucleos/nucleones.
- Hay interacciones de tipo quasi-elastico, resonancia y inelastico profundo.



Qué tipo de interacciones tenemos en el experimento de Soudan-2?

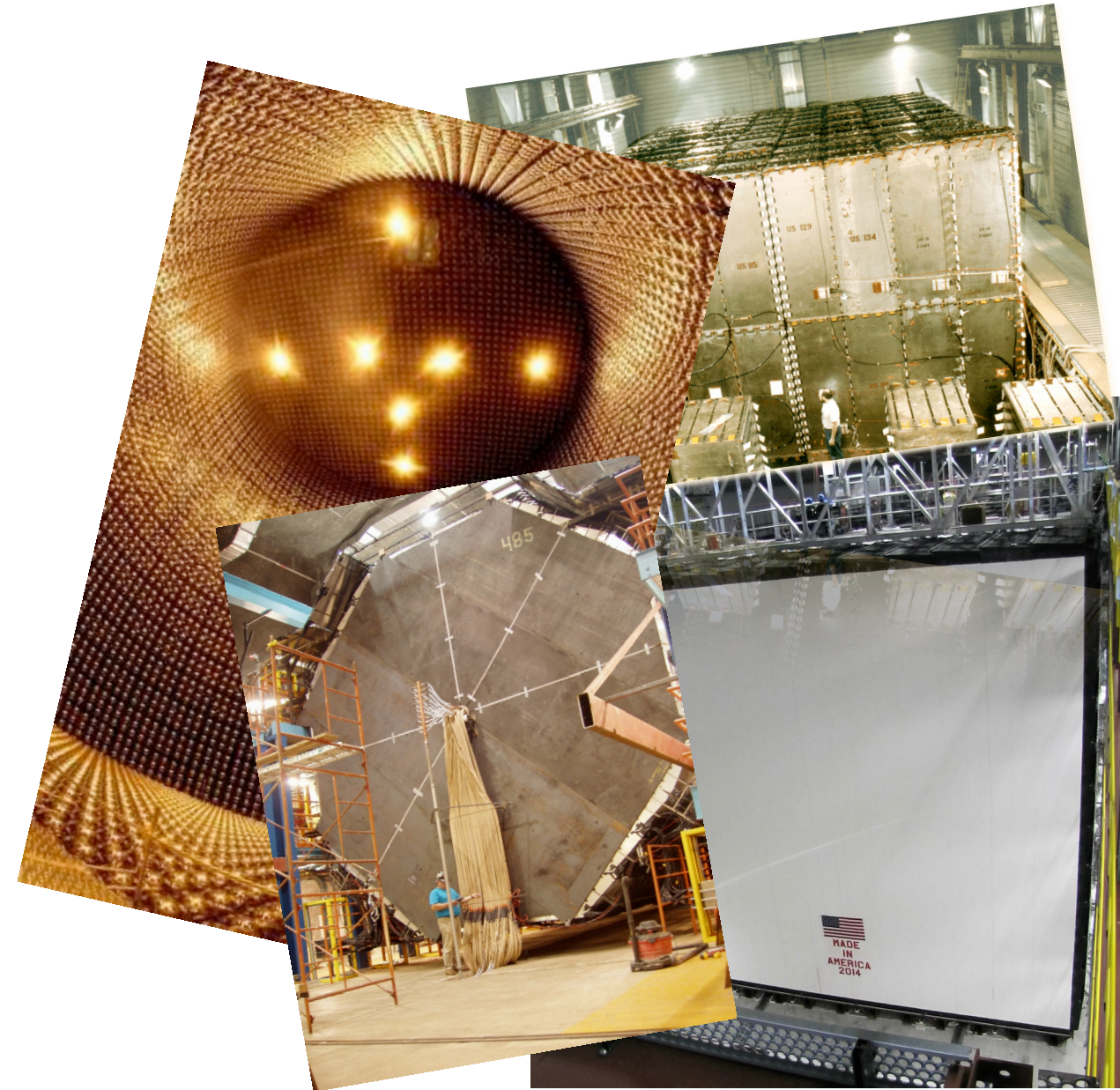
Técnicas de Detección





Tecnologías de detección de Neutrinos

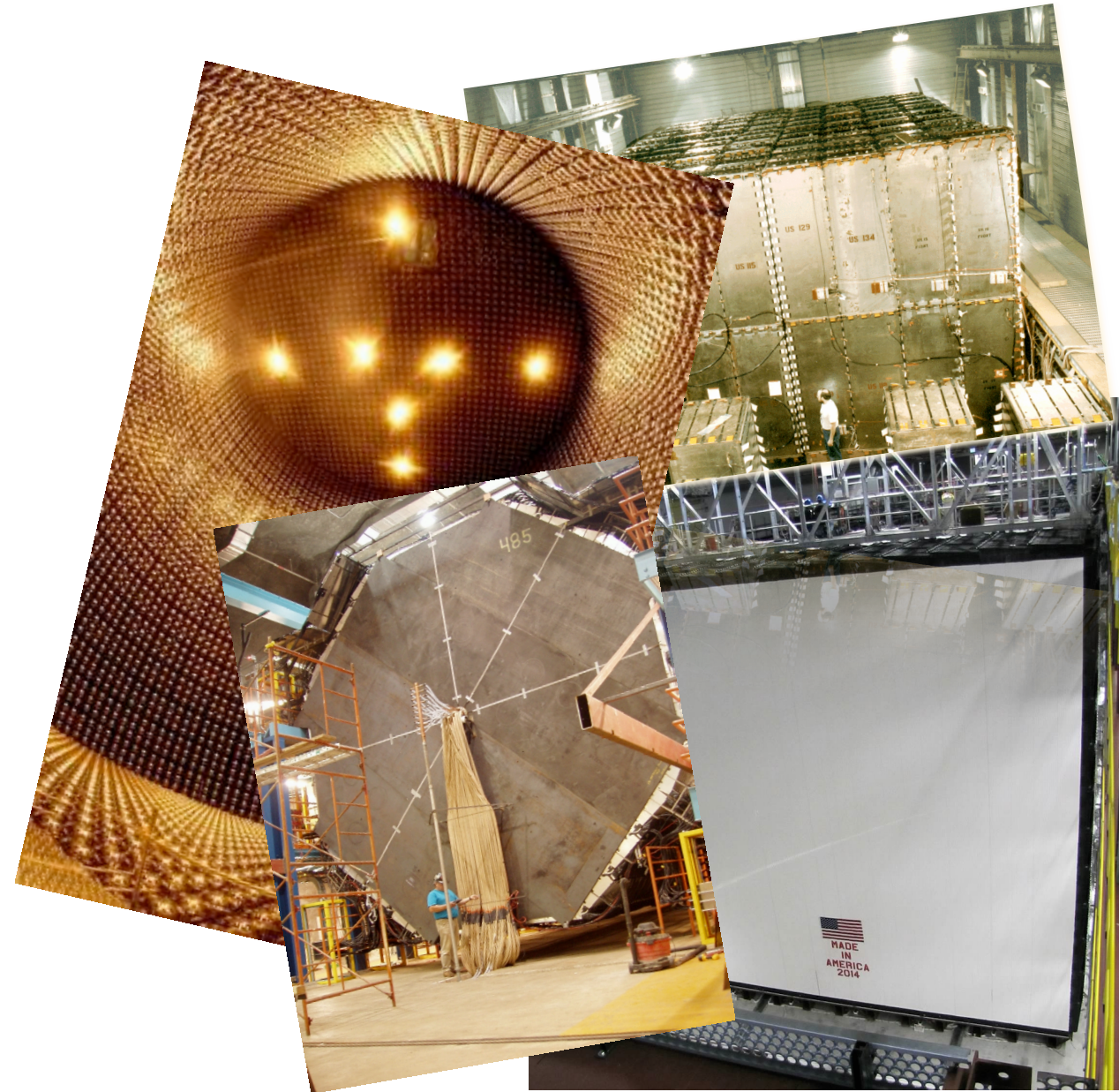
- Los detectores de neutrinos tienen que ser grandes para maximizar el número de interacciones.
- Son también homogéneos. No hay un sitio donde las partículas deban interactuar (punto de entrada o de cruce).
- El objetivo es que el neutrino tenga oportunidad de interactuar con el material y que las partículas salientes queden contenidas dentro del detector.





Tecnologías de detección de Neutrinos

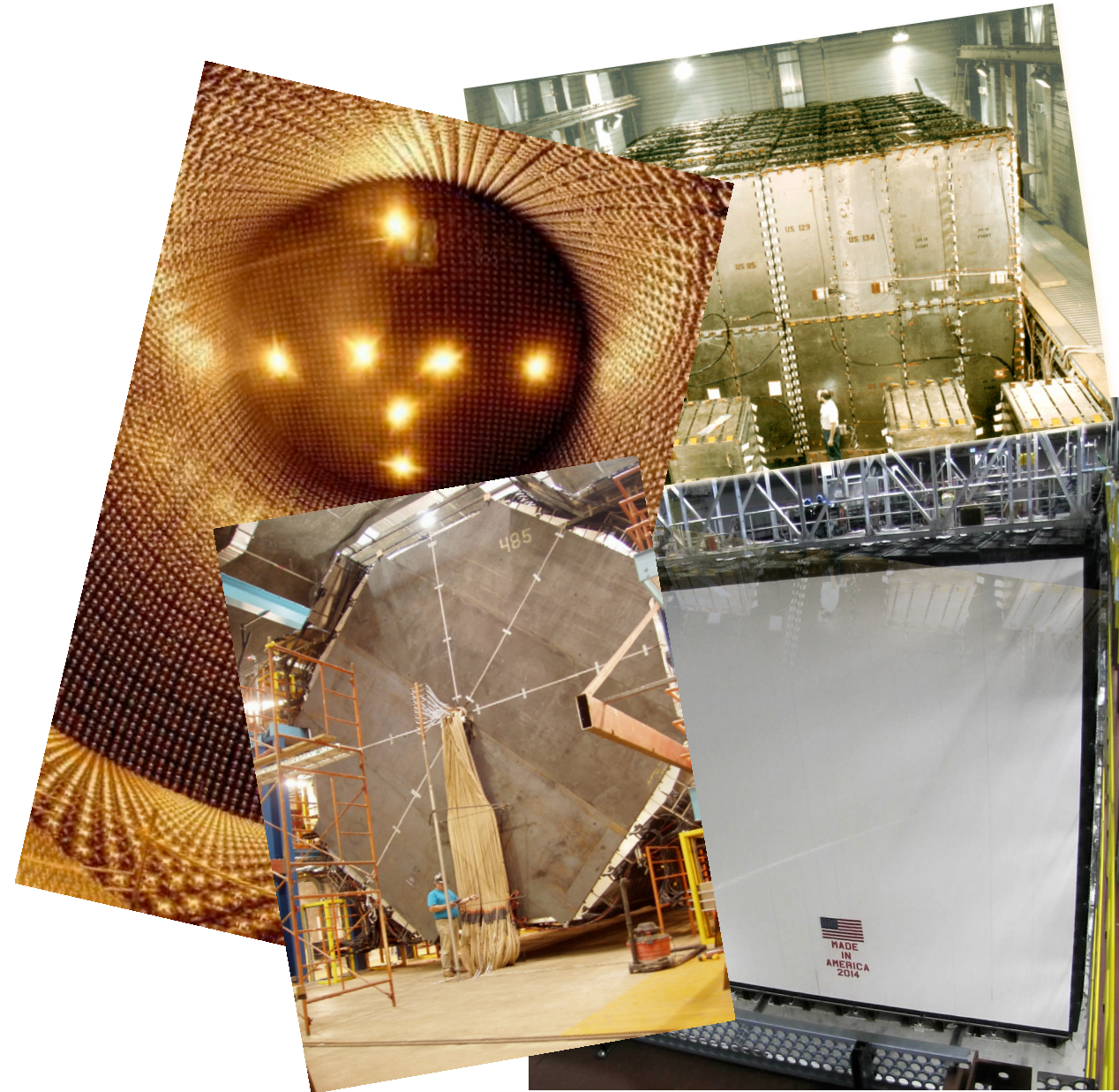
- Hay dos configuraciones:
 - Segmentada. El volumen del detector esta instrumentado en pequeñas secciones. El material de interacción puede ser o no ser el elemento activo del detector.
 - No-segmentada. El volumen del detector esta instrumentado como un todo y el material de interacción es el mismo que elemento activo del detector.
- La segmentación ayuda a distinguir actividad de más de una fuente.





Tecnologías de detección de Neutrinos

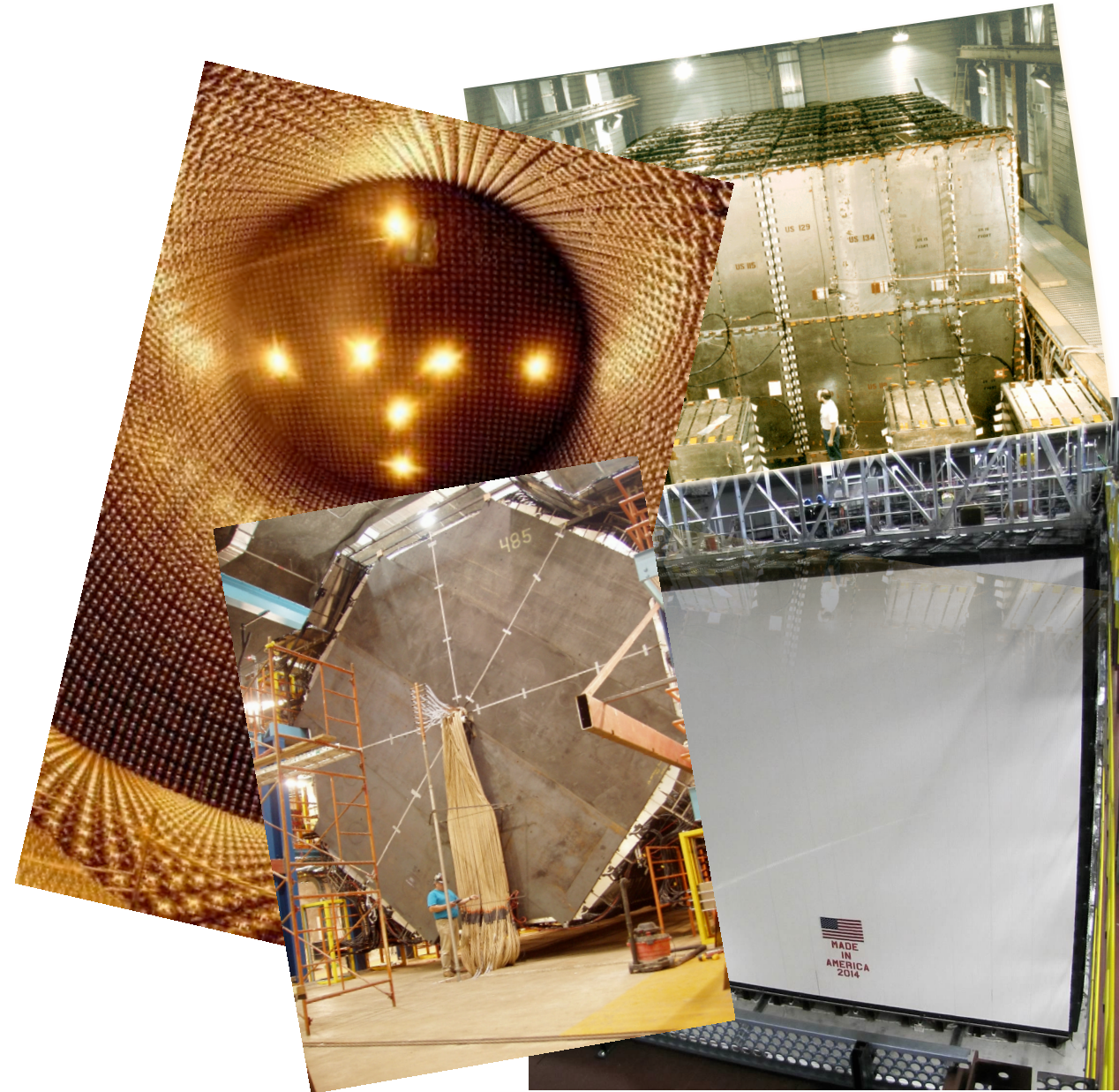
- Calorímetros - segmentados:
 - **MINOS, MINERvA, NOvA, OPERA,** SciBooNE, T2K Near, INO, MIND, etc.
- Cherenkov - no-segmentados:
 - IMB, Kamiokande, **Super-Kamiokande**, SNO, **IceCube**, **ANNIE**, etc.
- Liquid scintillator - no-segmentados:
 - Poltergeist, **KamLAND**, MiniBOONE, **Double Chooz**, Daya Bay, JUNO, Theia, etc.
- Camaras de proyección temporal:
 - Icarus, ArgoNeut, **MicroBOONE**, **DUNE**





Tecnologías de detección de Neutrinos

- La fuente de los neutrinos y configuración del detector determina la necesidad de blindaje.
- Rayos cósmicos inciden a una rata de ~ 200 Hz/m² en la superficie.
- Para una fuente de pulso o un detector segmentado esto puede estar bien.
- Para el caso opuesto es mejor estar a una cierta profundidad bajo tierra.



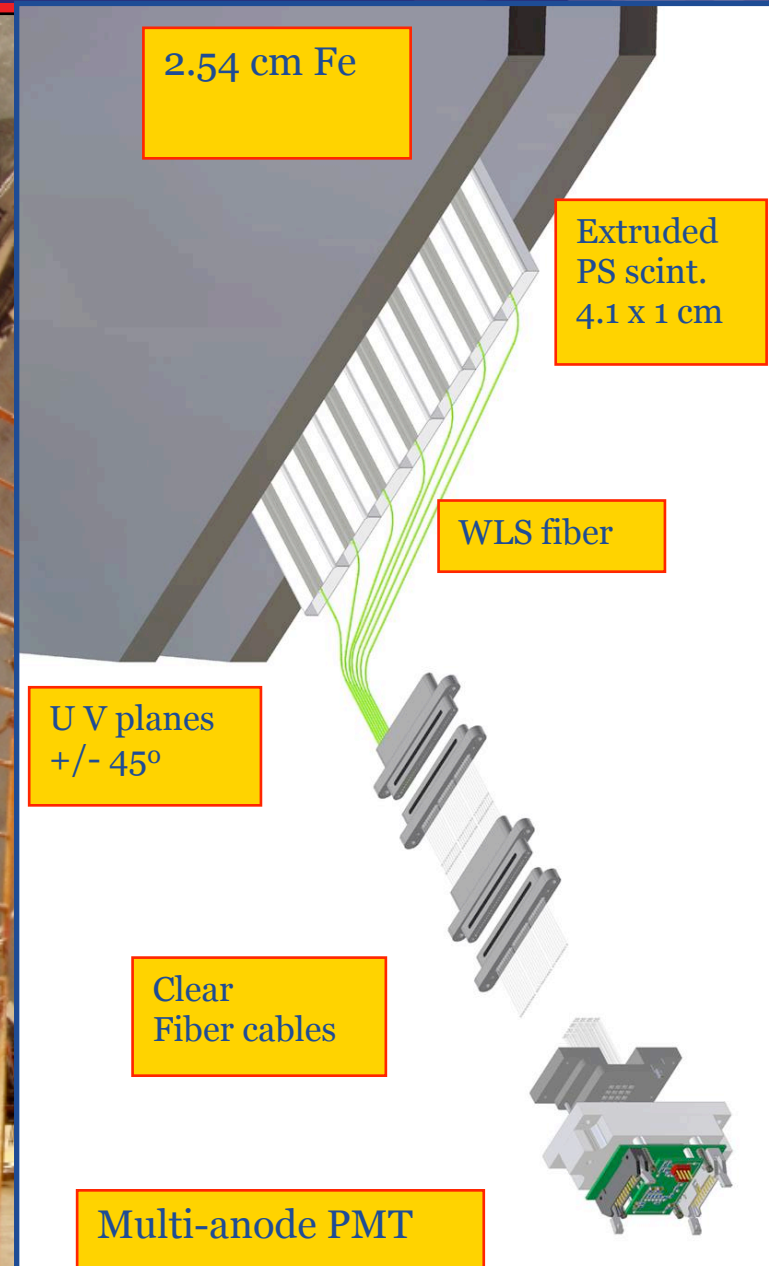
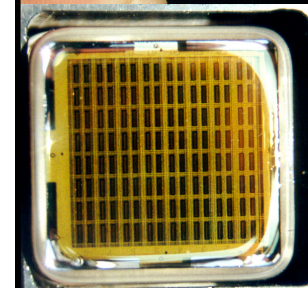
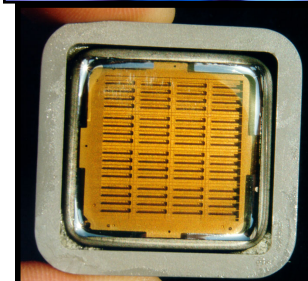
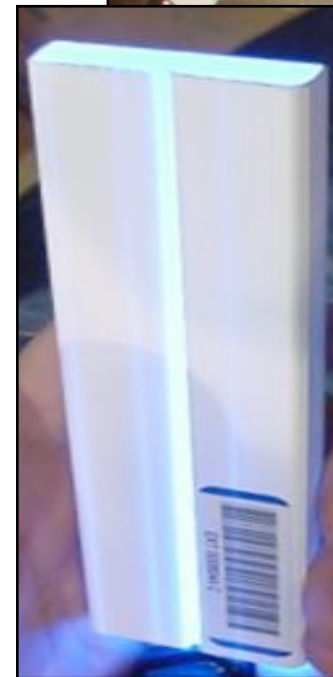


- Los calorímetros han sido muy exitosos en hacer mediciones precisas de los parámetros de oscilaciones de neutrinos.
 - En particular MINOS (~5kt) y NOvA (14kt) que usan el haz de neutrinos NuMI producido en Fermilab.
 - Se han usado para ver neutrinos tau en OPERA.
- También se han usado para observar altas intensidades de interacciones de neutrinos.
 - MINERvA en Fermilab y el detector cercano de T2K en Japón usan este método. Notese que estos detectores no son completamente homogéneos.
- Históricamente también se han usado para detectar neutrinos atmosféricos.
 - Soudan-2 (~1kt) es un ejemplo de esto. En el futuro se podría construir un calorímetro de 50kt en la India.
- Estos detectores se pueden magnetizar para distinguir particular cargadas.



Calorímetros de trazado: MINOS

- MINOS fue diseñado para observar la desaparición de neutrinos muónicos.
- Calorímetro “sandwich”: planos de acero de 2.5 cm y planos de centelleador sólido en barras. Cada barra es extruida y una fibra óptica lleva la luz a fotomultiplicadores de múltiples ánodos.
- Los planos de centellado alternan a 90 grados para localizar las trazas.
- La masa es de 5.4 kilotones, con medidas de 8 x 8 x 30 m.
- El detector es magnetizado con un campo de 1.2 T con una corriente de 15.2 kA.

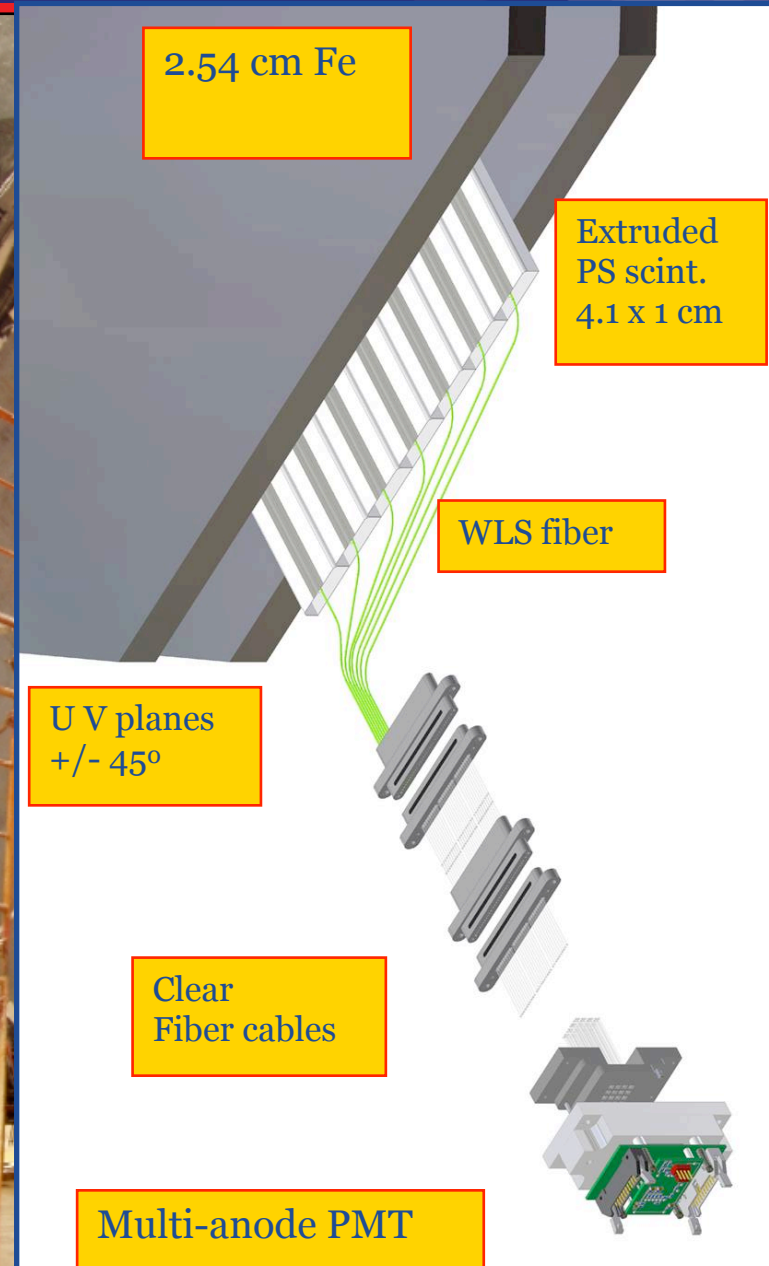
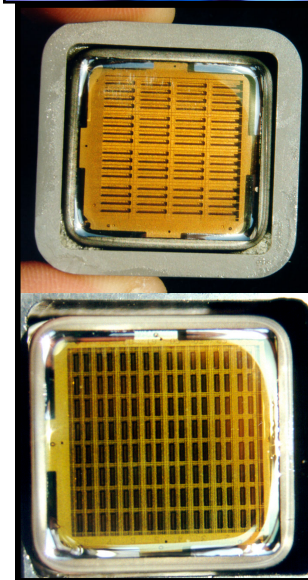
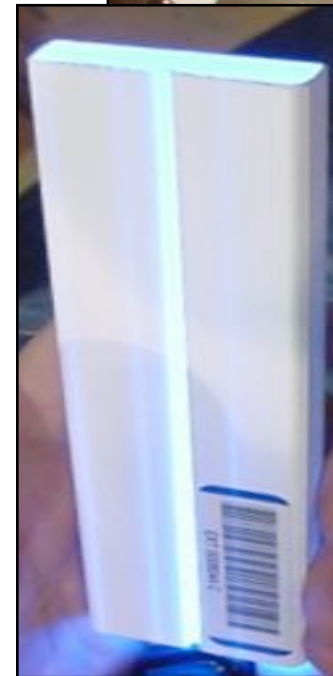




Calorímetros de trazado: MINOS

- Para que magnetizar?
 - Contener las partículas previniendo que los muones se salgan por los lados del detector.
 - Hacer medidas de momento para partículas que salen del detector e incluso puede ser más preciso que la medida de la distancia que recorre la partícula.
 - Medir el signo de la carga de las partículas, logrando separar dos tipos de señal neutrinos y anti-neutrinos, y eliminando la contaminación de uno al otro.

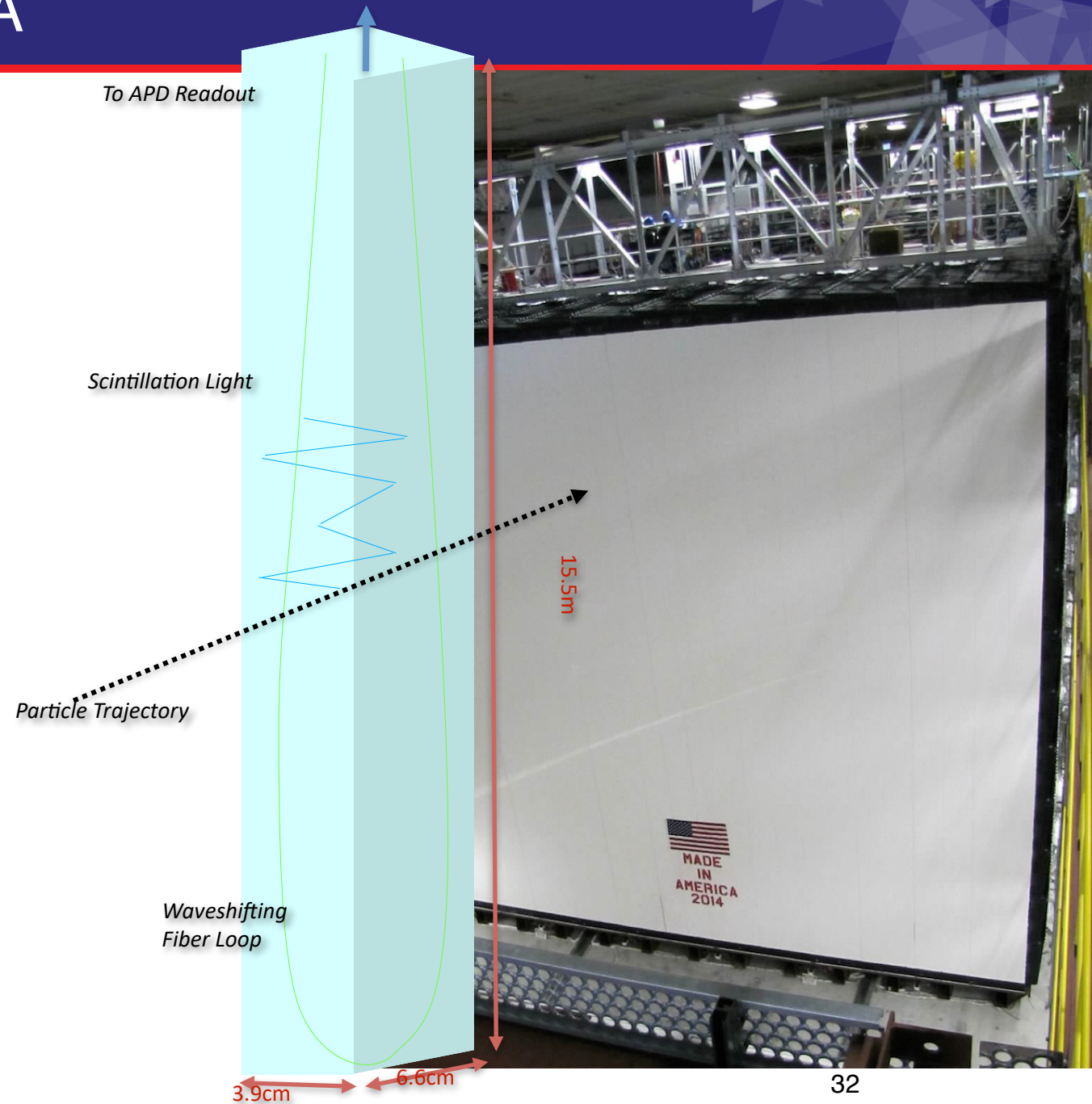
MINOS logra una resolución de 10%





Calorímetros de trazado: NOvA

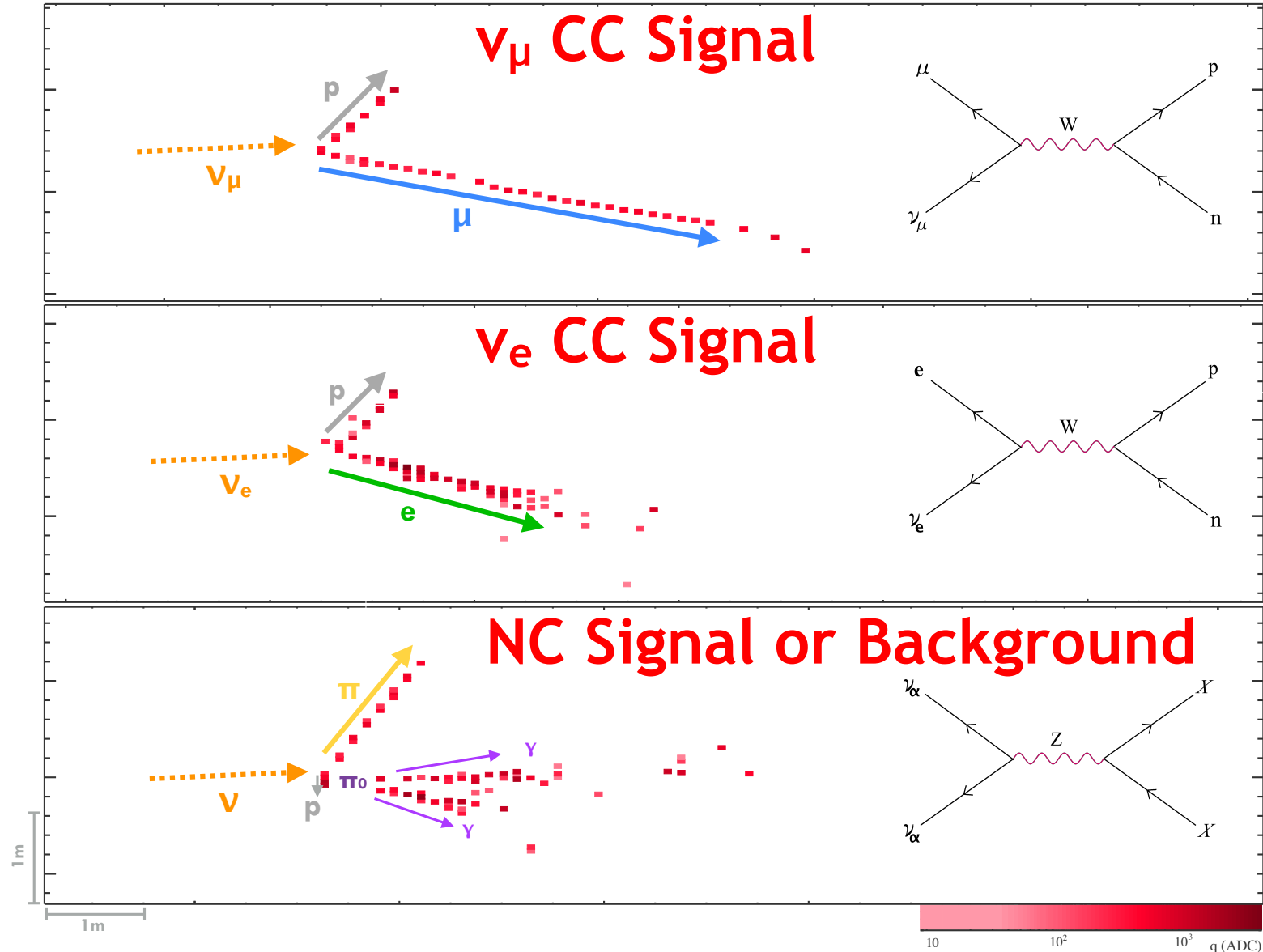
- NOvA fue diseñado para ver aparición de neutrino electrónicos y desaparición de neutrinos muónicos.
- Es un detector localizado en la superficie.
- Es un detector segmentado con un 70% de la masa del detector es elemento activo de detección.
- Consiste de planos de plástico con celdas llenas de aceite mineral mezclado con material centelleador.
 - Dimensiones 15.6 x 15.6 m x 68 m.
 - Una fibra en cada celda lleva la luz hasta un fotodiodo de avalancha.





Calorímetros de trazado: NOvA

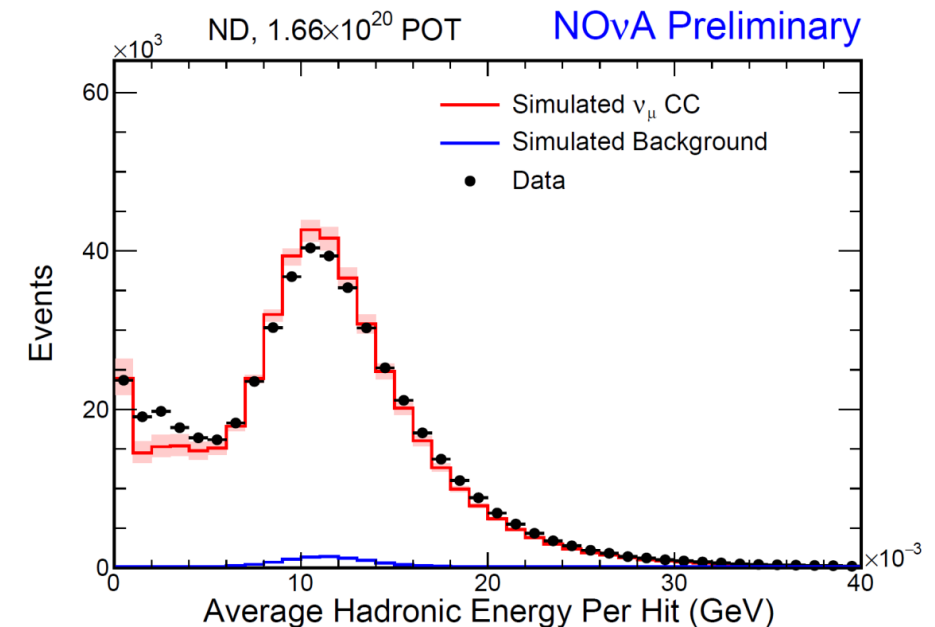
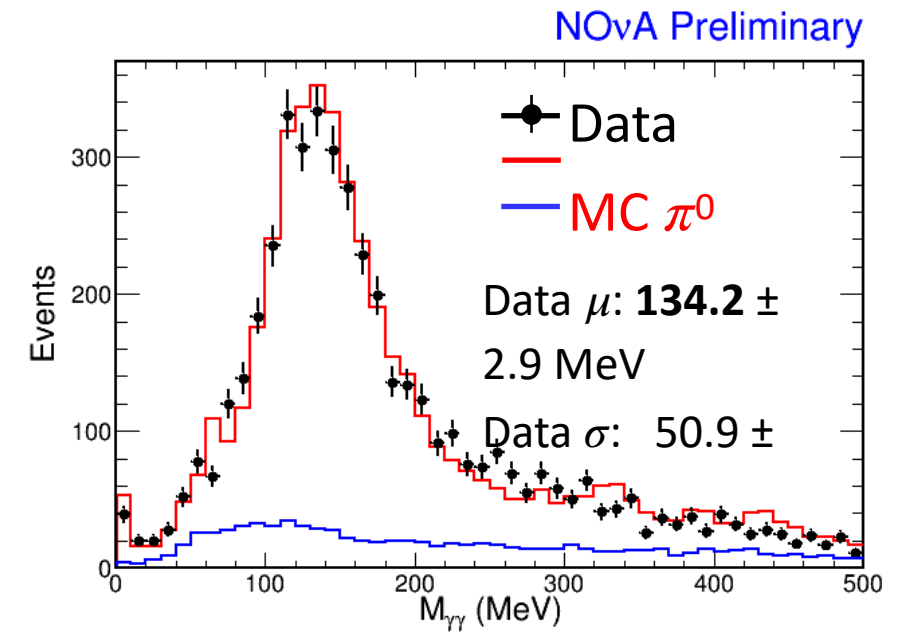
- La identificación de interacciones de neutrinos en NOvA tiene menor fondo que en un experimento como MINOS.
- Cada plano es solo $0.15 X_0$ (longitud de radiación) comparado con MINOS que era 1.44.
- Cascadas electromagnéticas y hadrónicas son más fáciles de distinguir.
- A pesar de estas ventajas de identificación a simple vista, algoritmos de identificación compleja (tipo deep learning) obtienen ganancias de hasta 30% sobre algoritmos más simples.





Calorímetros de trazado: NOvA

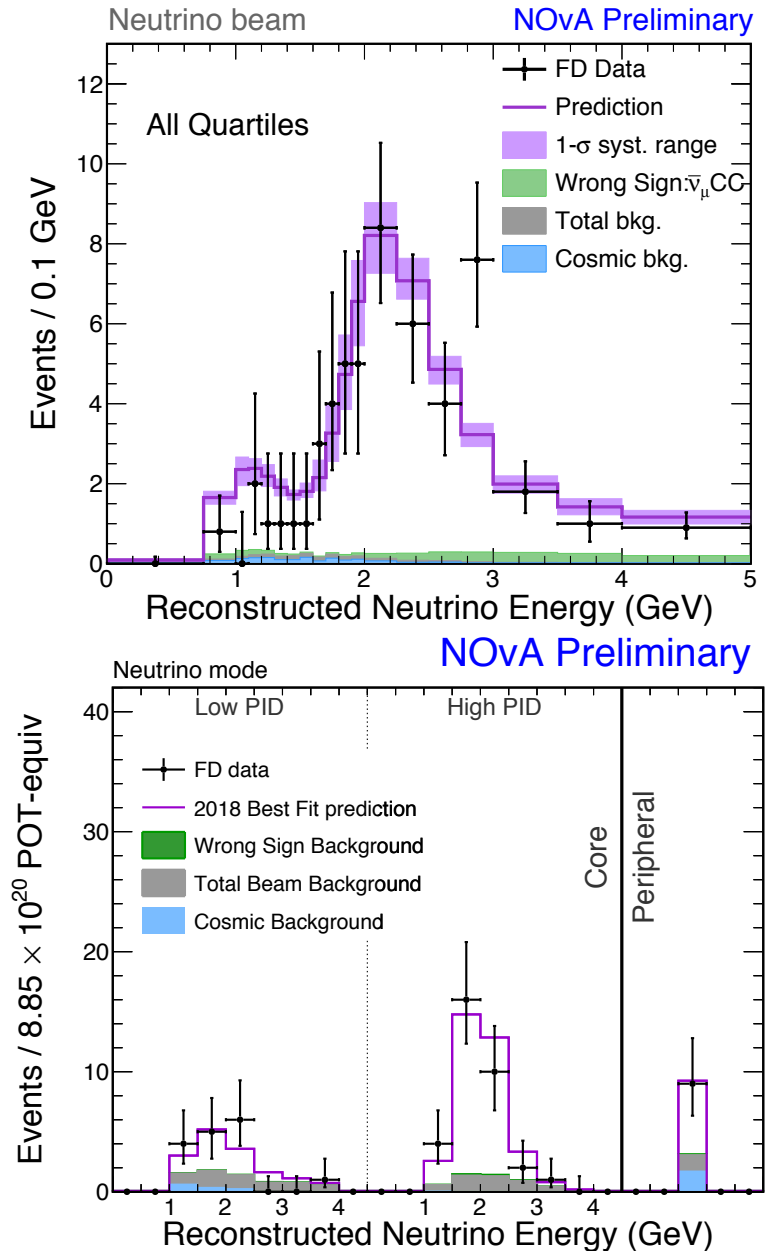
- Para calibrar la energía depositada NOvA usa como estándar los muones que se detienen en el detector.
- Luego verifica la calibración de energía absoluta usando otras selecciones de datos:
 - muones de rayos cósmicos
 - muones del haz de neutrinos
 - electrones Michel
 - masa de piones neutrales
 - la energía por pixel de las cascadas hadronicas.
- Todos estas selecciones están dentro del 5%.





Calorímetros de trazado: NOvA

- La estimación de la energía es importante porque el fenómeno que queremos estudiar tiene una dependencia de la energía.
- En el caso de la desaparición de neutrinos muónicos, queremos identificar la posición del máximo déficit de neutrinos.
- En el caso de la aparición de neutrinos electrónicos la baja estadística limita el uso de la energía.
- Los gráficos muestran el alto ratio señal/fondo que se logran con esta tecnología a pesar de estar en la superficie.





Rechazando Rayos C3smicos y Otras Fuentes de Neutrinos

Un experimento como NOvA esta expuesto a rayos c3smicos, neutrinos solares, neutrinos atmosf3ricos, geo-neutrinos, etc. Qu3 t3cnicas puede usar NOvA (un detector segmentado) para rechazar neutrinos y rayos c3smicos que no vienen del acelerador localizado en Fermilab a 810 km de distancia?

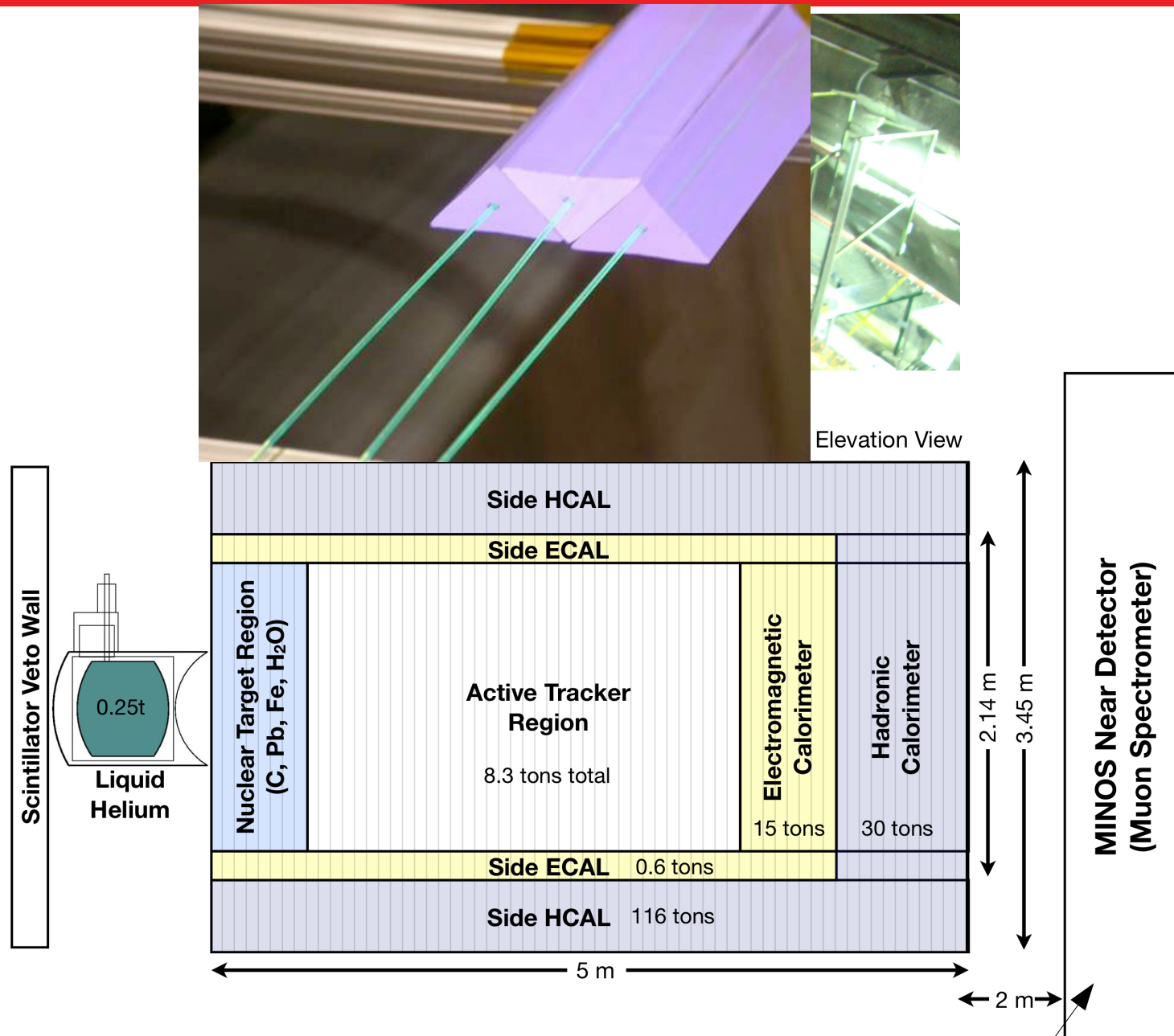
1. Piedras
2. La direcci3n de las trazas/cascadas
3. El tiempo de vuelo entre detectores
4. La coincidencia temporal con el pulso del haz
5. La energia depositada en el detector
6. Identificaci3n del tipo de part3cula
7. La carga el3ctrica de la part3cula
8. La posici3n de la part3cula en el detector

Marca todos los que te parezcan validos



Calorímetros de trazado: MINERvA

- La longitud de radiación es mas corta que la longitud de interacción, por tanto queremos hacer medidas electromagnéticas primero y hadronicas despues.
 - En experimentos con alta intensidad de neutrinos esto es posible.
- MINERvA, otro experimento basado en NuMI, fue diseñado para medir la sección eficaz de los neutrinos usando diferentes materiales.
- Colocado en frente de MINOS, usa a MINOS como un gran espectrómetro de muones, concentrando el estudio del vertice de la interacción en la parte mas central del detector.
- Tiene mejor resolución de trazado usando barras triangulares de centelleador y usa 3 direcciones de las barras para mayor precisión.

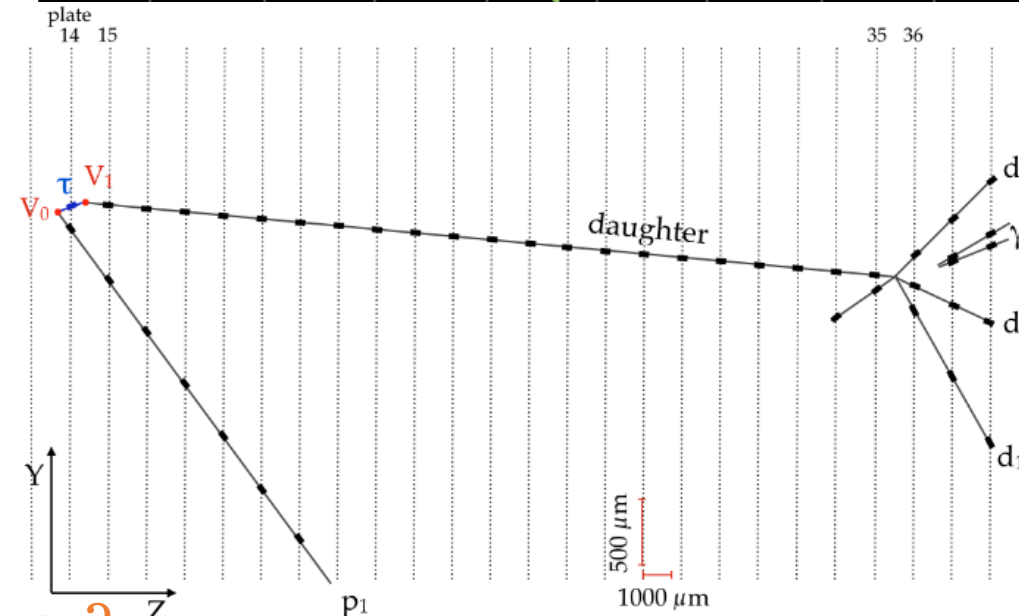
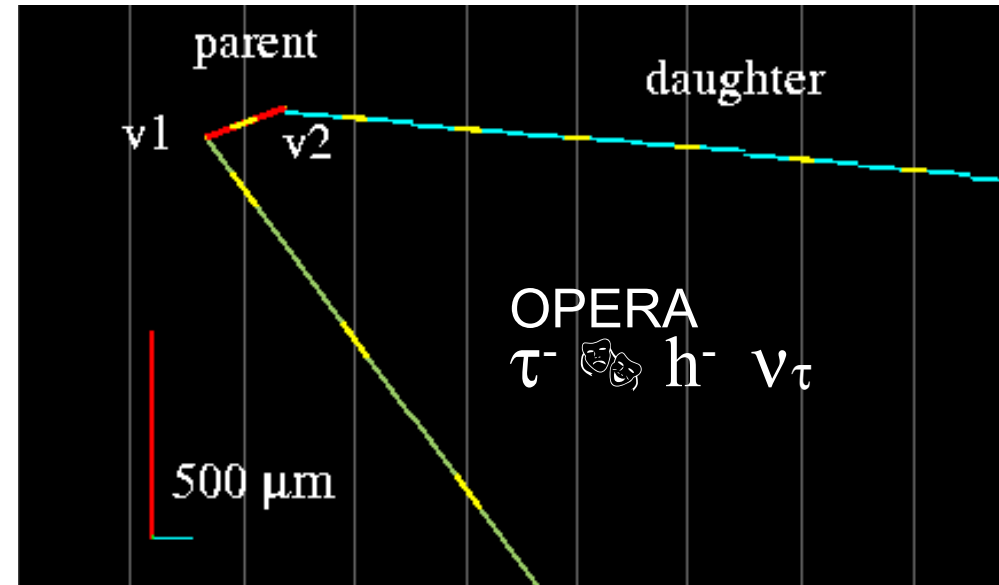
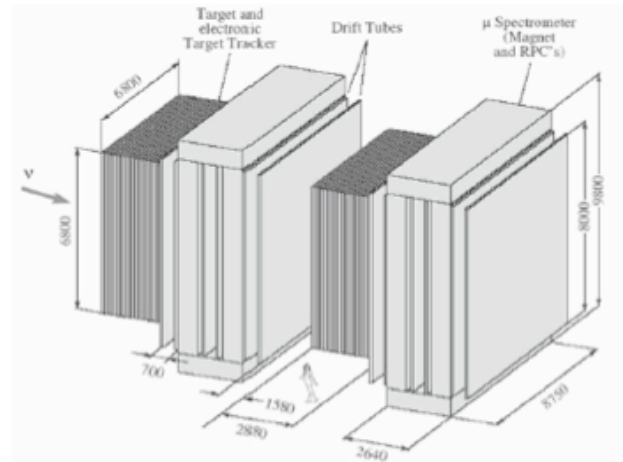
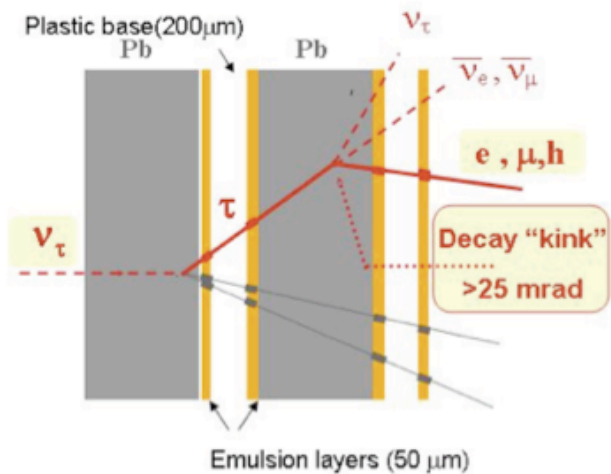




Calorímetros de trazado: OPERA

- Observar neutrinos tau no es fácil. Son difíciles de producir (solo decaimiento de partículas inestables u oscilaciones), son difíciles de hacer interactuar (alto umbral de detección) y son difíciles de detectar (tiempo media de vida es 291 fs).
- El experimento de OPERA fue diseñado para hacerlo. Observaron aparición de neutrinos tau con 5.1 sigma.

10th Int. Conf. on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2007) IOP Publishing
 Journal of Physics: Conference Series 120 (2008) 052042 doi:10.1088/1742-6596/120/5/052042



Qué experimento observo neutrinos tau por primera vez?

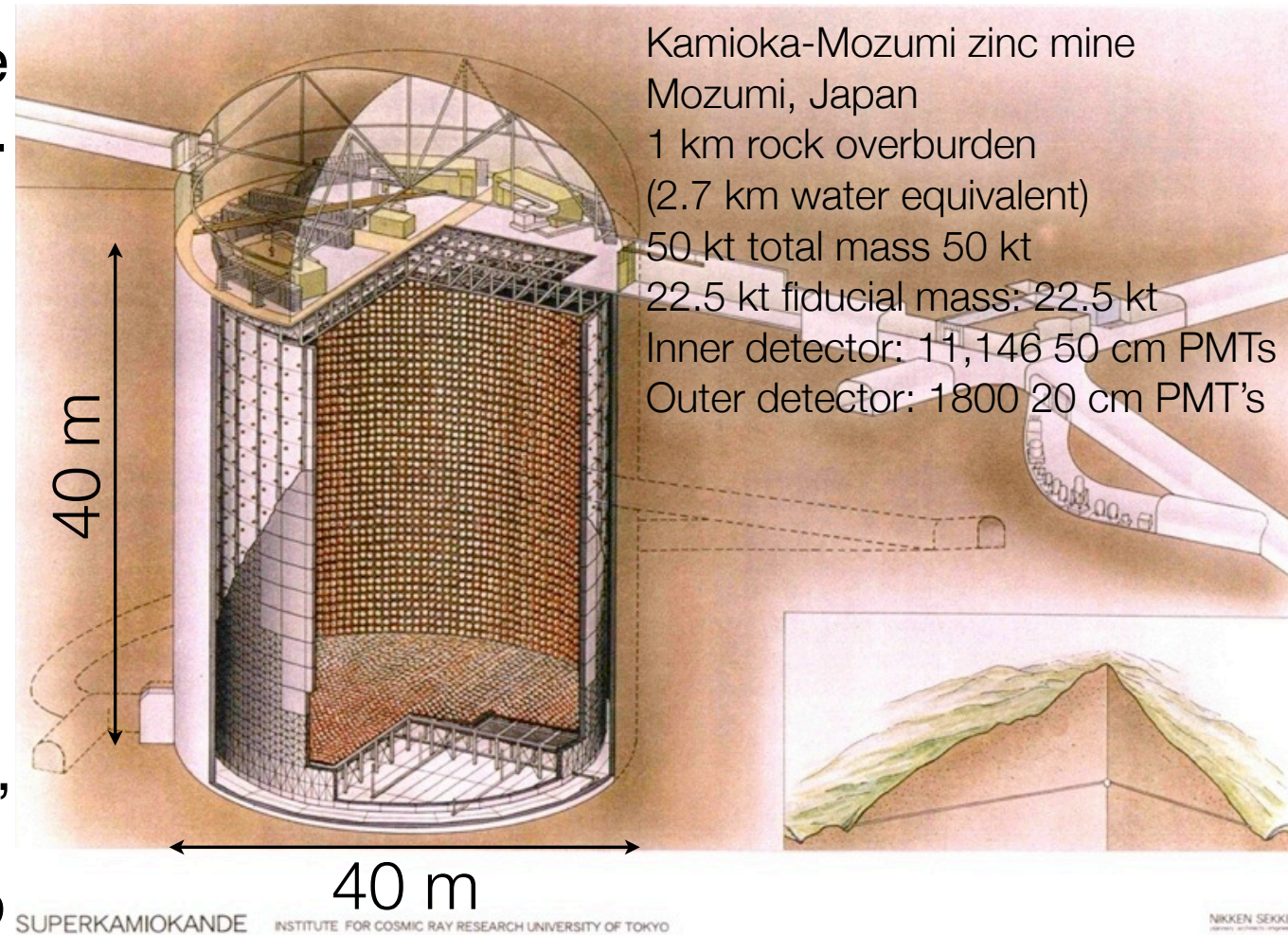


- La técnica de detectores Cherenkov ha sido muy exitosa en permitirnos estudiar física de neutrinos desde muy bajas energías (10s de MeVs) hasta muy altas energías (incluso TeV) y todo lo del medio.
- Son detectores de un solo volumen que permiten instrumentar solo la superficie interna del volumen (en vez de tener que instrumentar todo el volumen como en el caso de los detectores segmentados).
- Sin embargo el costo de cubrir la superficie con fotodetectores de alta eficiencia se ha convertido en la limitante para el tamaño de estos detectores.
- Un numero de técnicas para aumentar la eficiencia de la detección de la luz se han ido estudiando: mayor eficiencia cuantica, conos de Winston, cambio o variación de longitud de onda.



Detectores Cherenkov: Super-Kamiokande

- Super-Kamiokande basado en Japon no solo ha tomado datos de neutrino atmosféricos desde 1996. Con la construcción de un haz de neutrinos se ha convertido en un experimento de precision de oscilaciones de neutrinos.
- Con una masa total de 50 kt y mas de 10,000 fotomultiplicadores ha hecho medidas no solo de neutrinos del haz y atmosféricos pero también de neutrinos solares, de supernova y continua teniendo los mejores limites de decaimiento del proton.



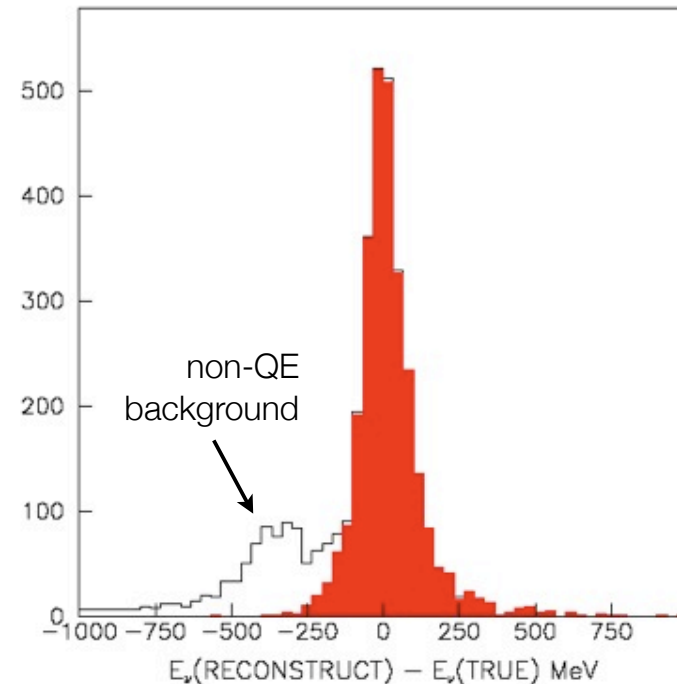
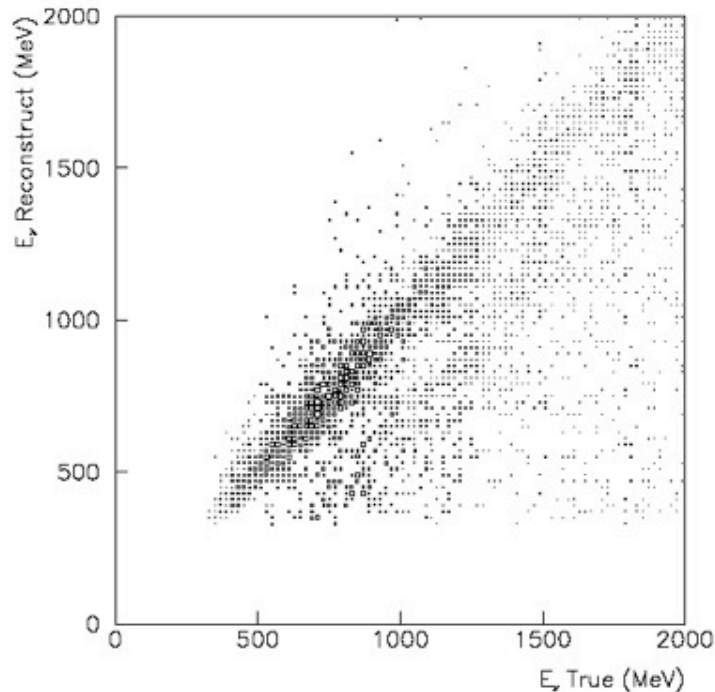
Alguien sabe porque por un tiempo tuvo solo ~5000 fotomultiplicadores?



Detectores Cherenkov: Super-Kamiokande

- La reconstruction de la energía en Super-Kamiokande no es basada en la deposición de energía sino en una reconstrucción cinemática de la interacción.

$$E_\nu = \frac{m_N E_l - m_l^2/2}{m_N - E_l + p_l \cos \theta_l} \quad \text{From 2 body kinematics}$$



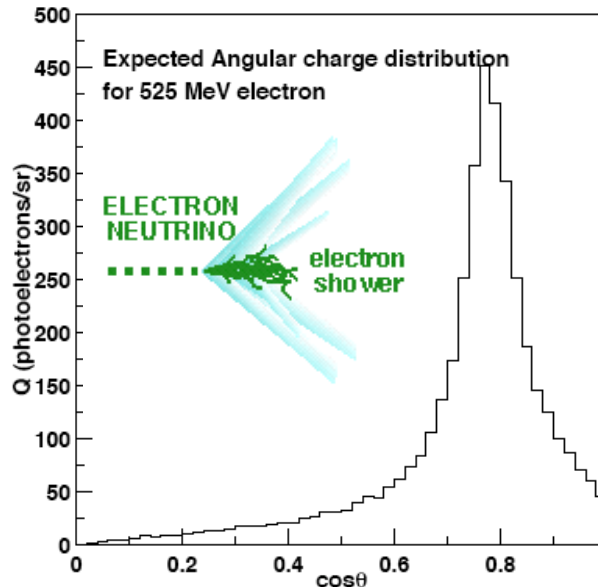
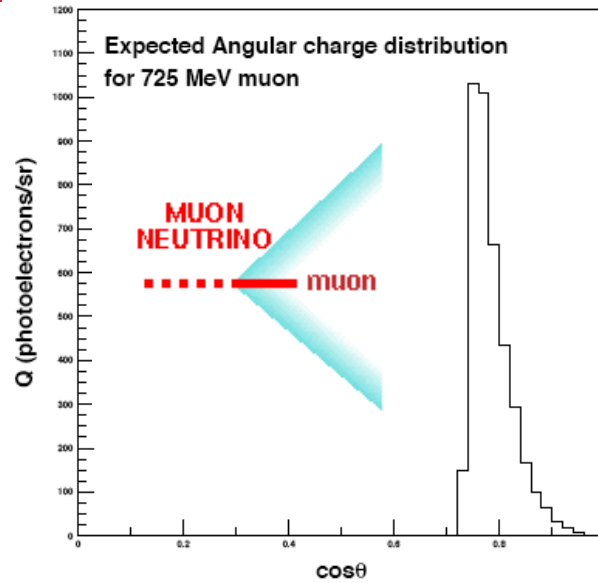
- Muchas de las partículas hadronicas esta bajo el umbral de detección en un detector de Cherenkov. Funciona mucho mejor para bajas energías (< 1 GeV) que a energías donde pueda haber un componente hadronic alto.



Detectores Cherenkov: Super-Kamiokande

- A bajo momento de la partícula uno puede correlacionar la energía visible con el ángulo Cherenkov. Los muones tienen anillos colapsos y los electrones tienen siempre los 42 grados.
- A momentos mas altos, la distribución alrededor del ángulo de Cherenkov da la identificación de la partícula. Los muones son nítidos y los electrones son difusos.

Alguien ve el segundo anillo?

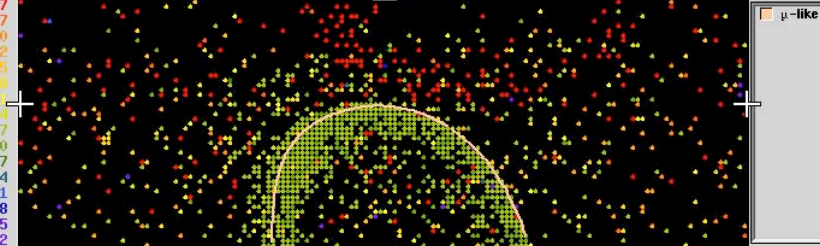
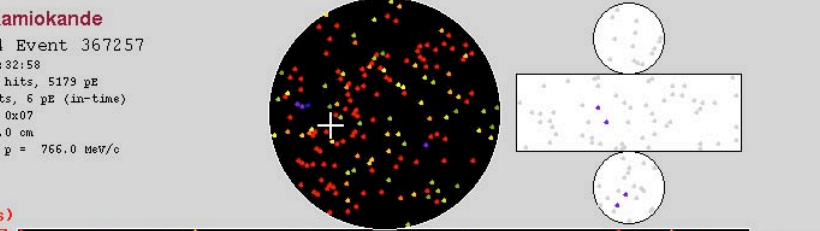


Figures from M. Earl's PhD Thesis

Super-Kamiokande
 Run 4234 Event 367257
 97-06-16:23:32:58
 Tmer: 1904 hits, 5179 pE
 Outer: 5 hits, 6 pE (in-time)
 Trigger ID: 0x07
 D wall: 885.0 cm
 FC mu-like, p = 766.0 MeV/c

Resid (ns)

- > 137
- 120-137
- 102-120
- 85-102
- 68-85
- 51-68
- 34-51
- 17-34
- 0-17
- -17-0
- -34-17
- -51-34
- -68-51
- -85-68
- -102-85
- <-102

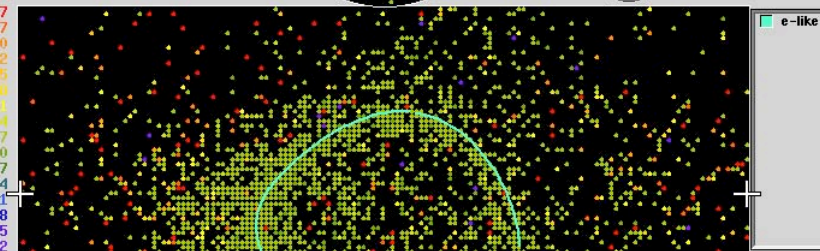
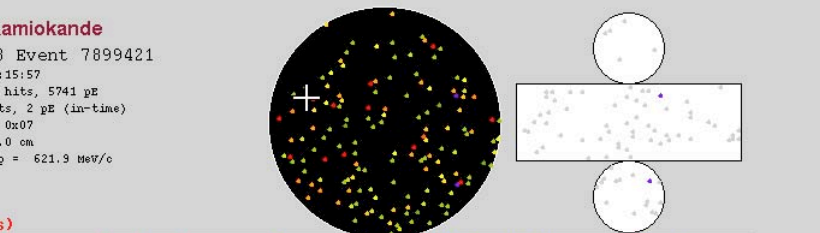


Super-Kamiokande

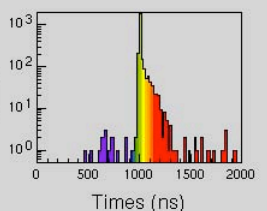
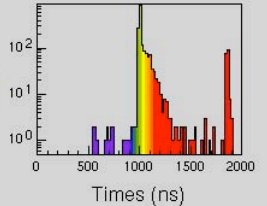
Run 4268 Event 7899421
 97-06-23:03:15:57
 Tmer: 2652 hits, 5741 pE
 Outer: 3 hits, 2 pE (in-time)
 Trigger ID: 0x07
 D wall: 506.0 cm
 FC e-like, p = 621.9 MeV/c

Resid (ns)

- > 137
- 120-137
- 102-120
- 85-102
- 68-85
- 51-68
- 34-51
- 17-34
- 0-17
- -17-0
- -34-17
- -51-34
- -68-51
- -85-68
- -102-85
- <-102



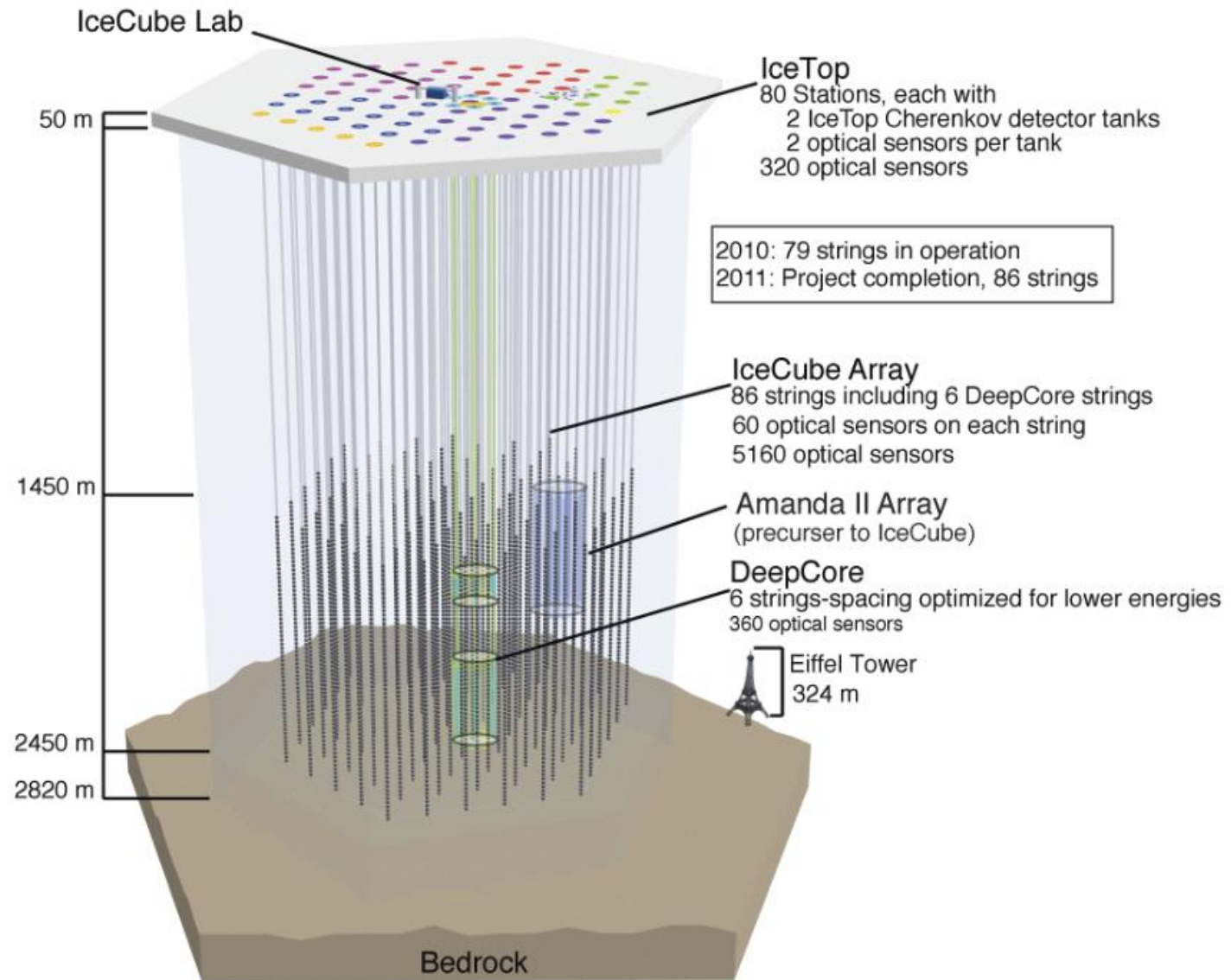
Figures from <http://hep.bu.edu/~superk/atmnu/>





Detectores Cherenkov: IceCube

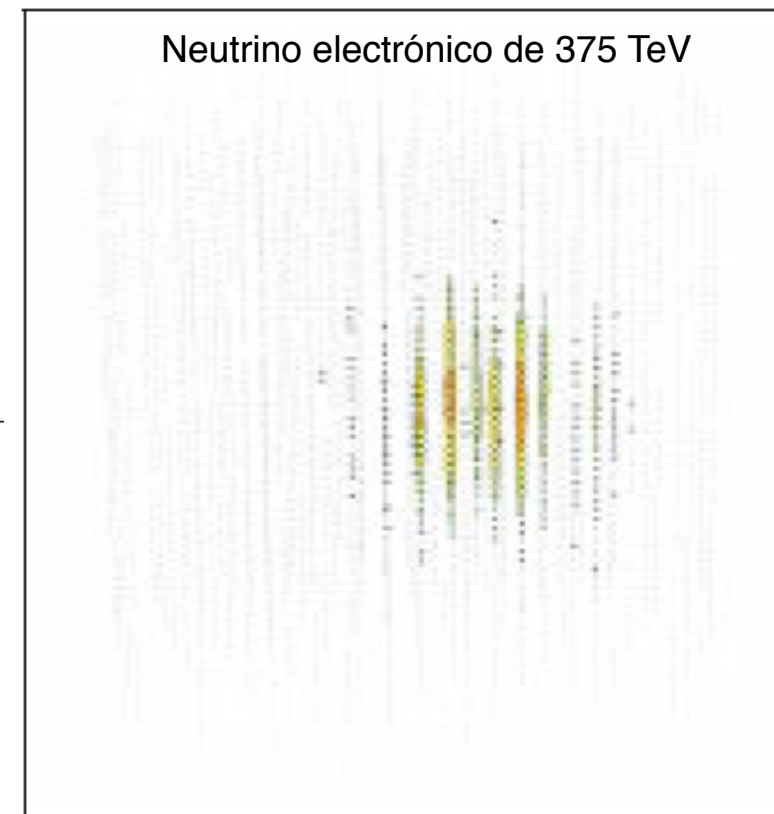
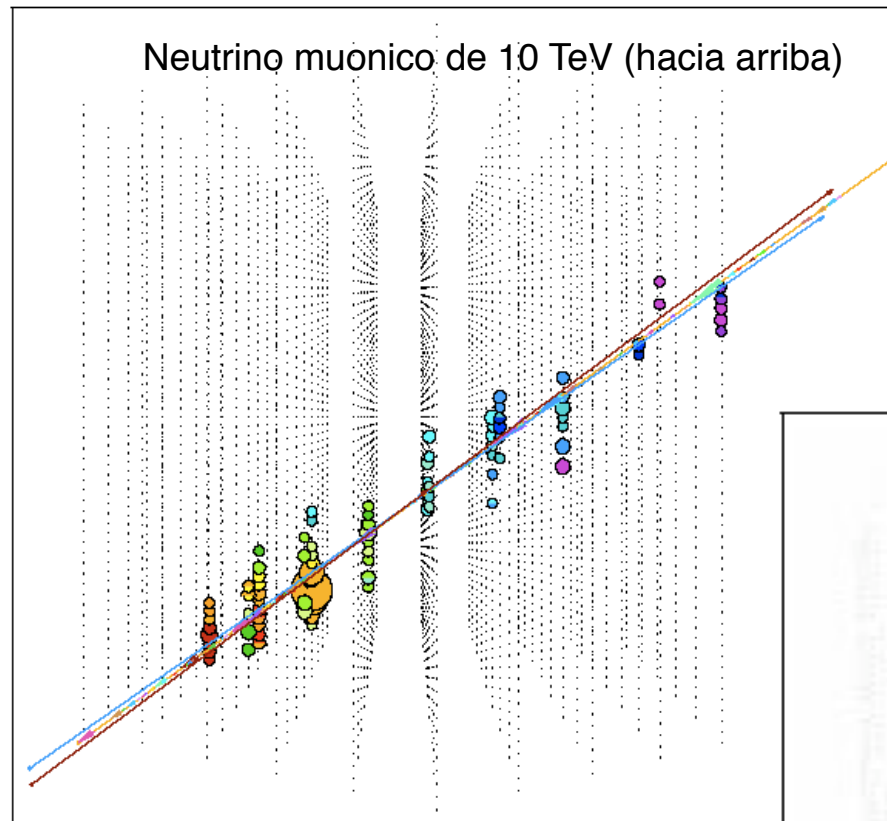
- IceCube fue diseñado para detectar neutrinos de ultra alta energía. A diferencia de Super-Kamiokande busca instrumentar el volumen con cuerdas de fotodetectores.
- Tiene 5320 modelos ópticos, en un volume de 1km^3 , con una resolución angular de 0.4-1 grados es el telescopio de neutrinos mas grande que existe.





Detectores Cherenkov: IceCube

- IceCube fue diseñado para detectar neutrinos de ultra alta energía. A diferencia de Super-Kamiokande busca instrumentar el volumen con cuerdas de fotodetectores.
- Tiene 5320 modelos ópticos, en un volume de 1km^3 , con una resolución angular de 0.4-1 grados es el telescopio de neutrinos mas grande que existe.





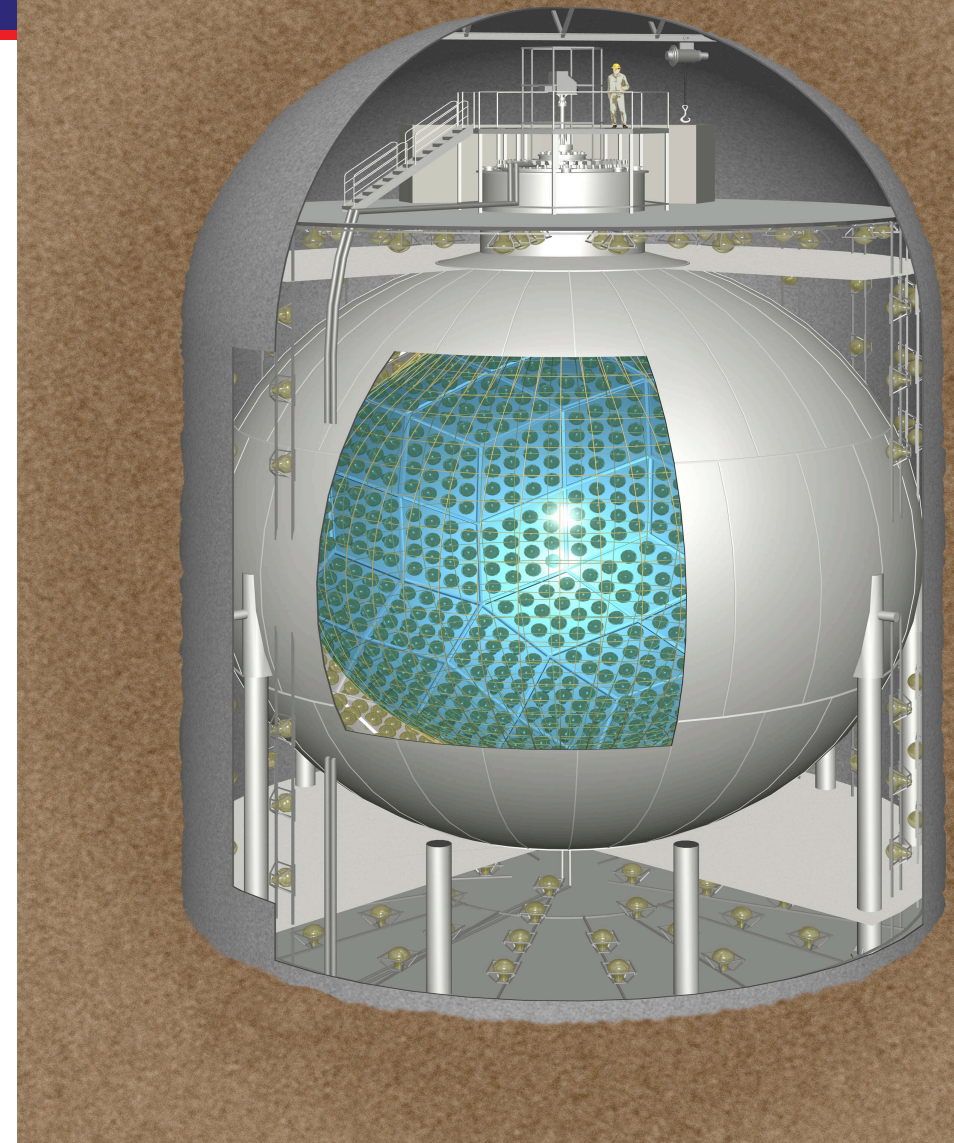
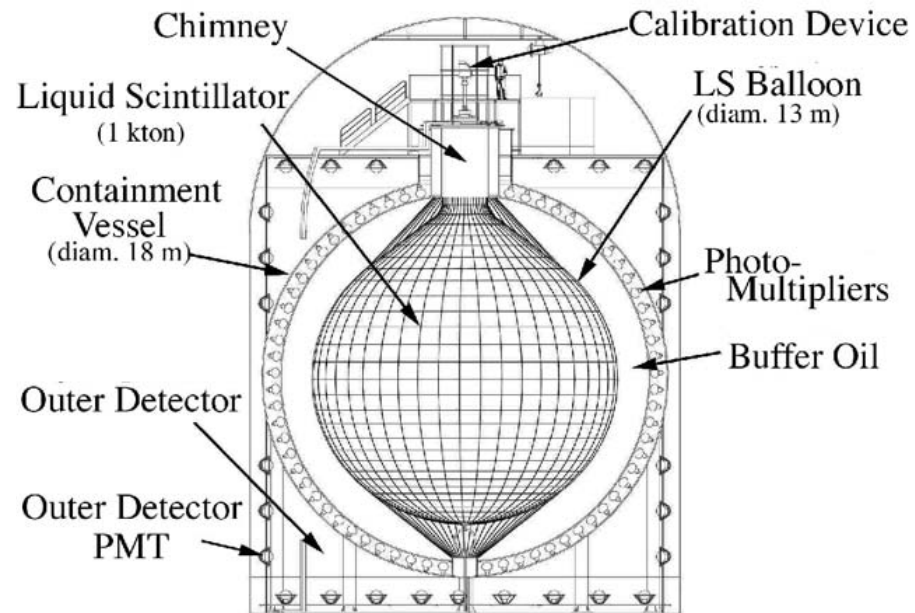
Centelleadores Líquidos (no segmentados) y otras Técnicas

- La técnica de centelleadores líquidos es similar a la de Cherenkov. Un solo volumen instrumentado con fotomultiplicadores en la superficie interna del volumen.
 - Pueden detectar anti-neutrinos electrónicos de reactores a 3.5 MeV, y neutrinos del sol usando dispersión elástica a 0.7 MeV.
 - Tienen mayor emisión de luz que el agua.
- Esta técnica ha sido usada en una variedad de experimentos de anti-neutrinos usando reactores nucleares (CHOOZ, KamLAND, Double CHOOZ, Daya Bay, RENO) como fuente y neutrinos del sol (Borexino).
- El reto de estos detectores es que para detectar estas energías tan bajas, tienen que trabajar duro en reducir el fondo de toda las fuentes de radiación natural.
- Esta es la técnica del primer experimento en detectar neutrinos: Poltergeist.



Centelleadores Liquidos: KamLAND

- Estos detectores de neutrinos de baja energía construyen capas y zonas de barrera y tienen un control estricto de lo que va en el centro del detector evitando cualquier fuente de radiación natural.
- Componentes “sucios” como el vidrio que contiene mucho U y Th se mantienen fuera del centro.
- KamLAND se diseño para detectar neutrinos de multiples reactores en Japón.

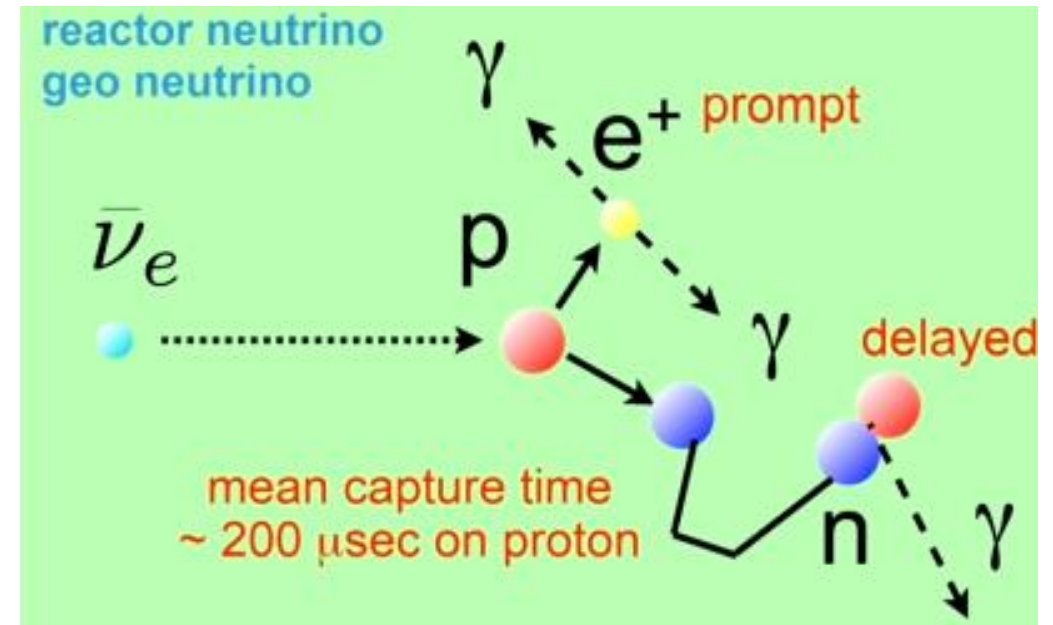
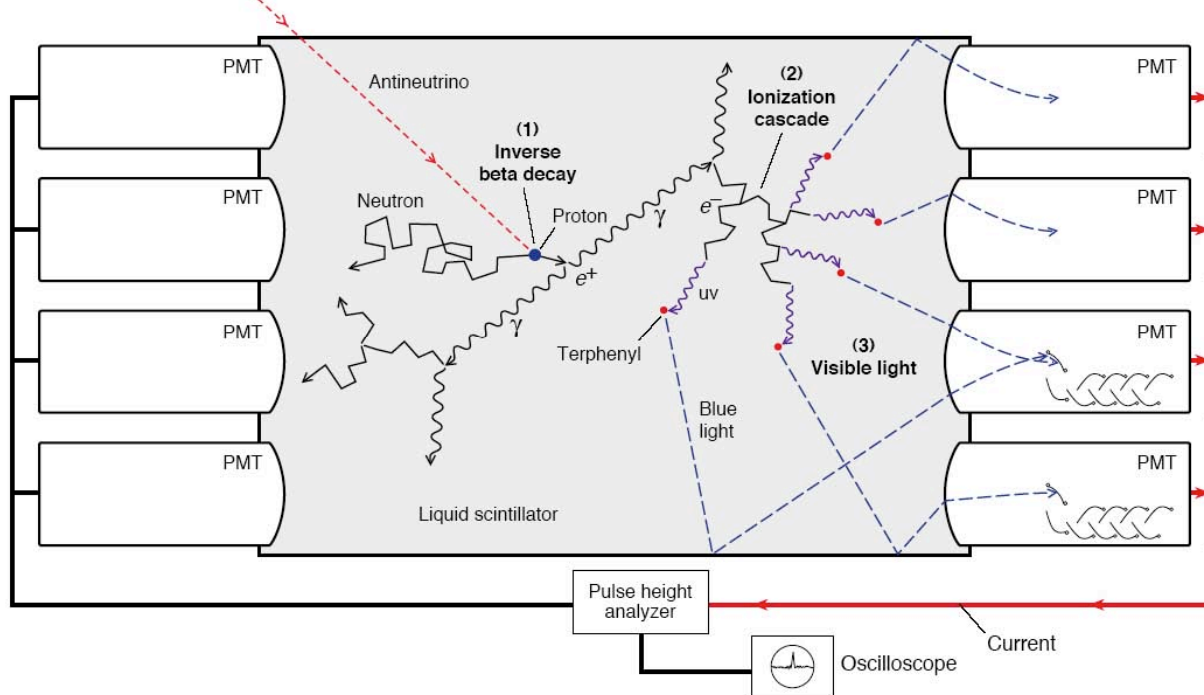


sitio de Kamioka
1 kton centelleador liquido



Centelleadores Liquidos: Poltergeist

- Reines y Cowan tuvieron un primer experimento que fallo en 1953. Eso solo el segundo experimento que pusieron en Savannah (Carolina del Sur) que tienen exito.

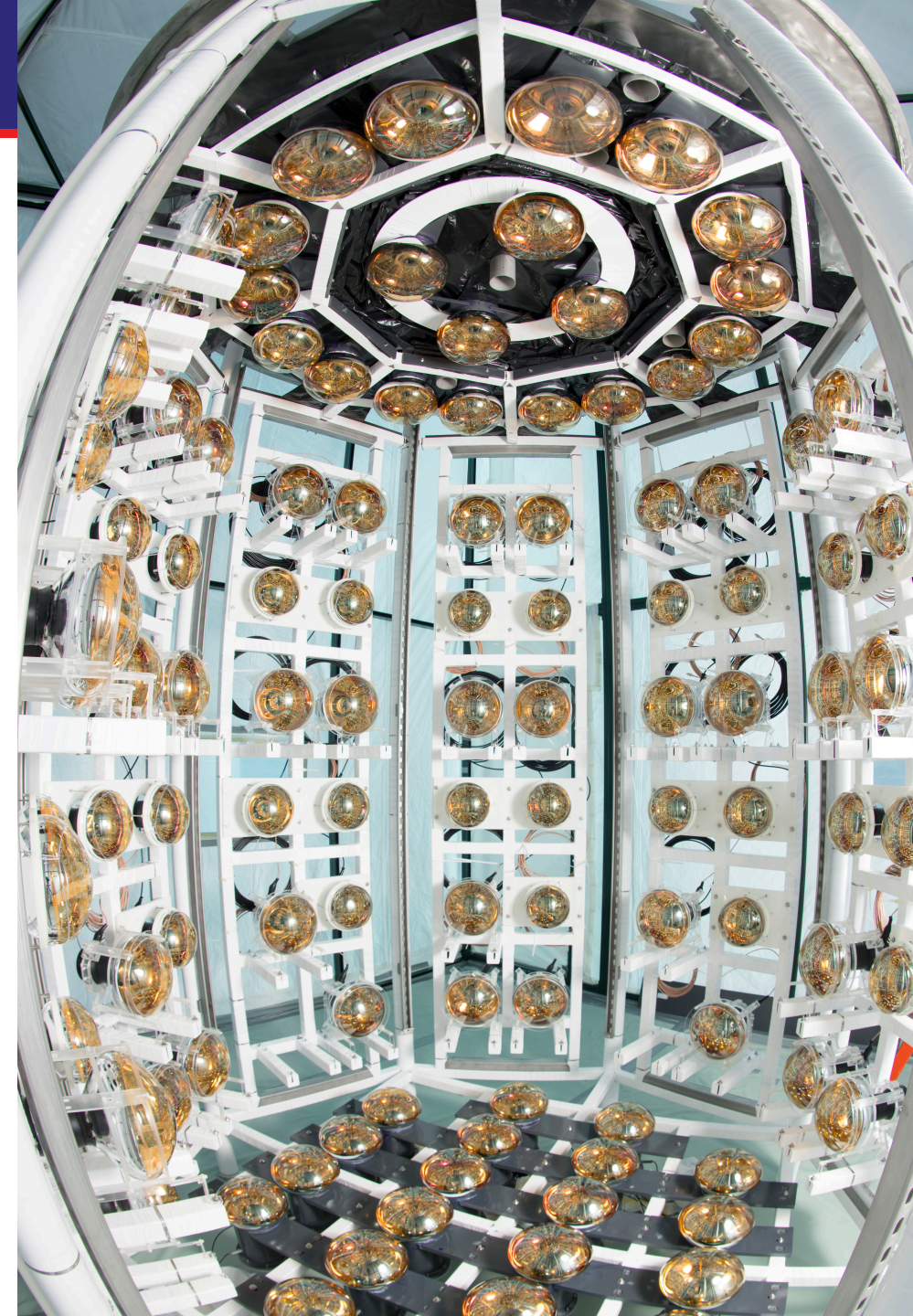
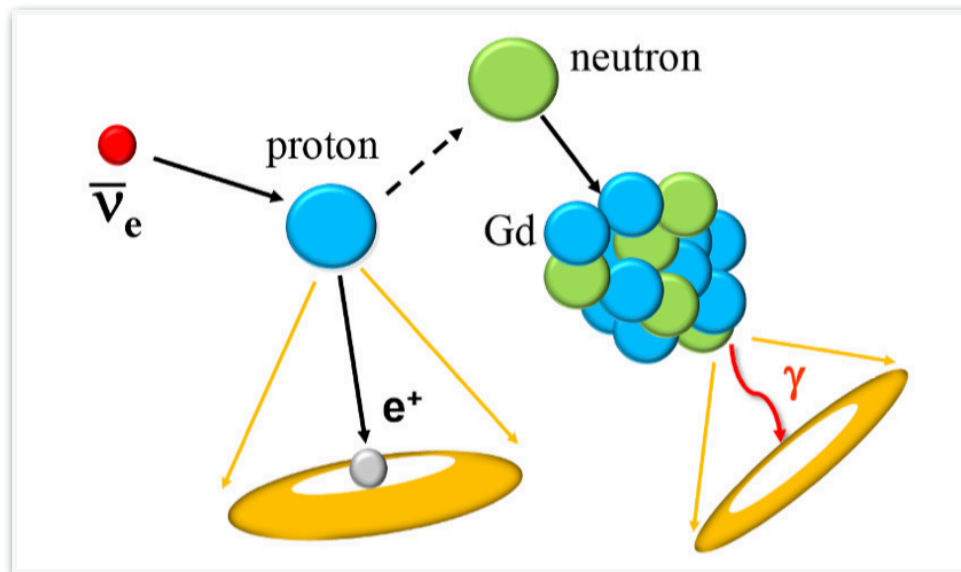


- La técnica usa el hecho que el positron deposita su energía cinética inmediatamente, mientras que el neutron tienen que pasear un poco para ser capturado 5 cm/20 μ sec de la interacción inicial y suelta rayos gamma.
- Esta técnica que usa una doble coincidencia elimina el fondo dramaticamente.



Cherenkov con Gadolinium: ANNIE

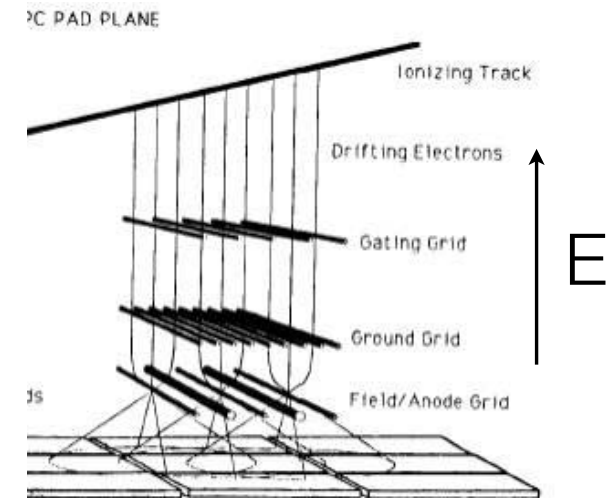
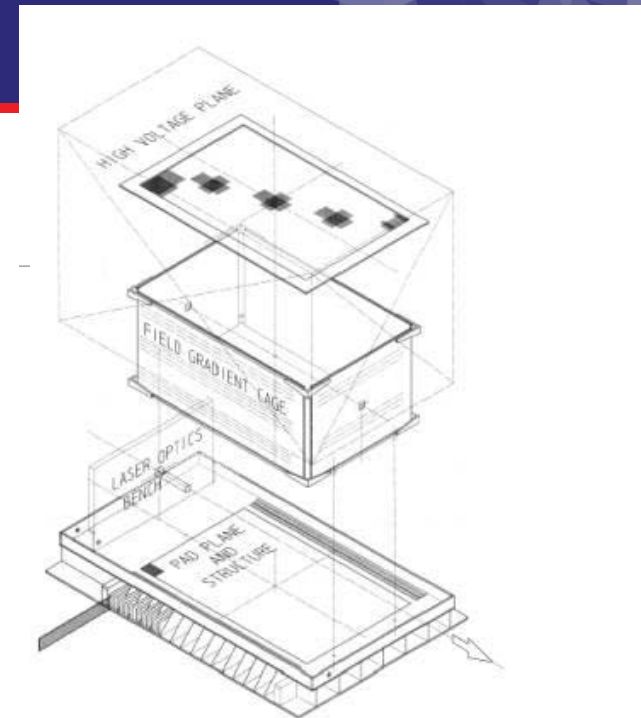
- ANNIE es un experimento en el otro haz de neutrinos en Fermilab.
- Busca medir la producción de neutrones que salen de interacciones de neutrinos.
- Usa la técnica de doble coincidencia con la captura del neutron usando Gadolinium.
- Super-Kamiokande ha añadido Gd.





Cámaras de Proyección Temporal

- La técnica de cámaras de proyección temporal de gas (TPC en inglés) ha sido usada ampliamente en una variedad de experimentos de altas energías y nucleares.
- Tienen una resolución de trazado de \sim mm y la identificación de partículas por debajo de 1 GeV es posible usando dE/dx .
- Se puede usar una mezcla de gas común Argón y Metano, donde el primero permite que el electron viaje largas distancias y el metano ayuda a dar una mayor ionización.
- Los campos eléctricos requeridos son de 200 V/cm. La posición de los electrones en los pads o cables dan 2 dimensiones y la tercera se obtiene por el tiempo de llegada.





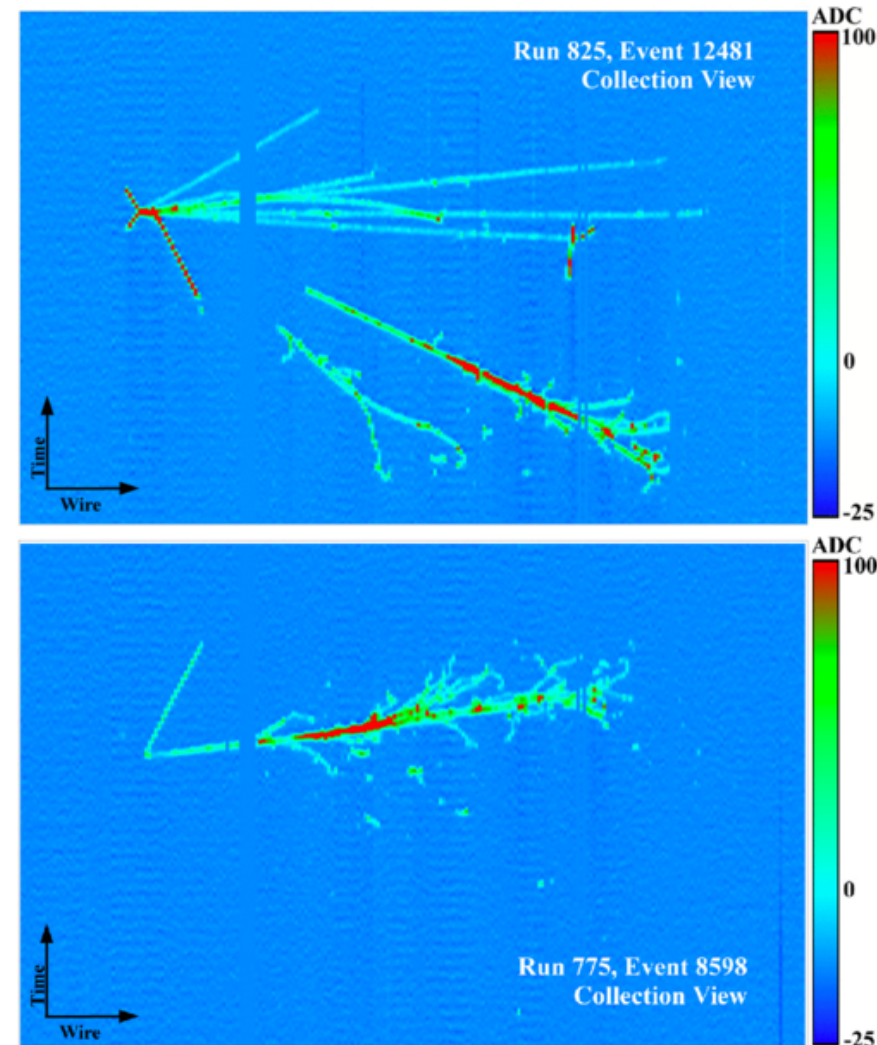
Cámaras de Proyección Temporal: ArgoNeuT

- Para aplicarlo a experimentos de neutrinos se necesita una densidad mas alta. El argon liquido en vez de gas ofrece el potencial de llegar a una masa de detección alta con excelente resolución.
- Dado que los TPCs ofrecen un muestreo alto por cada longitud de radiación, llegan a permitir la identificación de electrones y fotones partiendo del dE/dx al principio de la cascada.

Pueden identificar algunas partículas en estos dos gráficos?

First observation of low energy electron neutrinos in a liquid argon time projection chamber

R. Acciarri *et al.* (ArgoNeuT Collaboration)
Phys. Rev. D **95**, 072005 – Published 6 April 2017





Cámaras de Proyección Temporal: DUNE

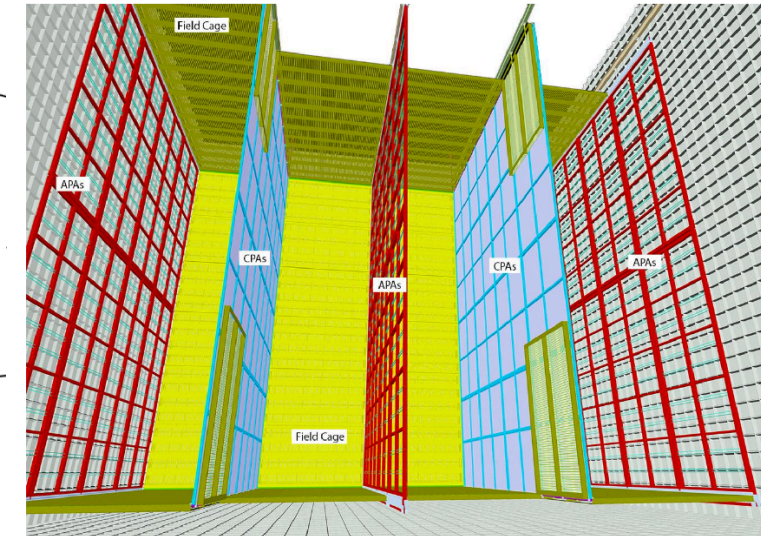
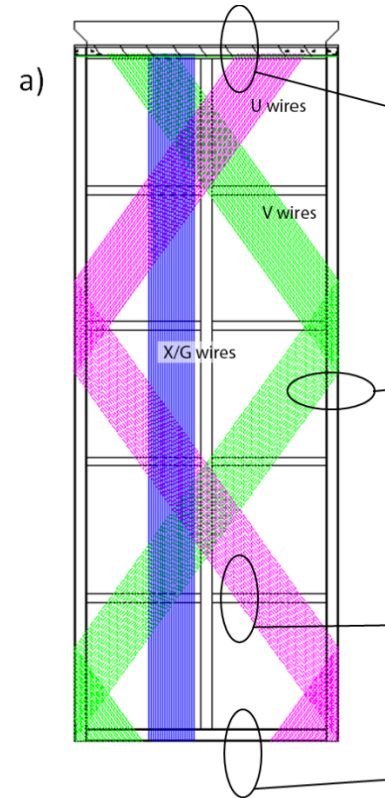
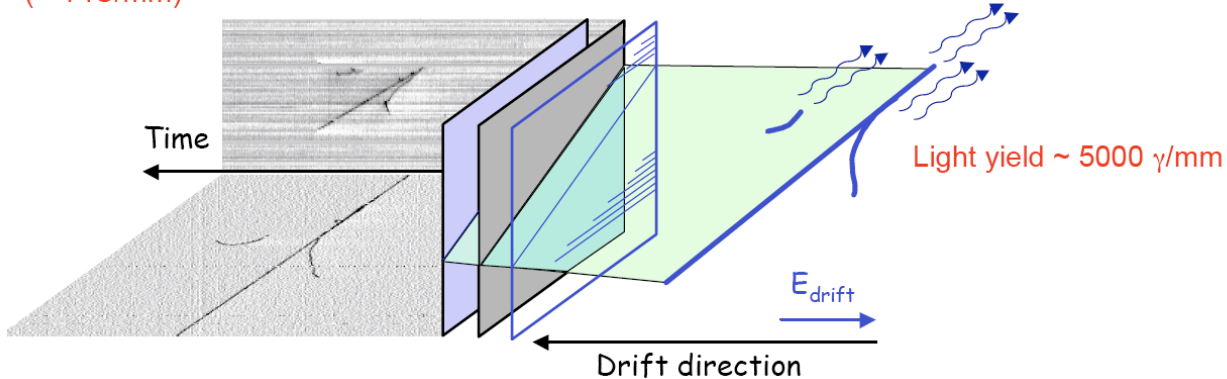
- DUNE es la siguiente fase de experimentos para estudiar oscilaciones de neutrinos.
- El plan es desarrollar 4 módulos de 10kt cada uno usando esta tecnología.
- El sistema también incluyendo un sistema de fotodetección que ayuda a determinar el tiempo inicial de la interacción.

Charge yield ~ 6000 electrons/mm
(~ 1 fC/mm)

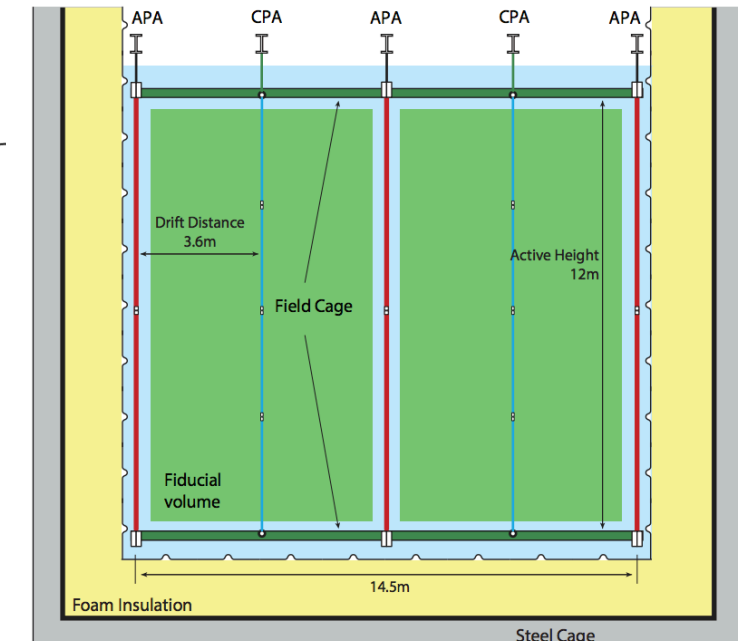
Charge readout planes: Q

used to trigger and set to
UV Scintillation Light: L

Light yield ~ 5000 γ /mm



DUNE



Retos y el Futuro





- El estudio de neutrinos requiere detectores de grande masa pero con capacidades de alta resolución e identificación de partículas.
- El primer reto es vencer los costos de instrumentar amplias areas de fotodeteccion (para volúmenes no segmentados) y/o alto numero de canales (para volúmenes segmentados).
 - Los detectores de argon liquido prometen poder hacer los dos pero aun hay muchos retos en el camino para implementar esta tecnología a gran escala.
- Otras técnicas que permitirían saltos hacia adelante es la combinación de tecnologías de rápida fotodeteccion con centelleadores que permitan usar también la luz Cherenkov.
- Experimentos como Super-Kamiokande ha demostrado las ventajas de diseñar detectores con multiples capacidades para permitir un programa amplio de mediciones.



Referencias

<https://pdg.lbl.gov/2020/reviews/rpp2020-rev-neutrino-mixing.pdf>

<https://pdg.lbl.gov/2020/reviews/rpp2020-rev-nu-cross-sections.pdf>

<https://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-neutrino-mixing.pdf>



<http://laconga.redclara.net>



contacto@laconga.redclara.net



lacongaphysics



Latin American alliance for
Capacity buildiNG in Advanced physics

LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea

El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido, el cual refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la misma.