

Experimentos de neutrinos

Minerva masterclas
25/03/2026

Anselmo Cervera
IFIC-Valencia



**SANFORD UNDERGROUND
RESEARCH FACILITY**
South Dakota

Experimentos de neutrinos

Minerva masterclas
25/03/2026

Anselmo Cervera
IFIC-Valencia



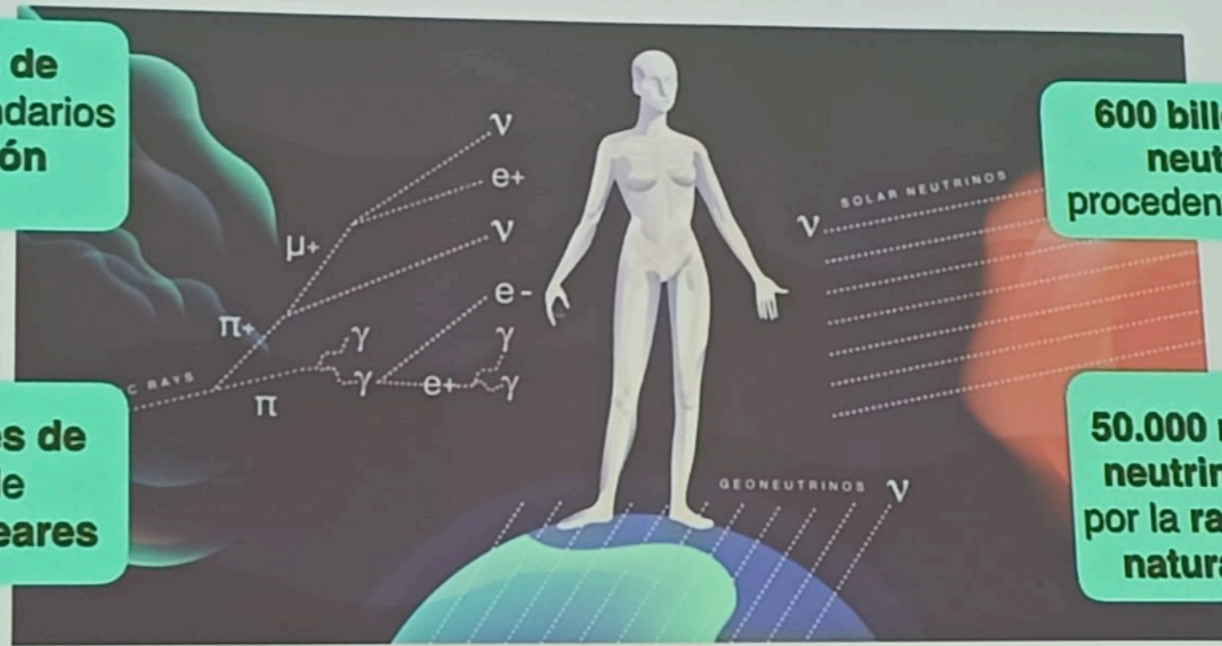
**SANFORD UNDERGROUND
RESEARCH FACILITY**
South Dakota

¡¡El Universo está lleno de neutrinos!!

Una persona media es **atravesada** cada segundo por:

Varios miles de neutrinos secundarios de la radiación cósmica

10.000 millones de neutrinos de reactores nucleares



600 billones de neutrinos procedentes del Sol

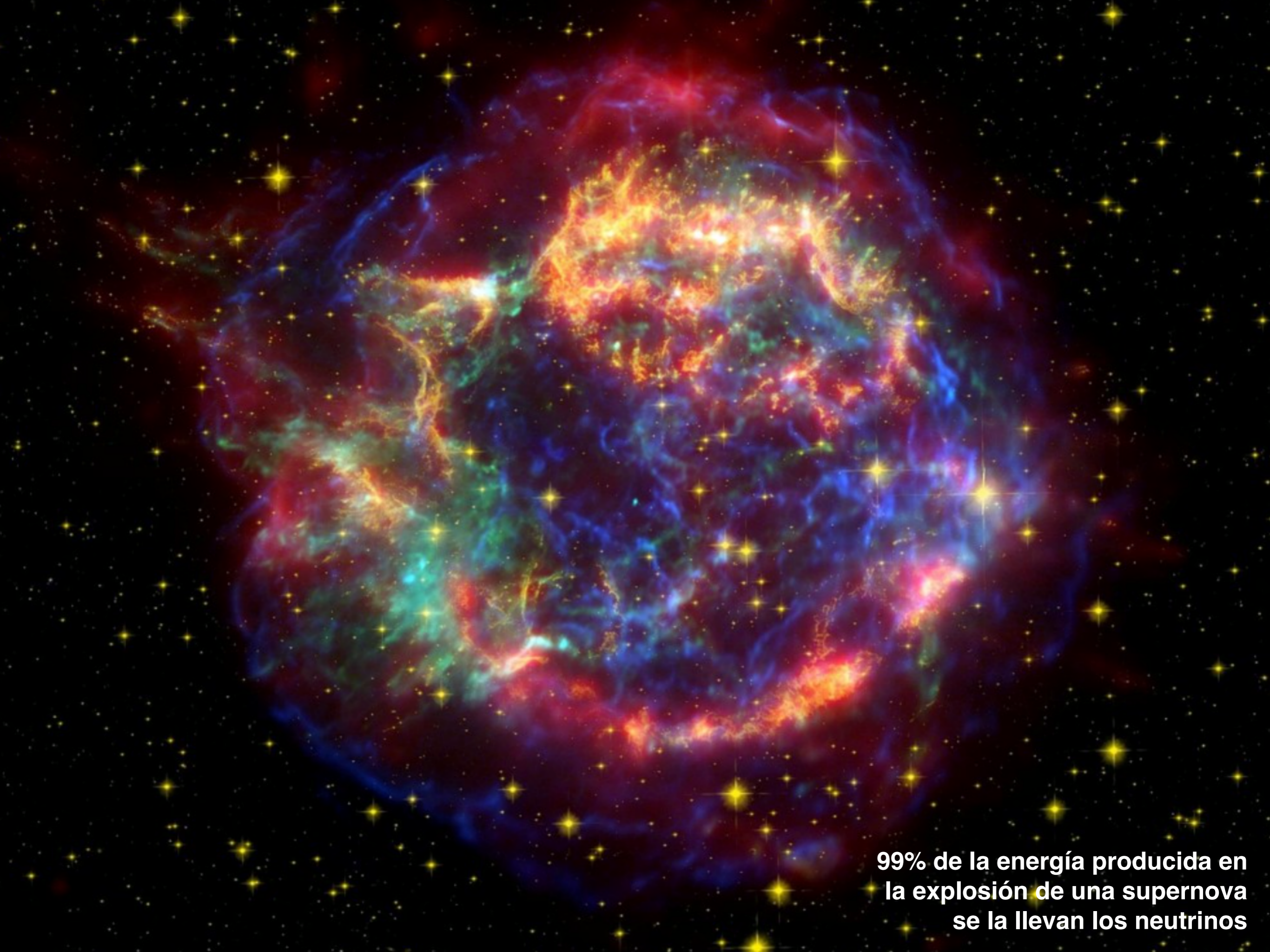
50.000 millones de neutrinos creados por la radioactividad natural terrestre

All Things Neutrino, Fermilab

✓ Emitimos unos **4000 neutrinos por segundo** de la desintegración del ^{40}K de nuestro cuerpo



Por cada proton/neutron/electron el
Universo contiene diez mil millones
de neutrinos del Big Bang

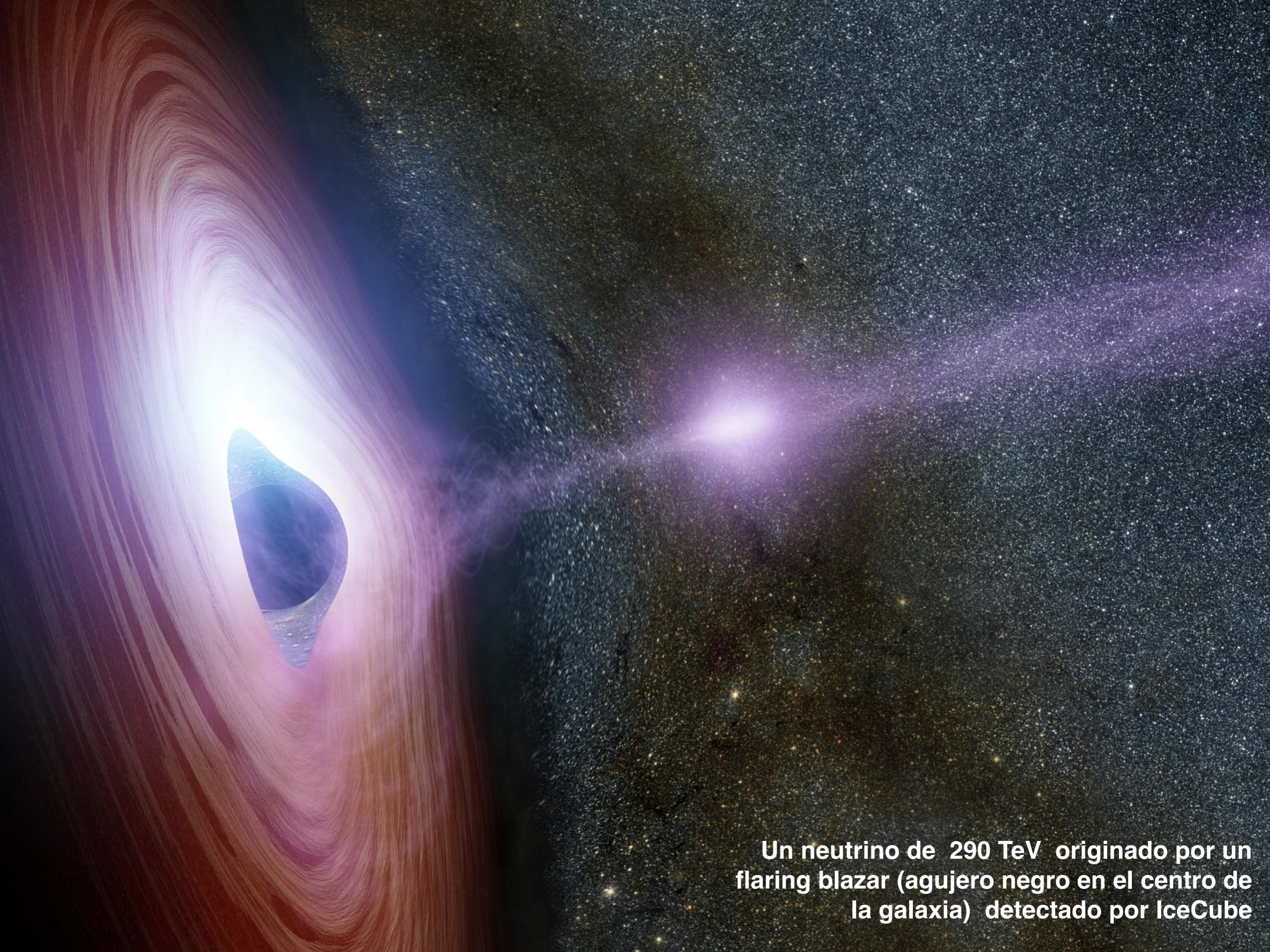


**99% de la energía producida en
la explosión de una supernova
se la llevan los neutrinos**

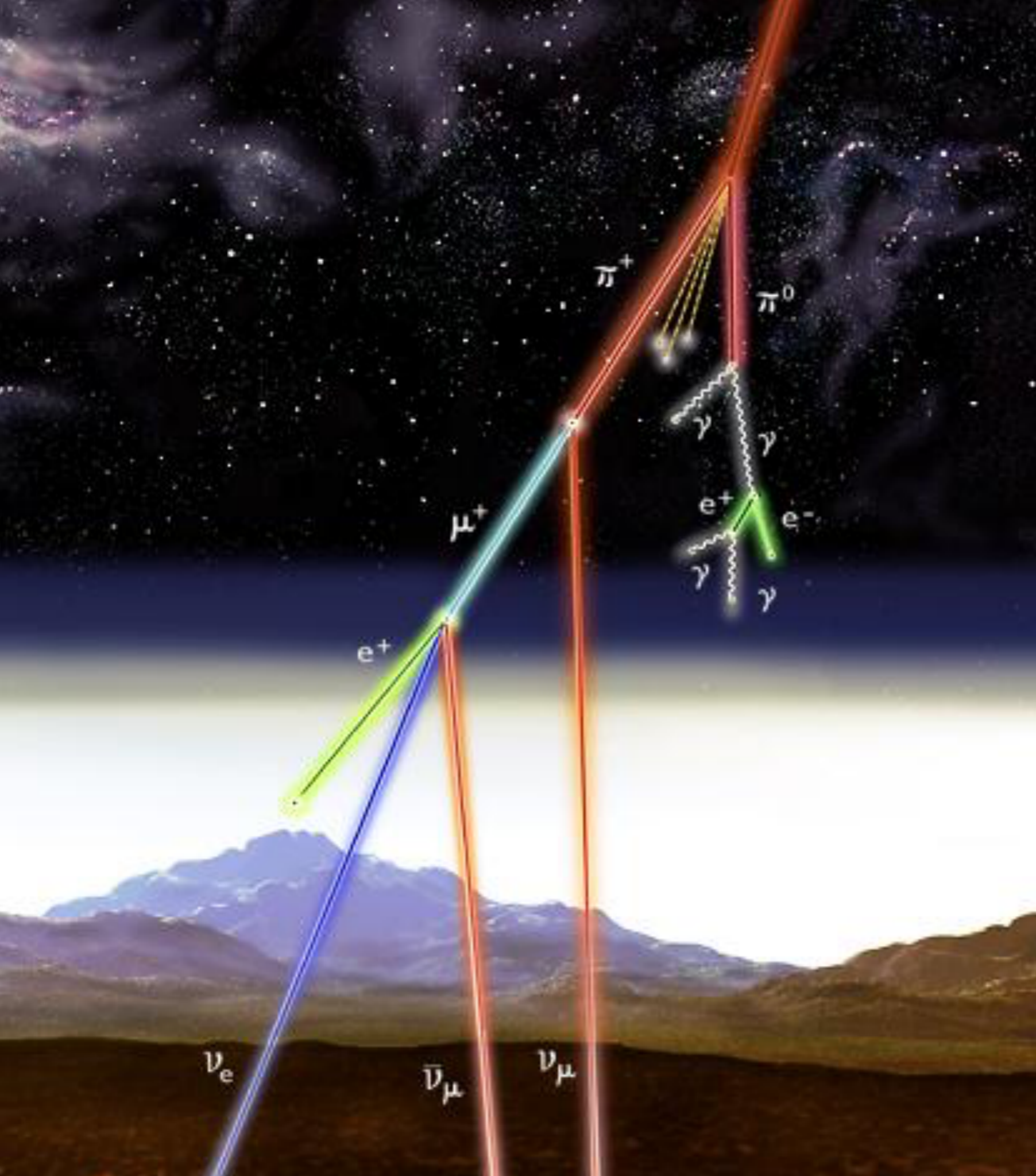


**10^{38} neutrinos por segundo
producidos por el sol**

(con un flujo de $\sim 10^{11}/\text{cm}^2/\text{sec}$ en la Tierra)



Un neutrino de 290 TeV originado por un flaring blazar (agujero negro en el centro de la galaxia) detectado por IceCube



Neutrinos también se producen en la atmósfera





Fermilab

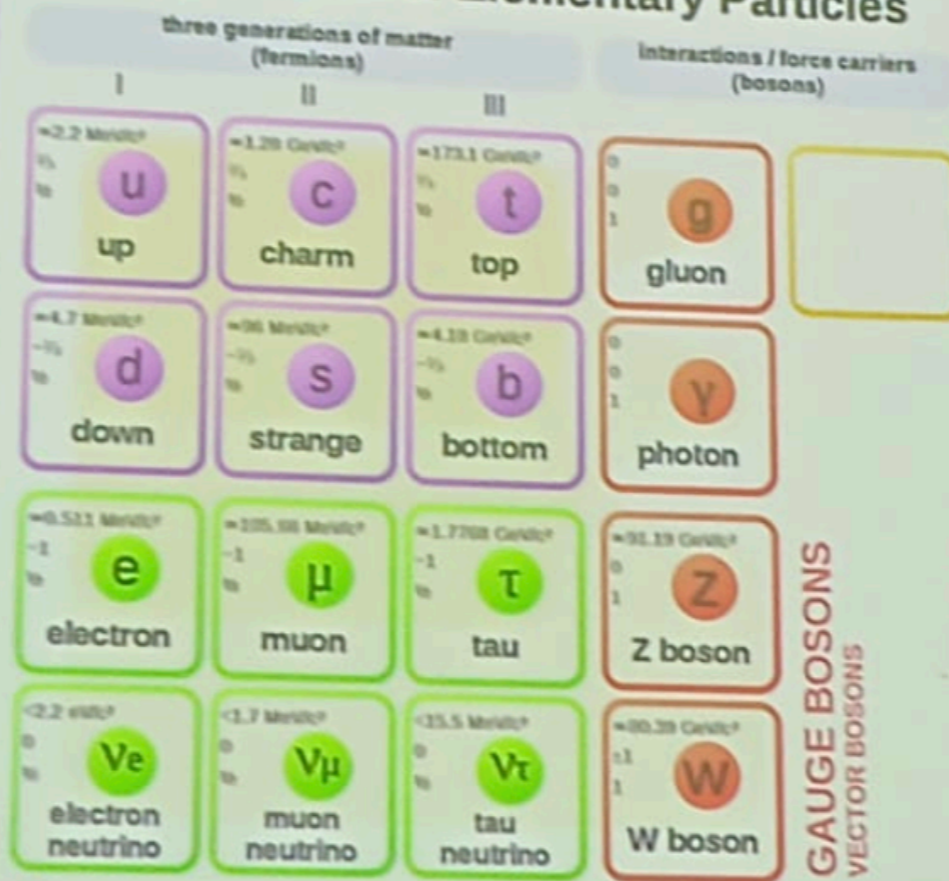


El Modelo Estándar de la física de partículas

- **Quarks:** forman protones y neutrones +...
- Sienten la interacción fuerte (+ em y débil)
- No hay quarks libres en la naturaleza

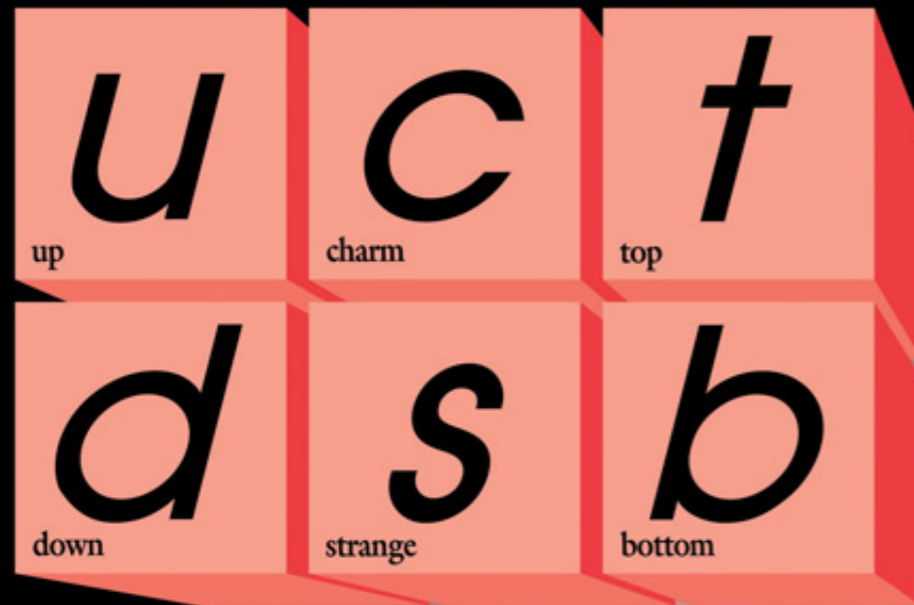
- **Leptones:** sienten la interacción electromagnética y/o la débil

Standard Model of Elementary Particles

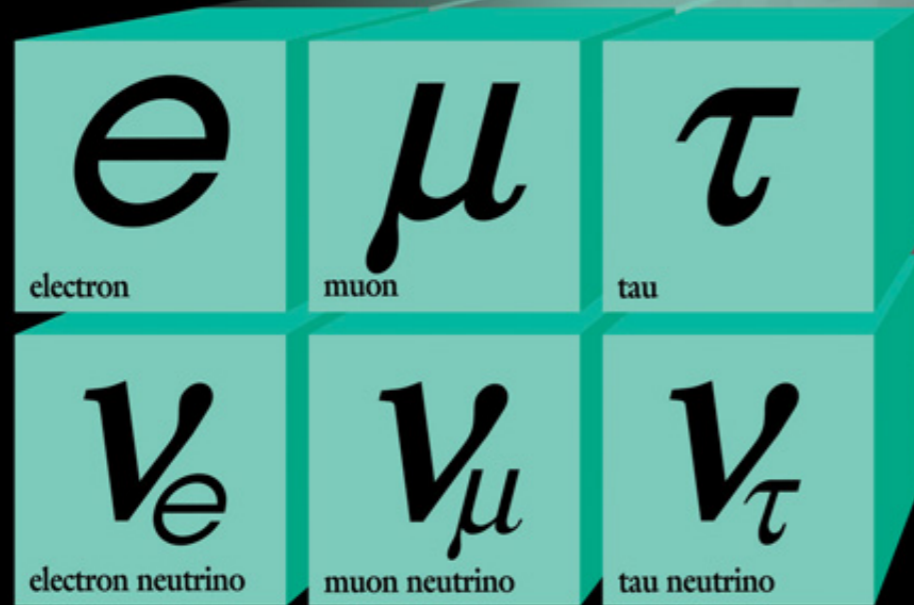
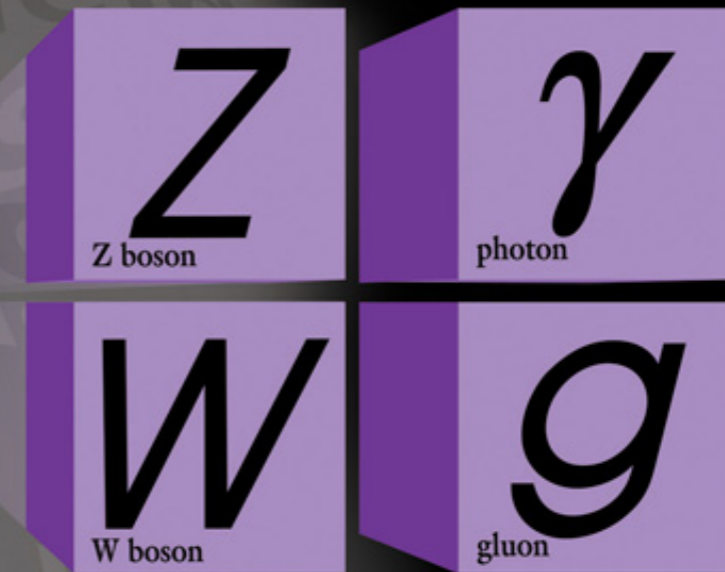


- **Bosones:** son los mediadores de las fuerzas electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil.

Quarks



Forces

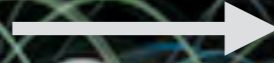


Leptons

Las oscilaciones de neutrinos fueron descubiertas en 1998

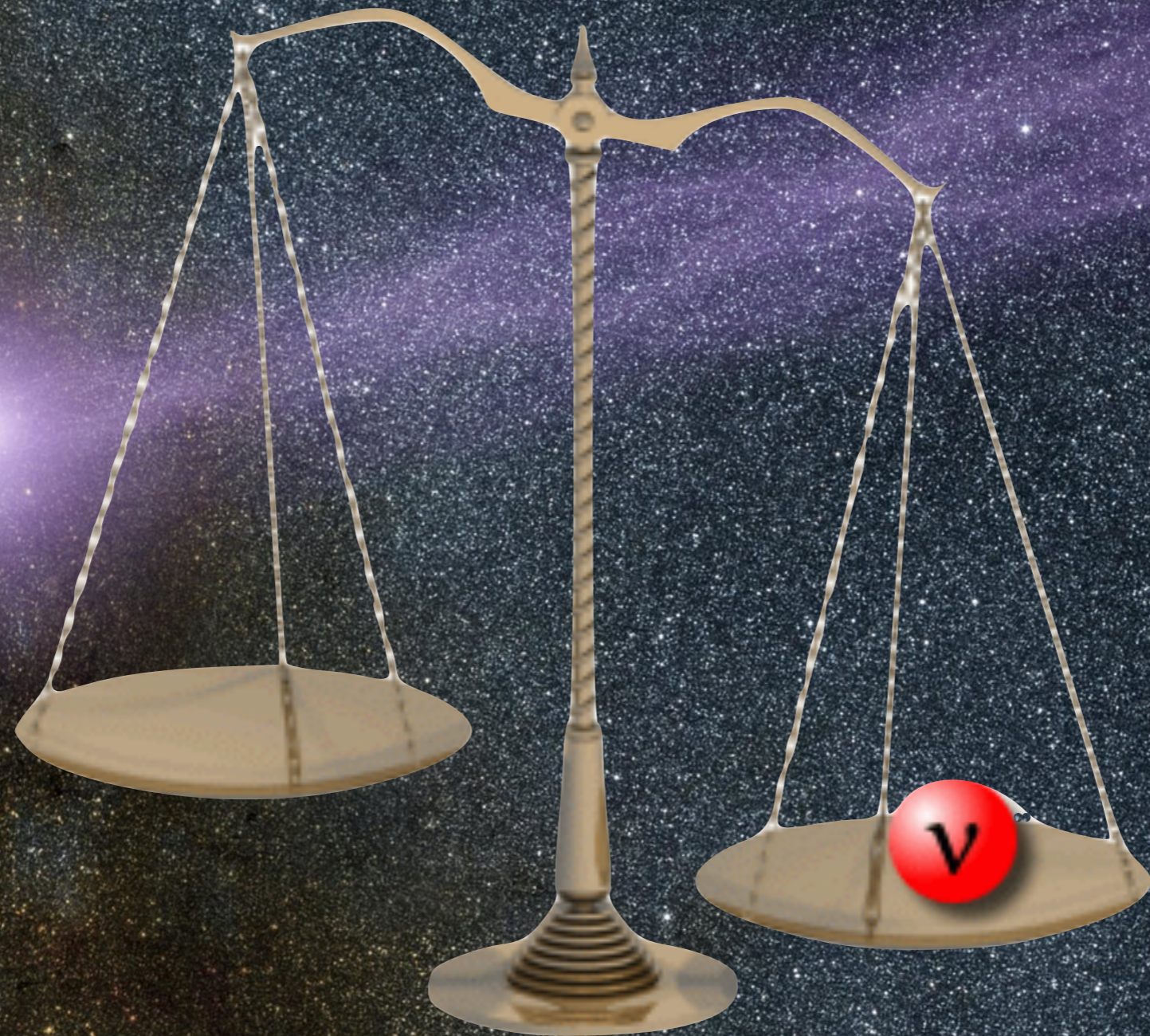
Cambio de sabor en vuelo

ν_{μ}
muon neutrino



ν_{τ}
tau neutrino

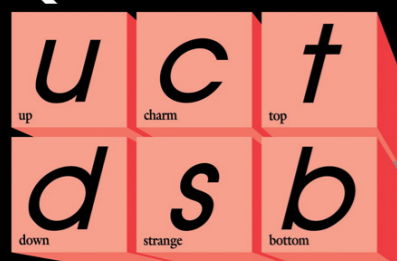




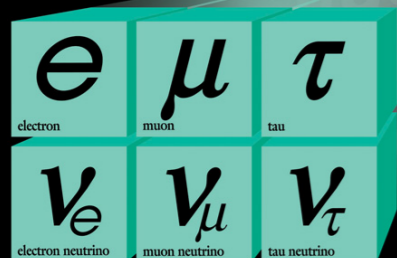
1998

Unica prueba de Física más allá del Modelo Stándard

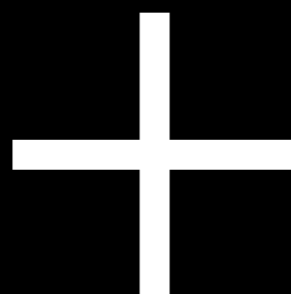
Quarks



Forces

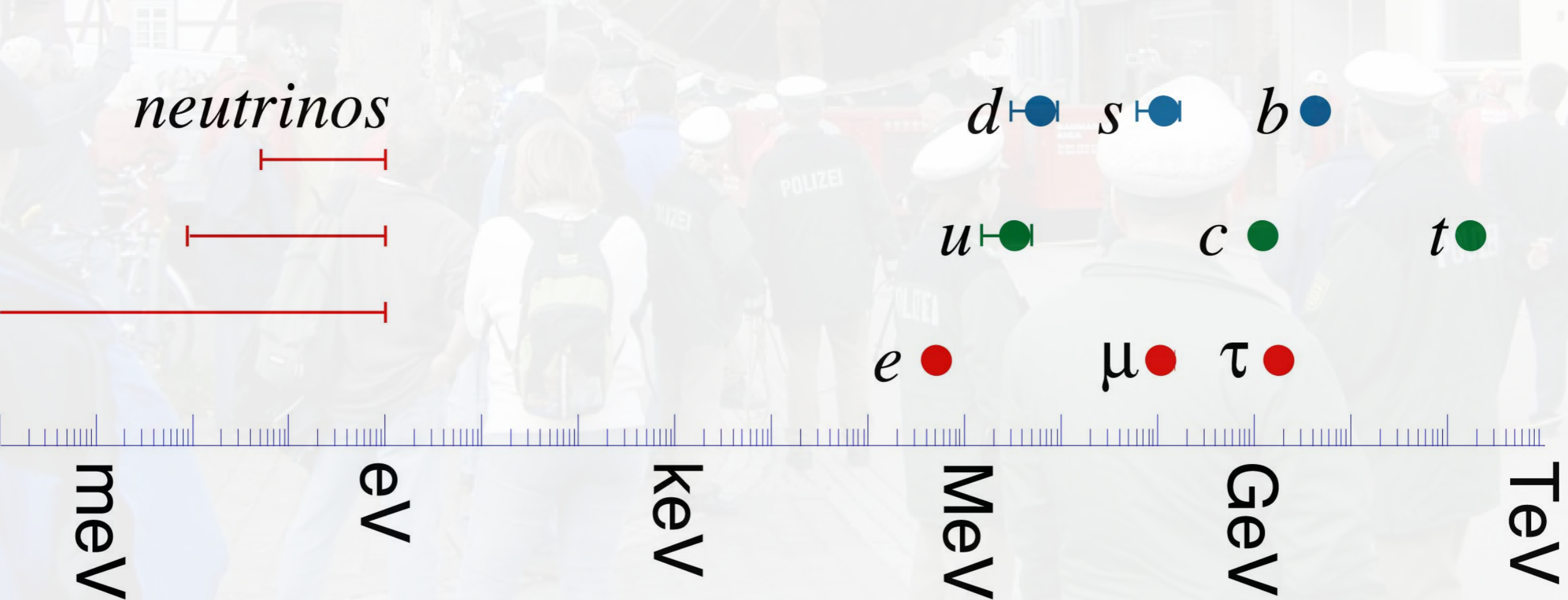


Leptons



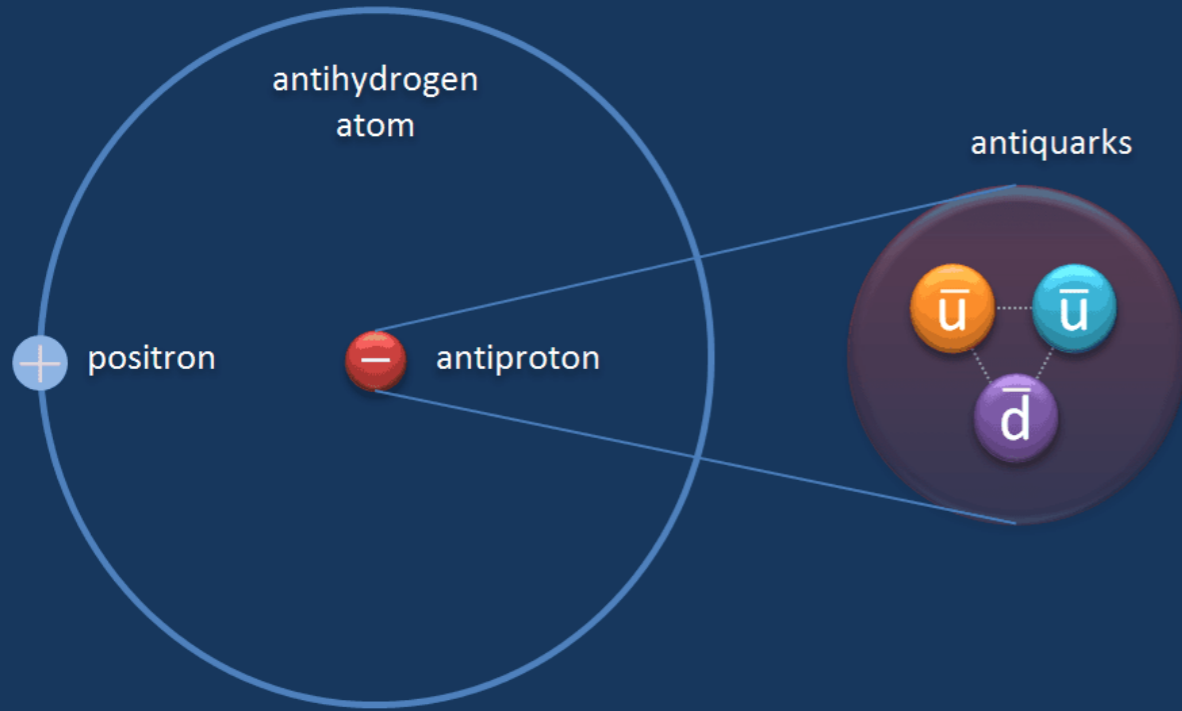
1973

1998

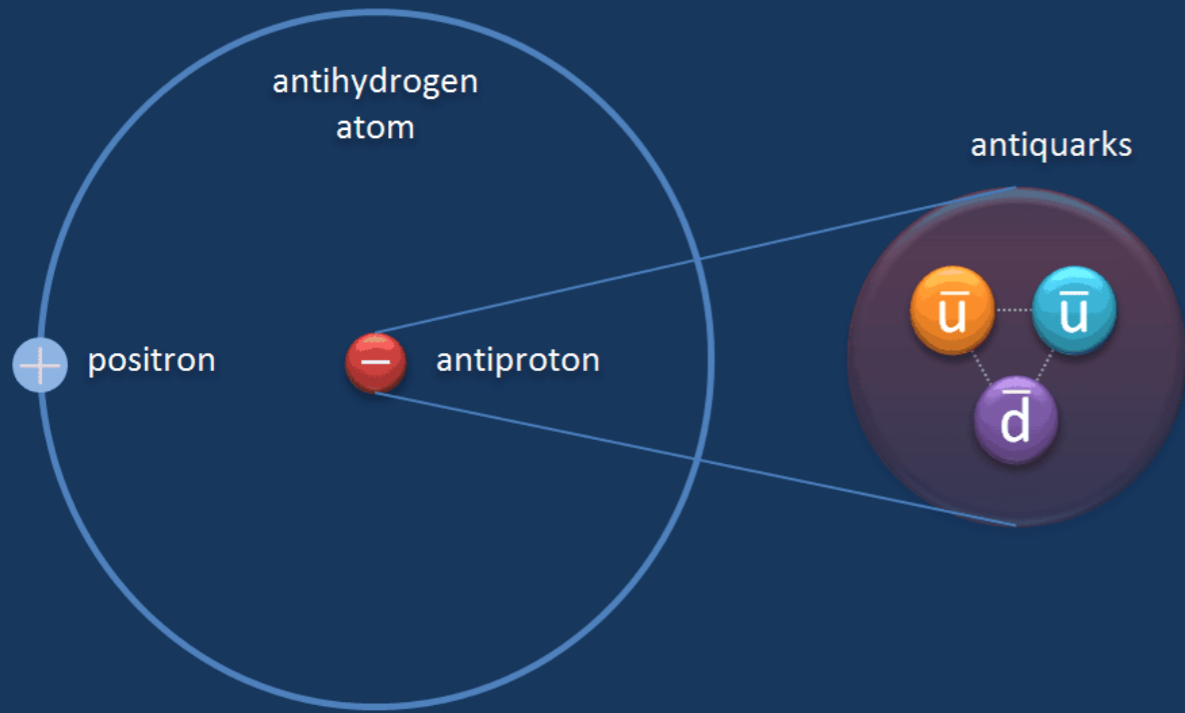




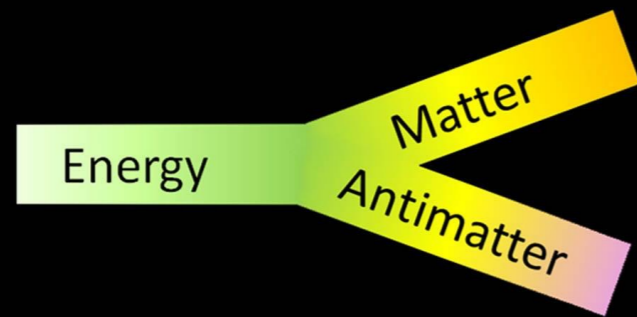
Antimatter



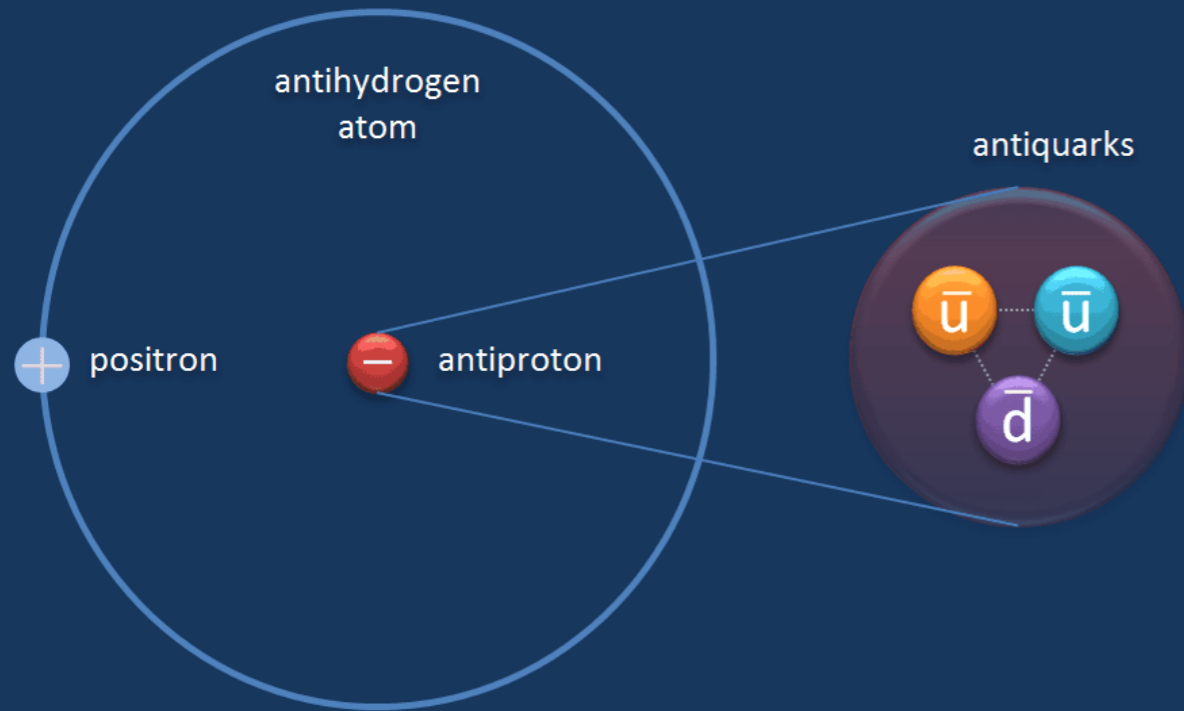
Antimatter



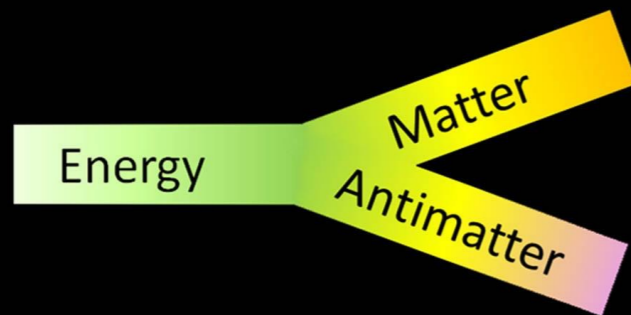
$$E=mc^2$$



Antimatter



$$E=mc^2$$



BASE experiment at CERN succeeds in transporting antimatter

The experiment successfully transported a trap filled with antiprotons across CERN's main site, a remarkable first step towards delivering antimatter to other European laboratories

24 MARCH, 2026



Truck transporting the BASE-STEP trap filled with antiprotons (Image: CERN)

Hace 13000 millones de años el Big Bang produjo iguales cantidades de materia y antimateria



Hace 13000 millones de años el Big Bang produjo iguales cantidades de materia y antimateria



Hace 13000 millones de años el Big Bang produjo iguales cantidades de materia y antimateria



Pero por alguna razón la anti-materia fue aniquilada. Por qué ?

Hace 13000 millones de años el Big Bang produjo iguales cantidades de materia y antimateria



Pero por alguna razón la anti-materia fue aniquilada. Por qué ?

Los neutrinos podrían tener la respuesta: **violación de CP**

¿Cuál es la masa absoluta de los neutrinos ?

¿Cuál es la masa absoluta de los neutrinos ?

¿Violan los neutrinos la simetría CP ?

¿Cuál es la masa absoluta de los neutrinos ?

¿ Violan los neutrinos la simetría CP ?

**¿ Hay mas de tres neutrinos ?
neutrinos estériles**

¿Cuál es la masa absoluta de los neutrinos ?

¿ Violan los neutrinos la simetría CP ?

**¿ Hay mas de tres neutrinos ?
neutrinos estériles**

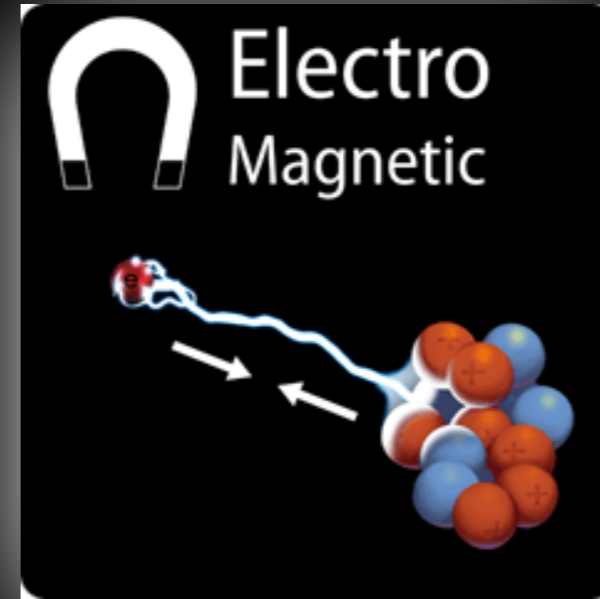
**¿ Es el neutrino su propia antipartícula ?
Dirac o Majorana**



**Para responder a estas preguntas
es fundamental conocer en detalle
“como y cuanto”
interaccionan los neutrinos**

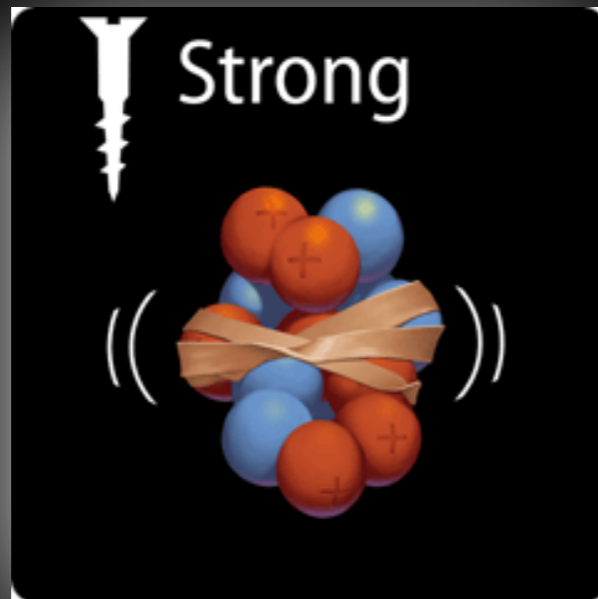
Detectar neutrinos no es fácil

Gravedad



Electro-
magnetismo

Fuerza
nuclear **fuerte**



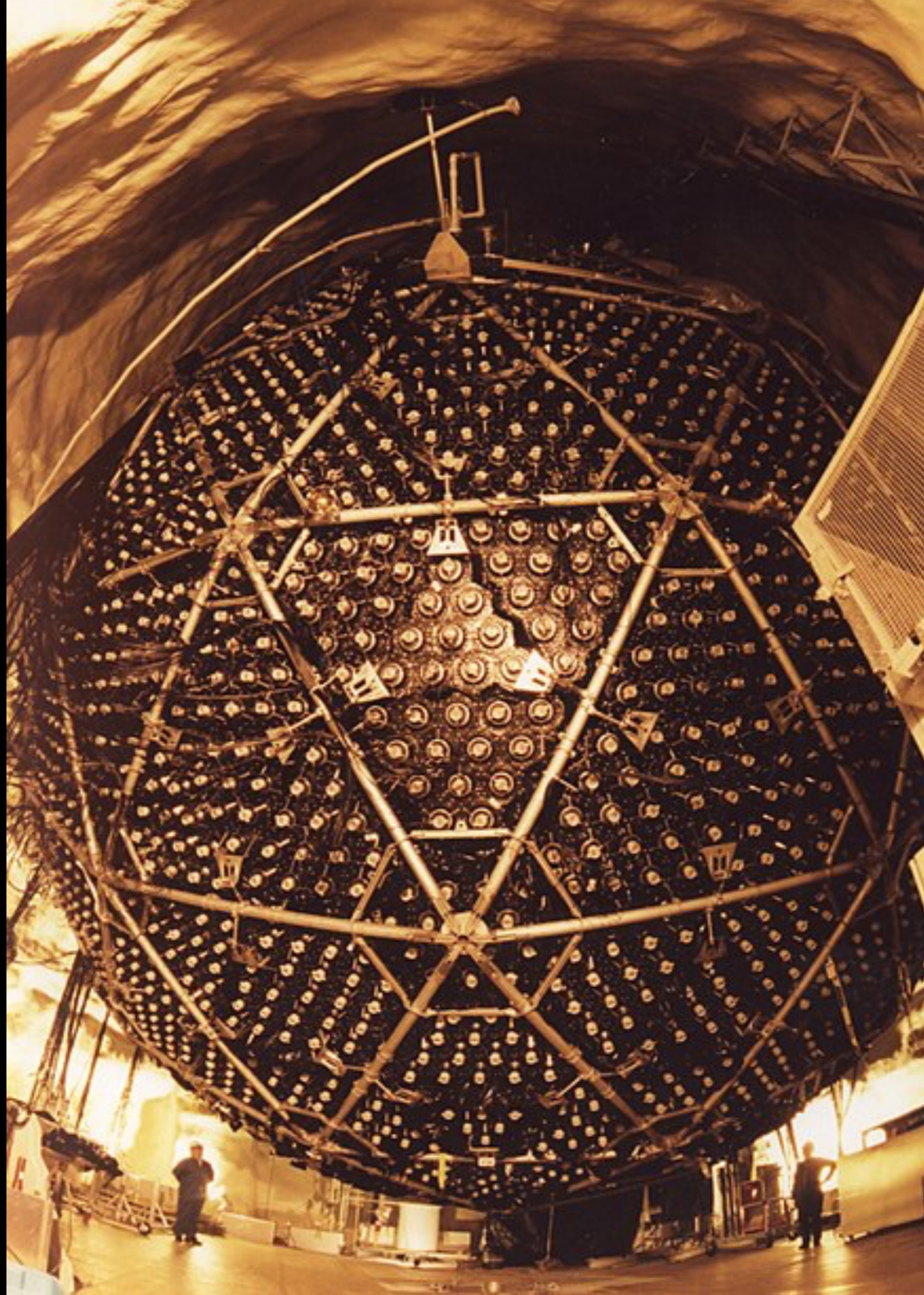
Fuerza nuclear
débil

La timidez de los neutrinos

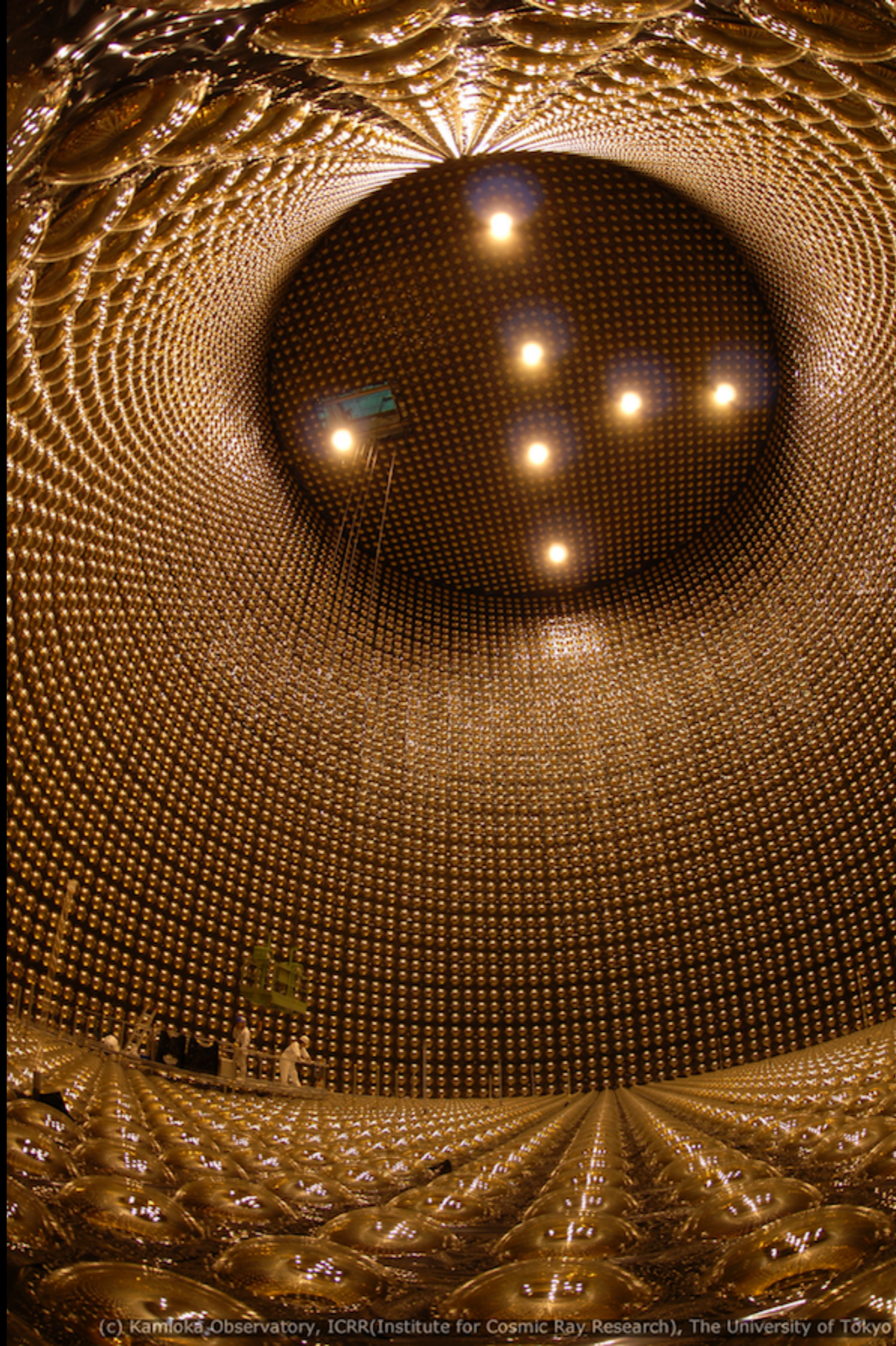
- Los neutrinos son muy tímidos y no interaccionan con nada ni con nadie
- Un neutrino solar tiene que cruzarse con 10,000,000,000,000,000,000 personas antes de interaccionar
- Por ello no fueron **descubiertos hasta 1956**, pese a ser las partículas más abundantes después del fotón (las partículas de luz)

**Por eso los detectores de
neutrinos son enormes**





Super-Kamiokande (Japón)



Pero hay un problema añadido



Los rayos cósmicos producen
> 100 muones/seg/m²



A no ser que el flujo de neutrinos sea muy superior al de muones cósmicos, buscar neutrinos será como buscar una aguja en un pajar



La mayoría de detectores de neutrinos se sitúan a gran profundidad bajo tierra para evitar los rayos cósmicos

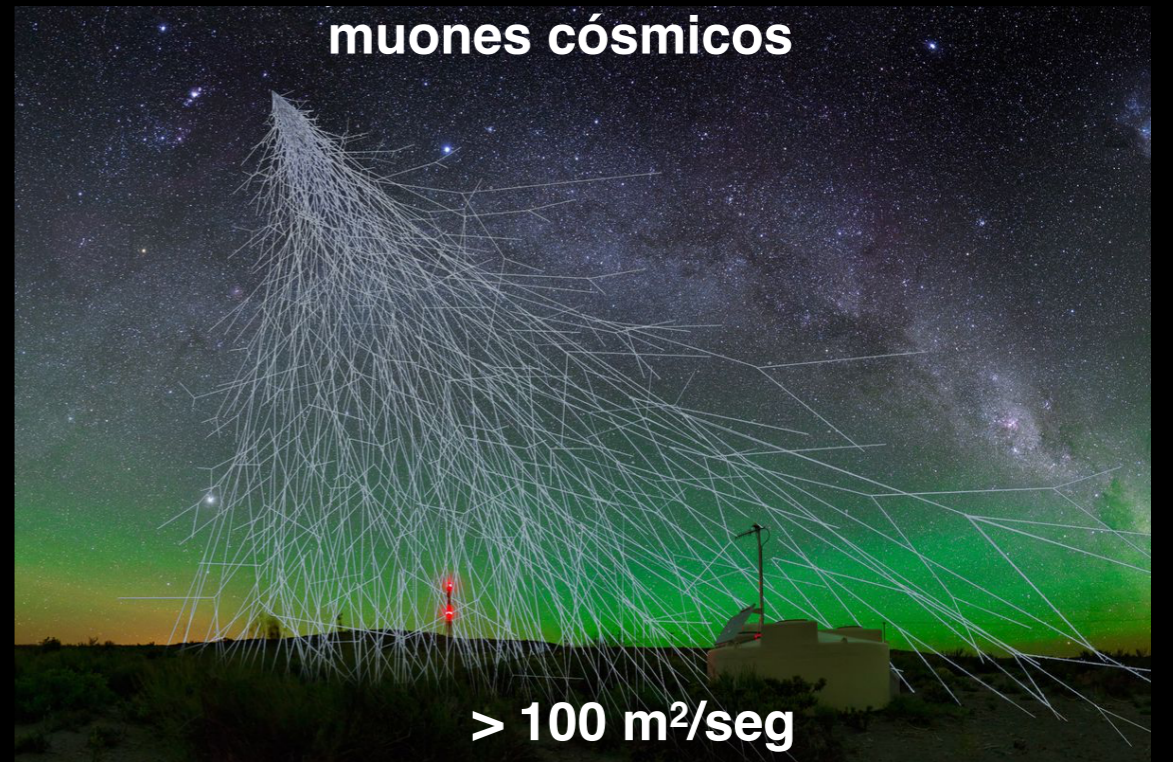
reducción de 10^{-6} para DUNE, 1.5 km bajo tierra

neutrinos del sol



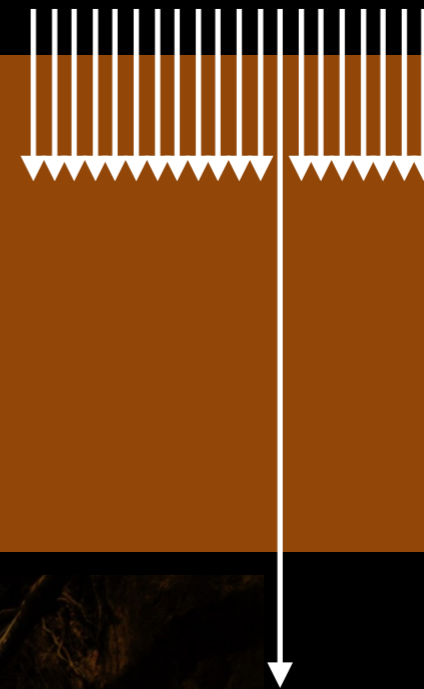
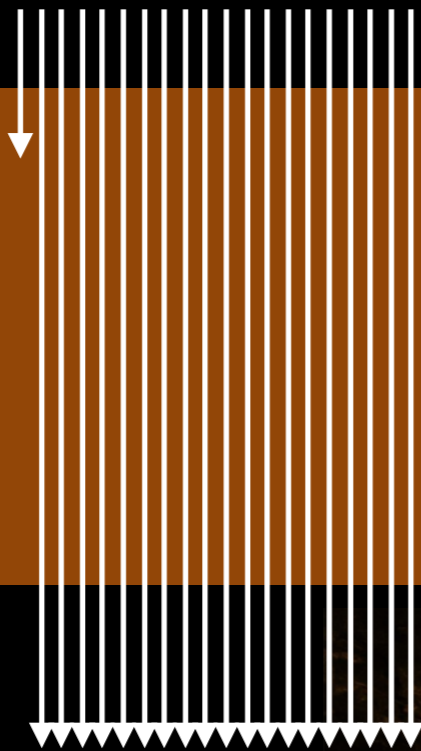
$\sim 10^{13}/\text{m}^2/\text{sec}$

muones cósmicos



$> 100 \text{ m}^2/\text{seg}$

1.5 km

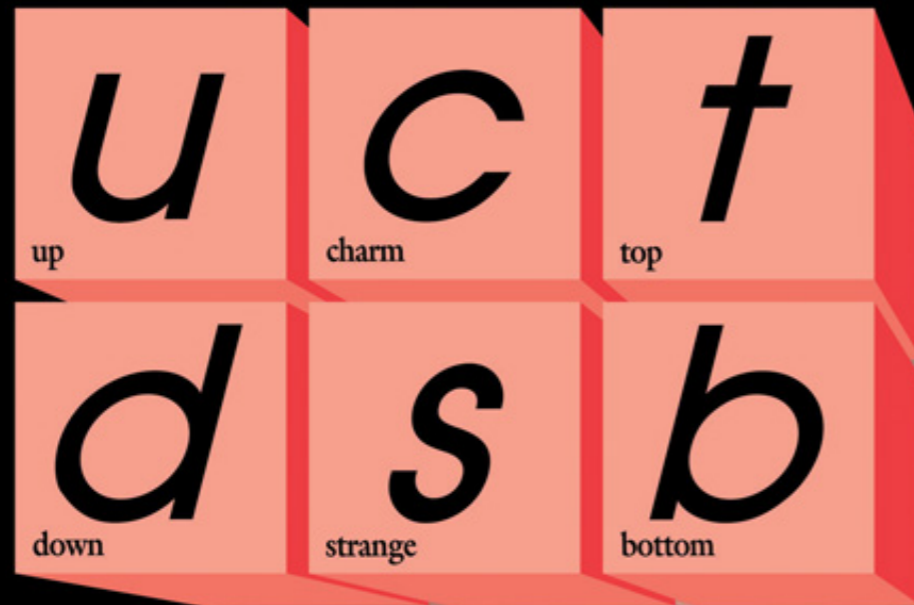


Es tan brutal el flujo de neutrinos proveniente del sol, o de la atmósfera, que no nos importa la cantidad de materia que los separe del detector

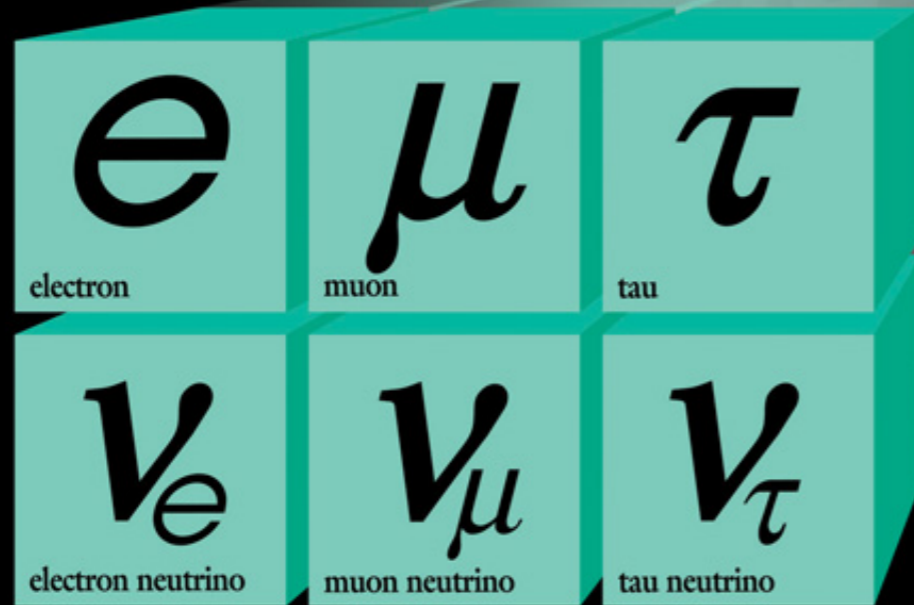
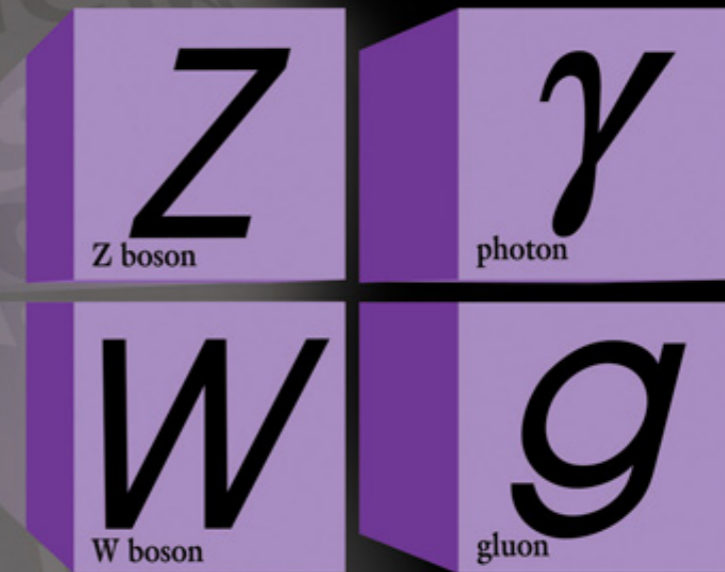
Pero si no les importa cuanta materia pongamos
delante, ¿ como es posible detectarlos ?

El flujo de neutrinos es tan grande,
que aunque solo interaccione uno de cada
1.000.000.000.000.000.000.000
será suficiente para intentar entenderlos

Quarks

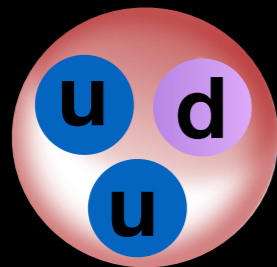


Forces

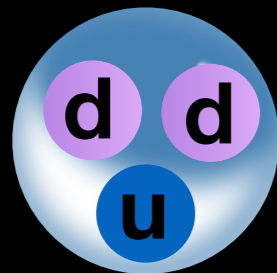


Leptons

3 quarks (bariones)

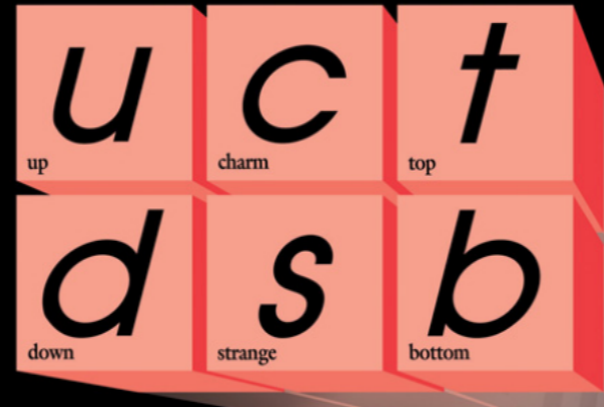


protón



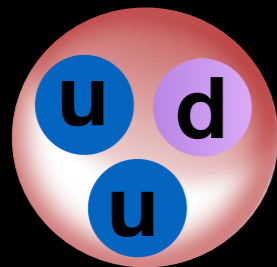
neutrón

Quarks

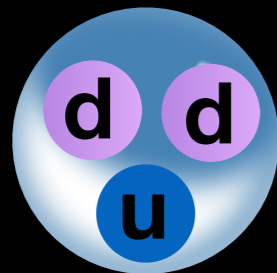


Hadrones

3 quarks
(bariones)



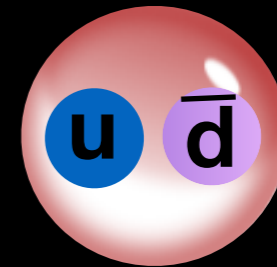
protón



neutrón

$M \sim 1 \text{ GeV}$

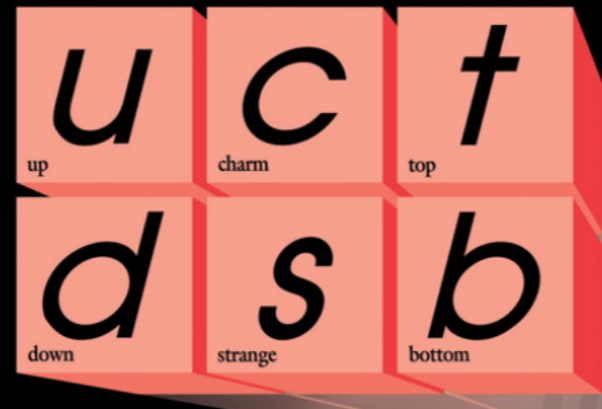
2 quarks
(mesones)



pión positivo (π^+)

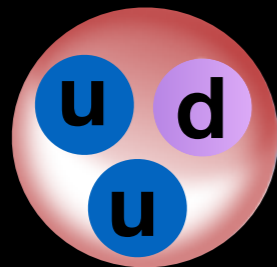
$M \sim 0.15 \text{ GeV}$

Quarks

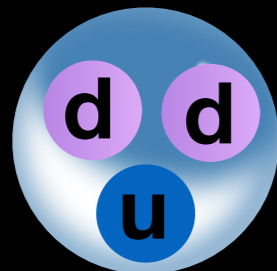


Hadrones

3 quarks
(bariones)

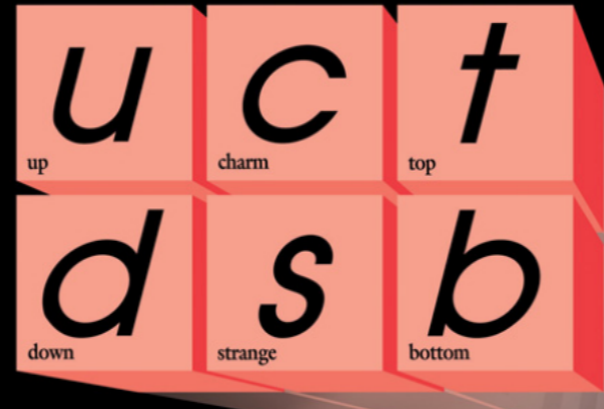


protón

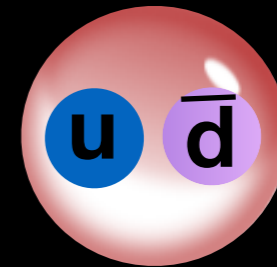


neutrón

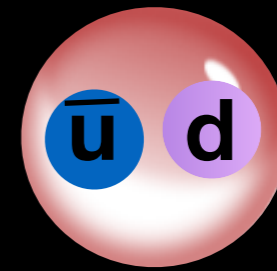
Quarks



2 quarks
(mesones)



pión positivo (π^+)

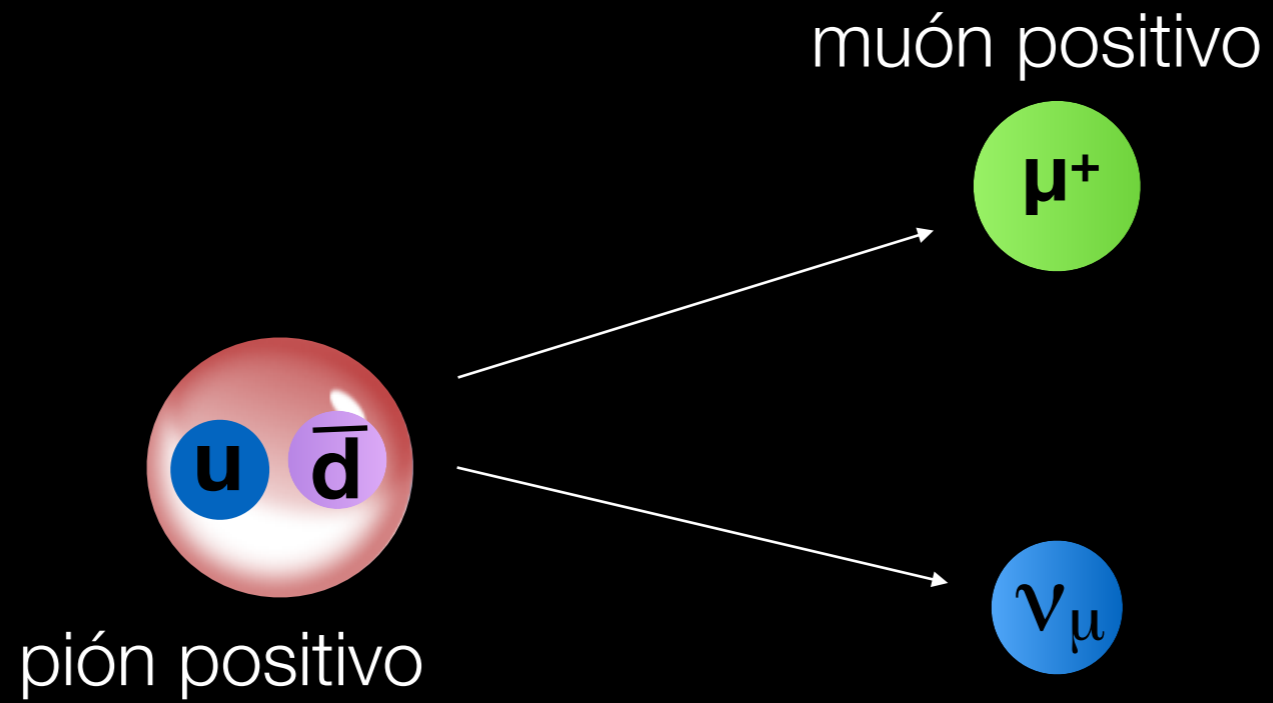


pión negativo (π^-)

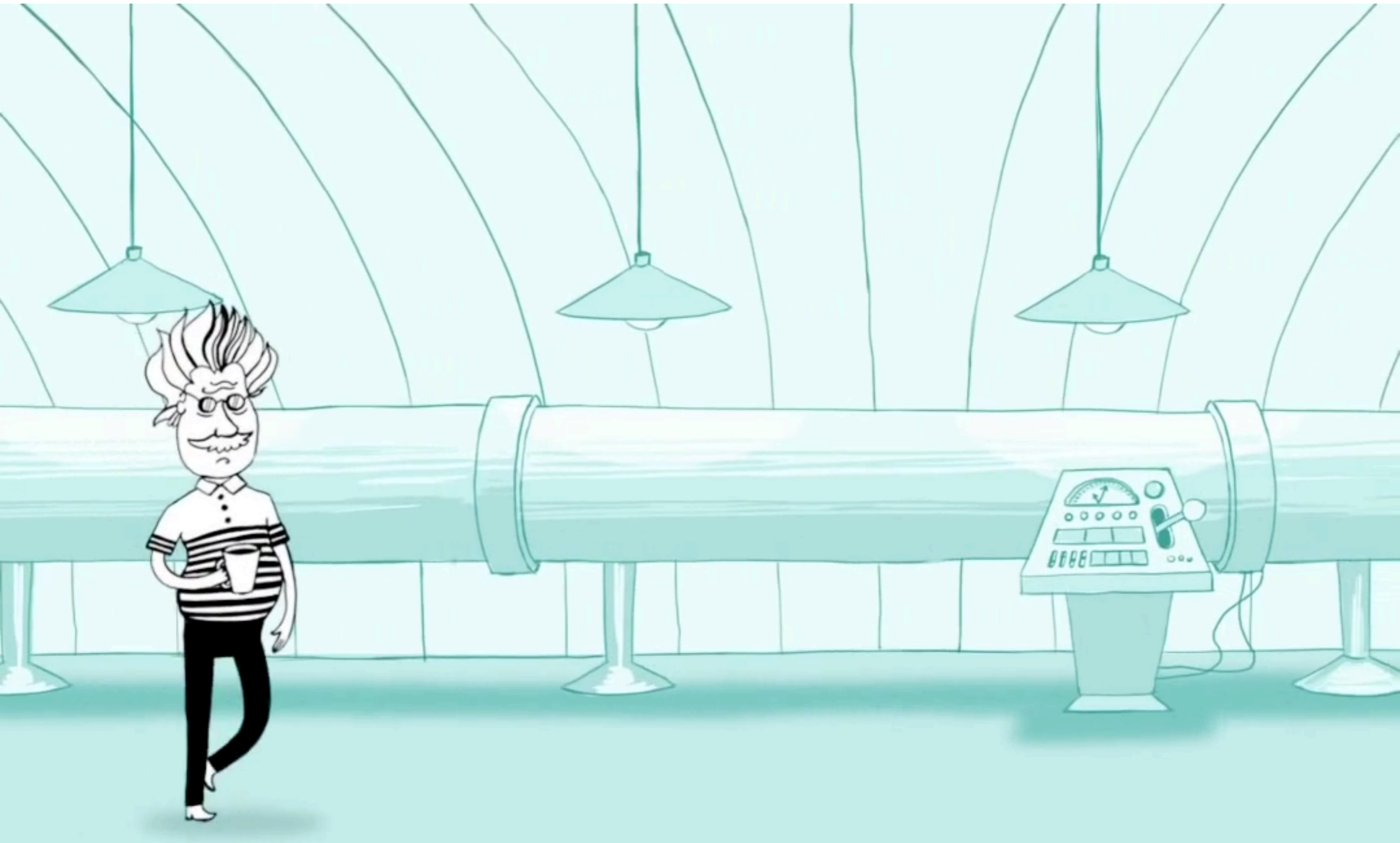
$M \sim 1 \text{ GeV}$

$M \sim 0.15 \text{ GeV}$

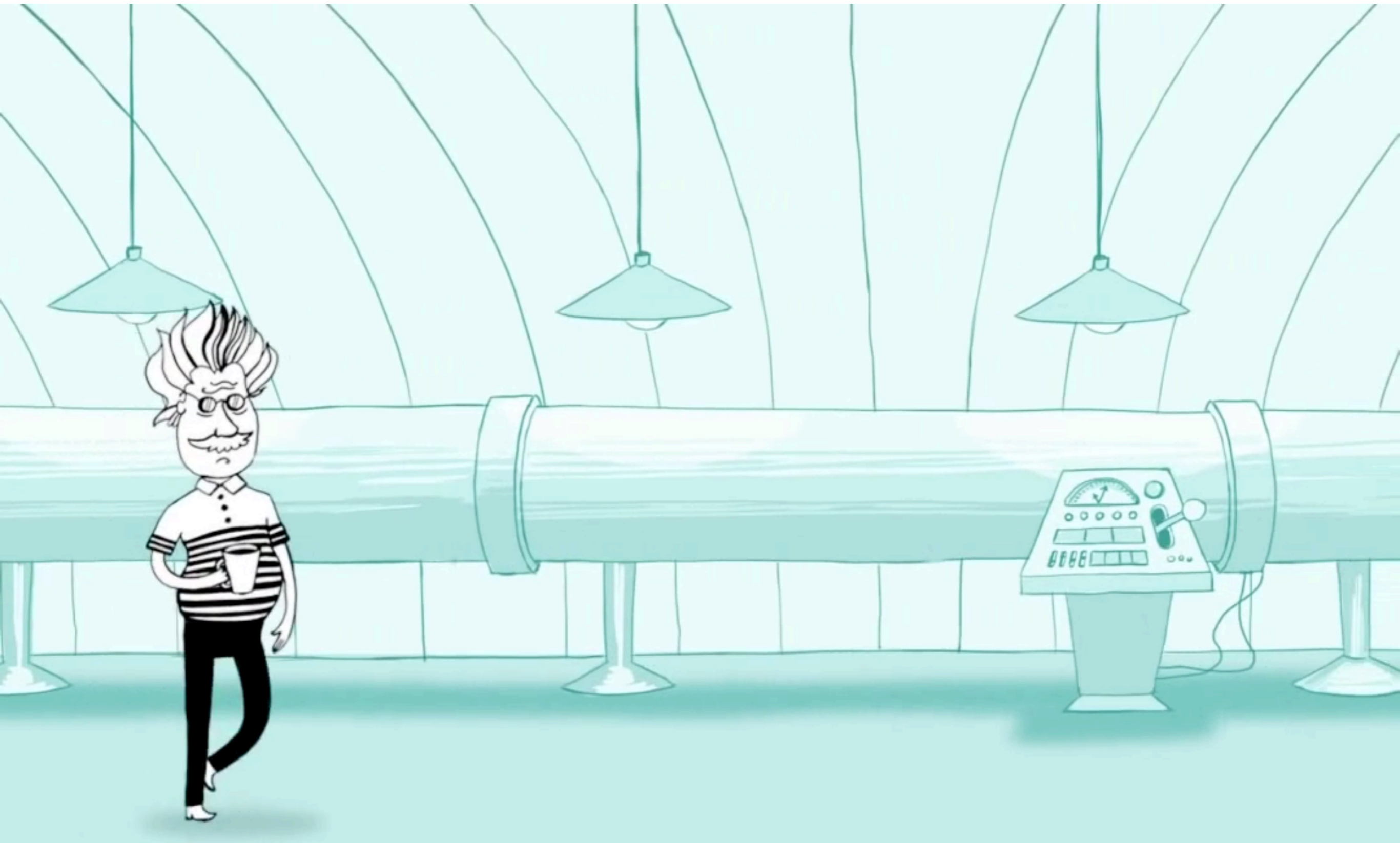
La desintegración del pión

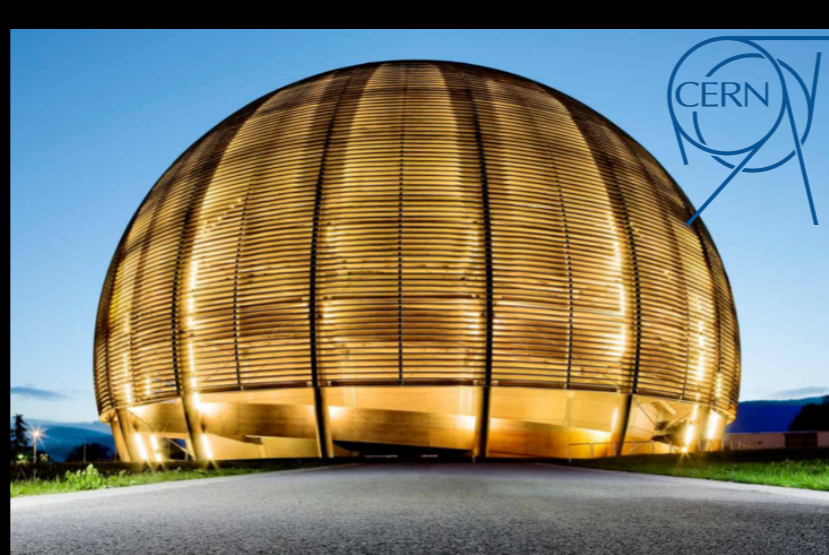


Como hacer un haz de neutrinos



Como hacer un haz de neutrinos







 **Fermilab**

Experiments

Operating

- NOvA
- ICARUS
- ANNIE
- SBND

Designing and Building

- DUNE

Analyzing, Finished Running

- ArgoNeuT
- LArIAT
- MicroBooNE
- MINERvA
- MiniBooNE
- MINOS / MINOS+

OSCILACIONES DE NEUTRINOS

Dakota del Sur

Fermilab

1300 Km

> 99% neutrinos muónicos
~ 4% oscilan a neutrinos electrónicos

OSCILACIONES DE NEUTRINOS

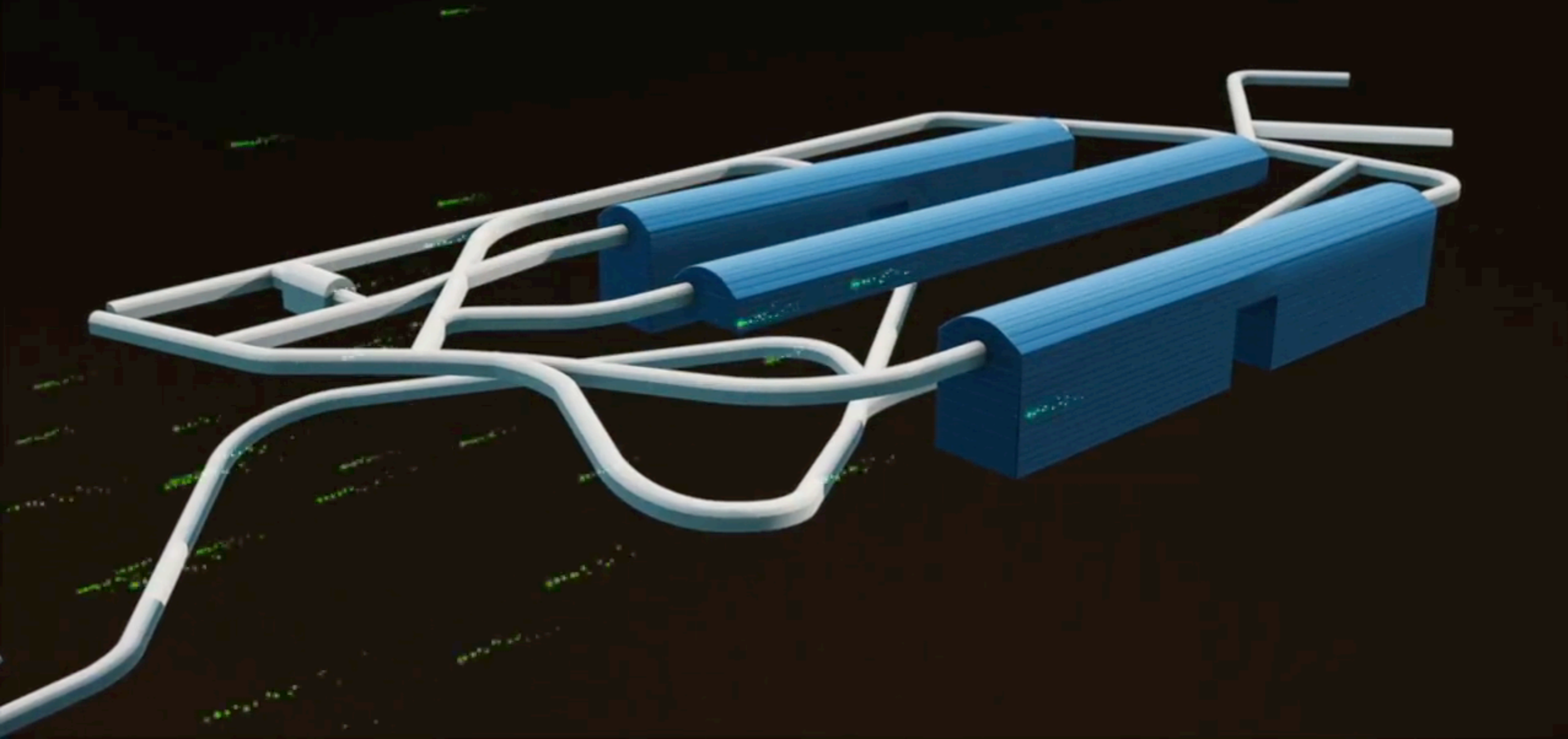
Dakota del Sur

Fermilab

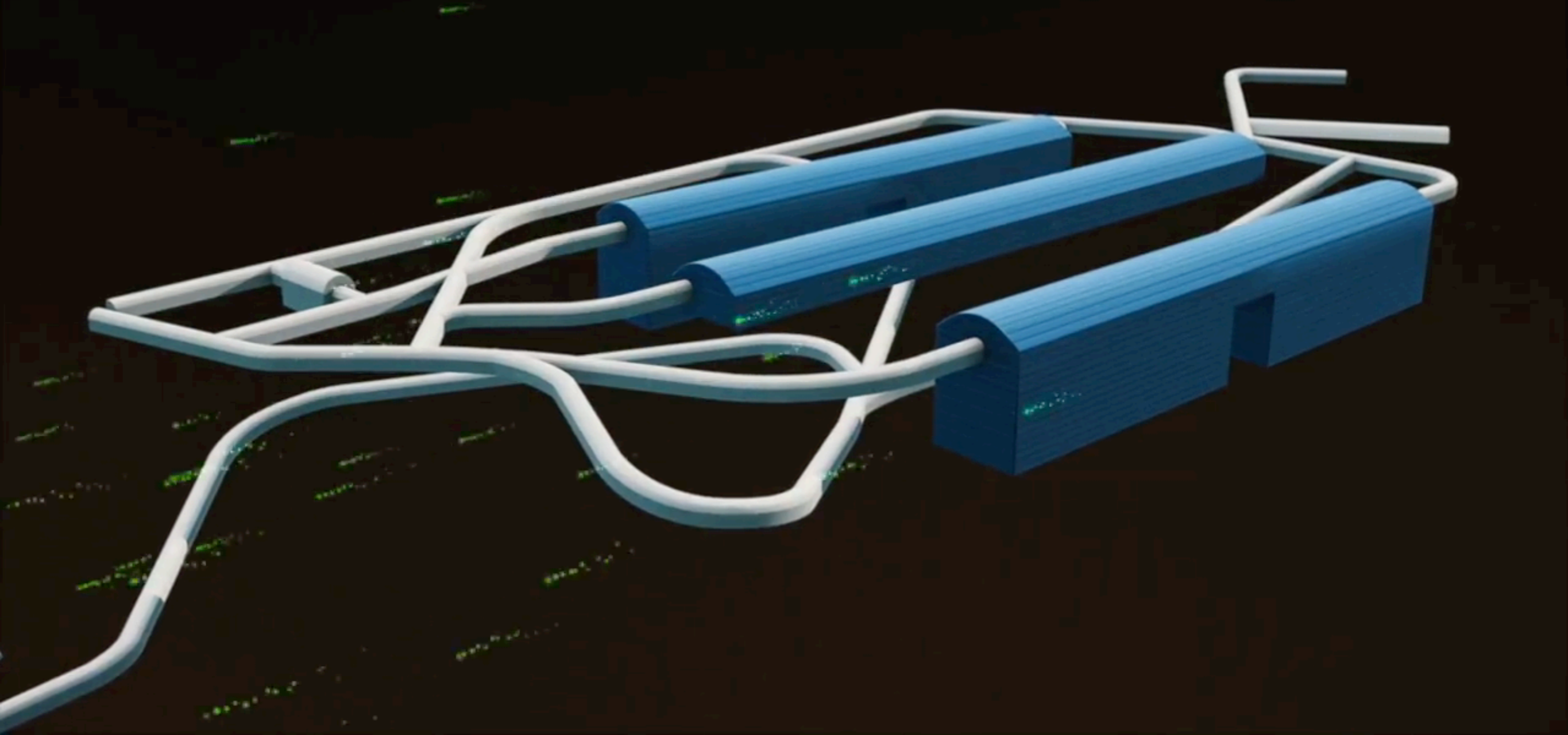
1300 Km

> 99% neutrinos muónicos
~ 4% oscilan a neutrinos electrónicos

¿ COMO INTERACCIONAN LOS NEUTRINOS ?

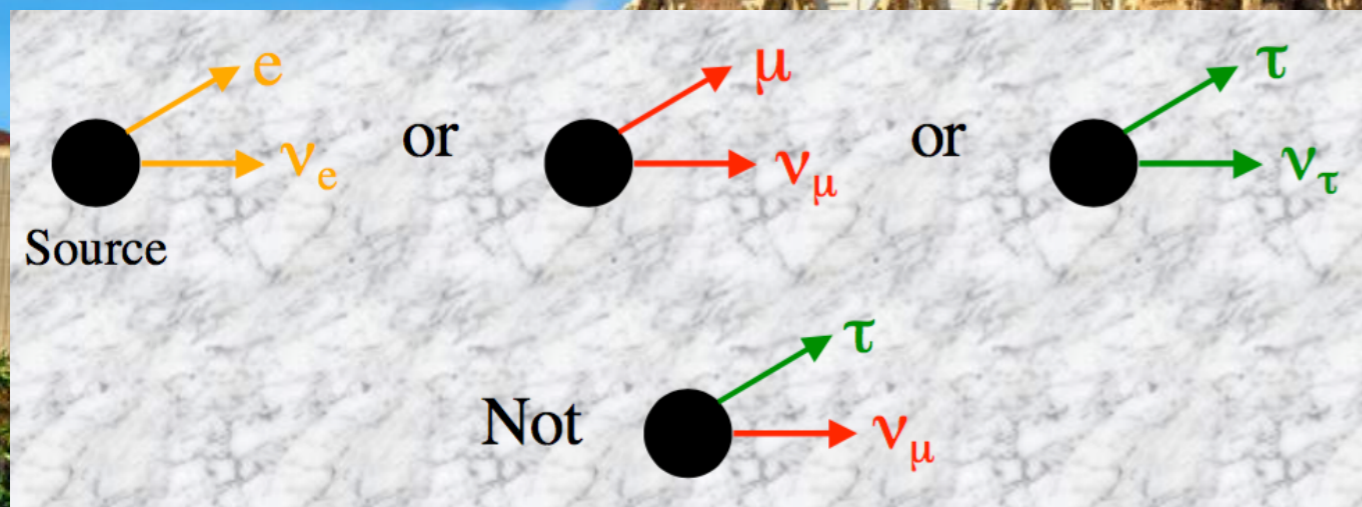


¿ COMO INTERACCIONAN LOS NEUTRINOS ?



La sagrada familia

- En la naturaleza y en el laboratorio un neutrino siempre es producido junto a su compañero cargado

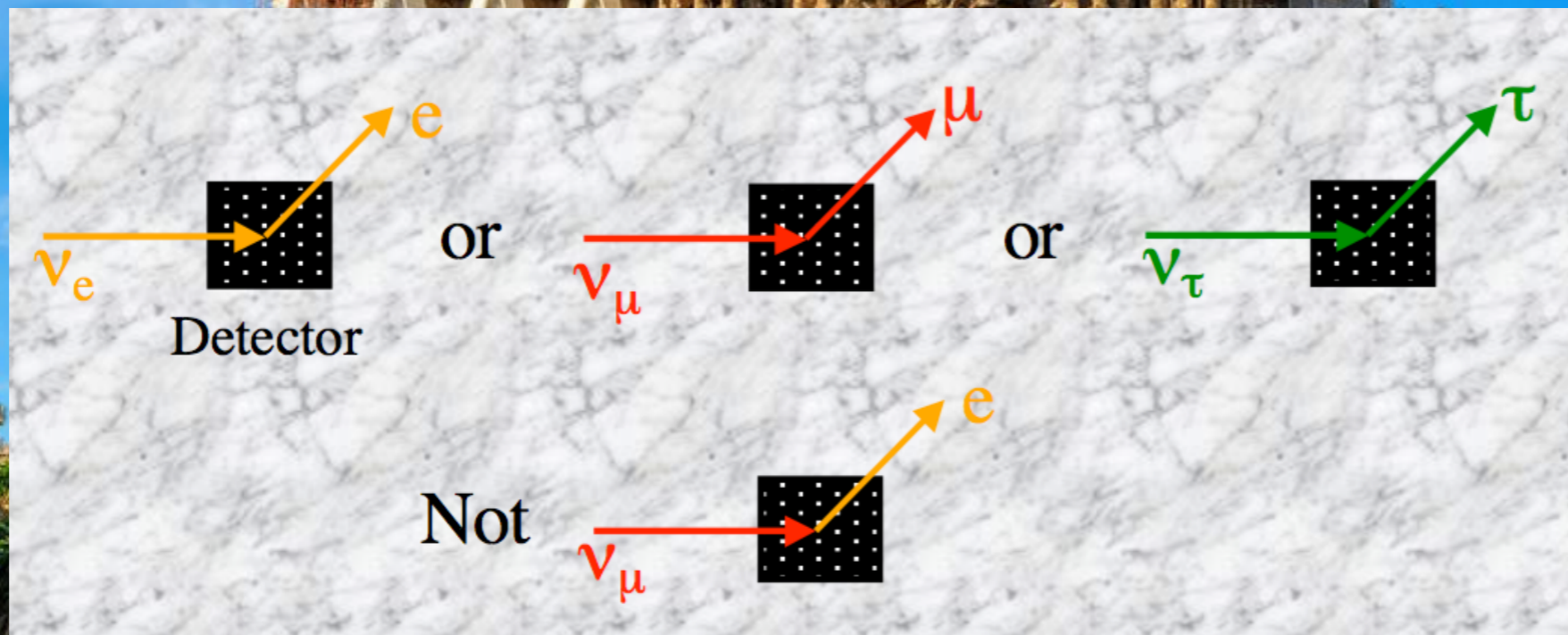


leptones

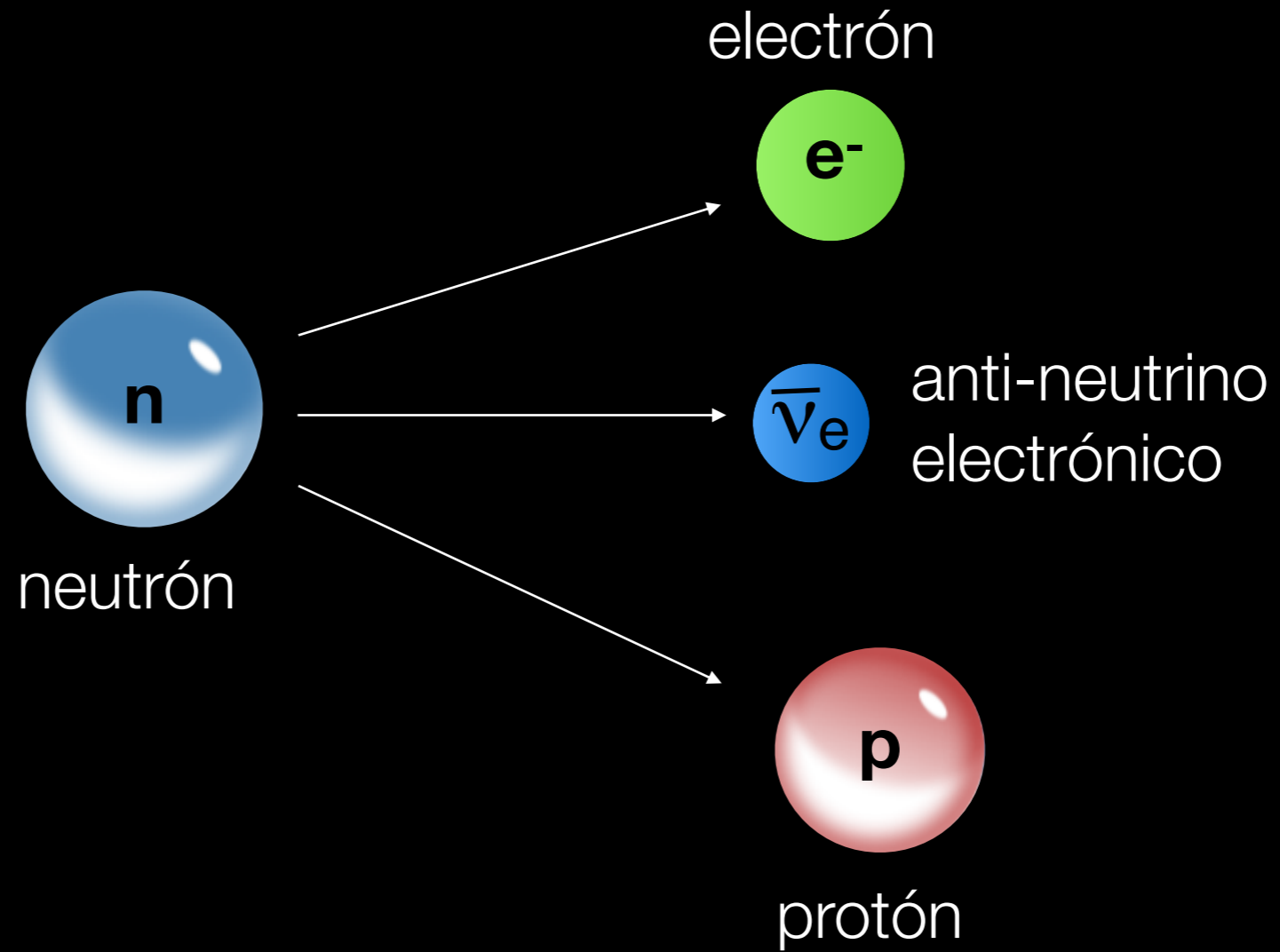
e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

Endogamia en los leptones

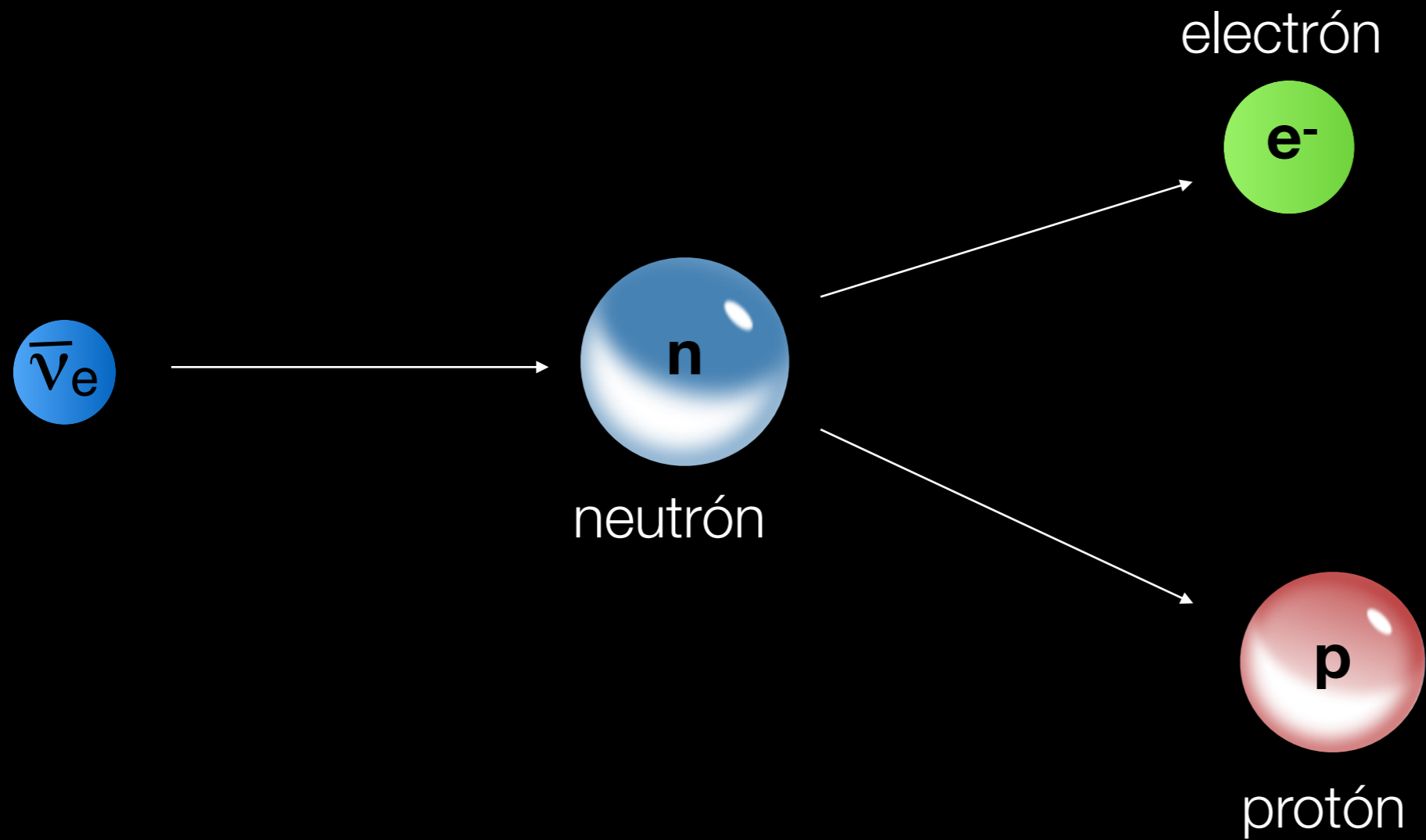
- cuando un neutrino interactuación con un átomo de un detector produce un leptón de su misma familia
- Distinguimos un neutrino de otro por el leptón cargado que produce



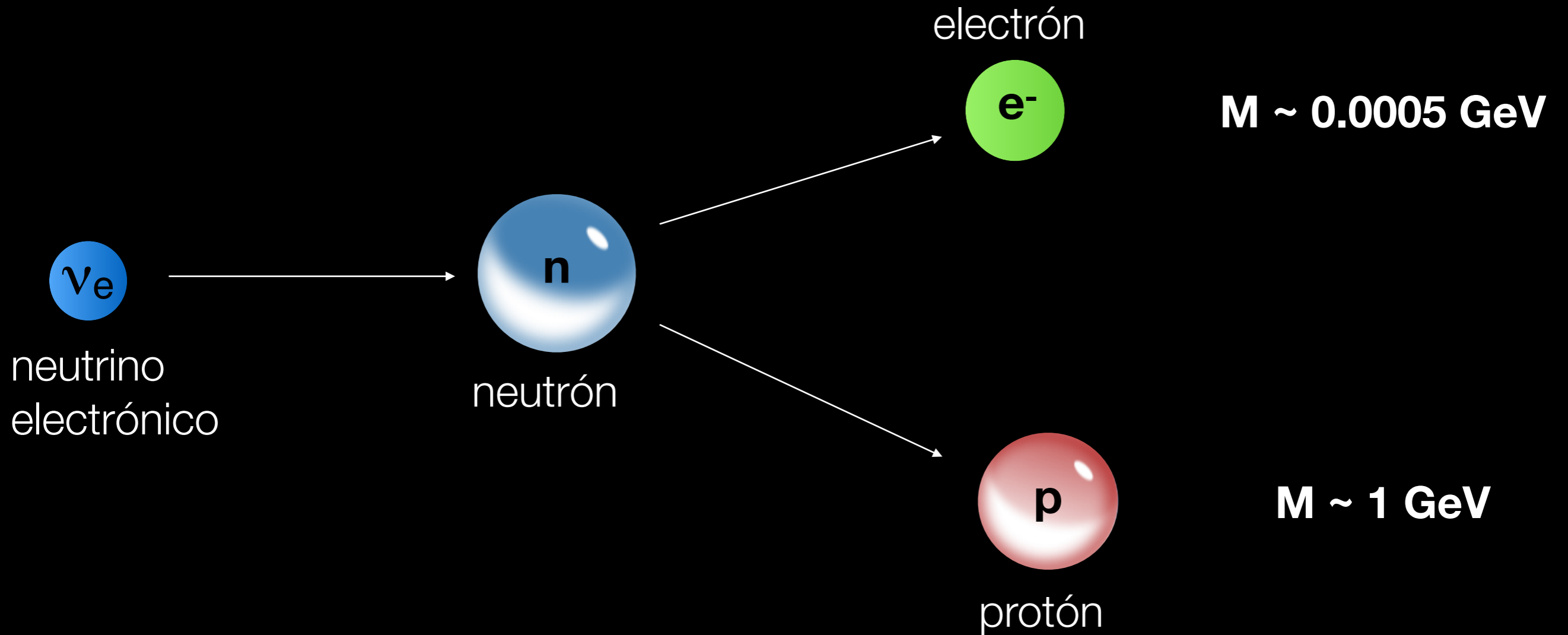
desintegración Beta



desintegración Beta

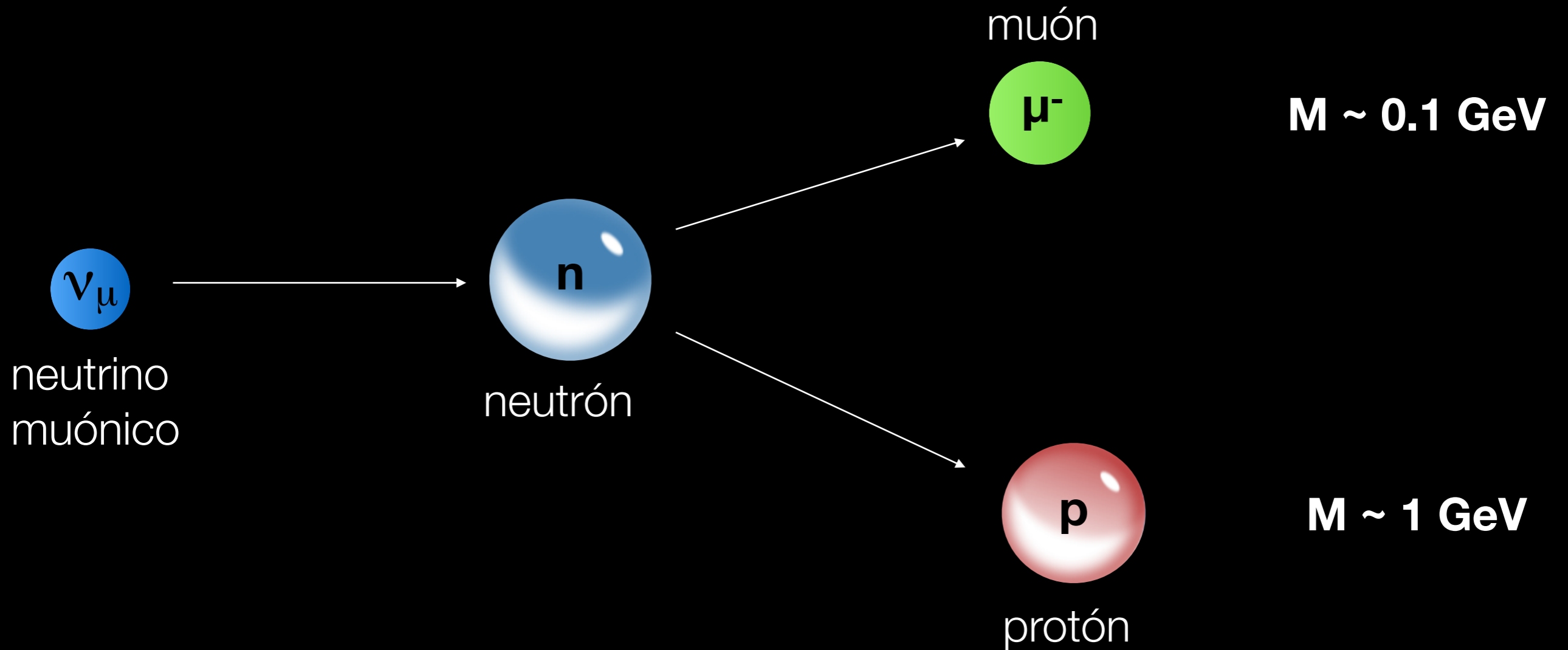


interacción quasi-elástica



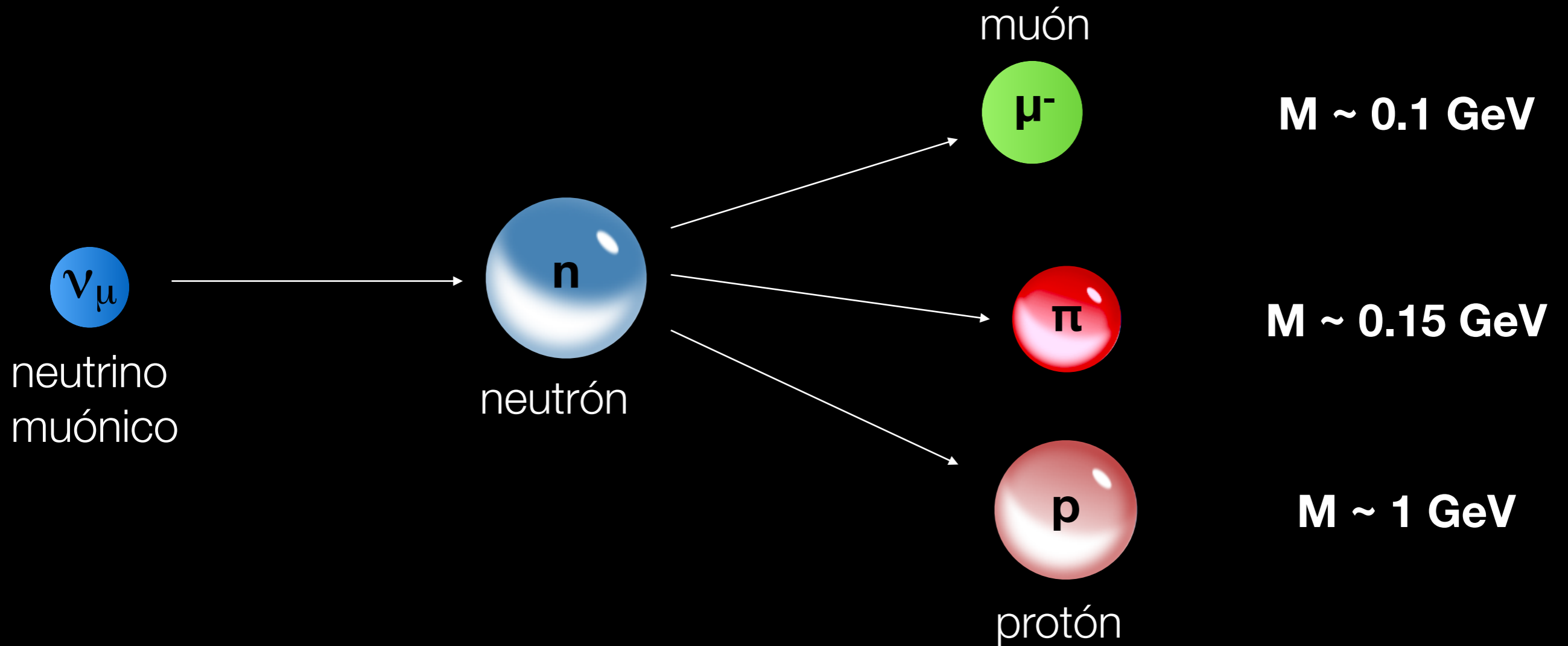
$E \sim 1 \text{ GeV}$

interacción quasi-elástica



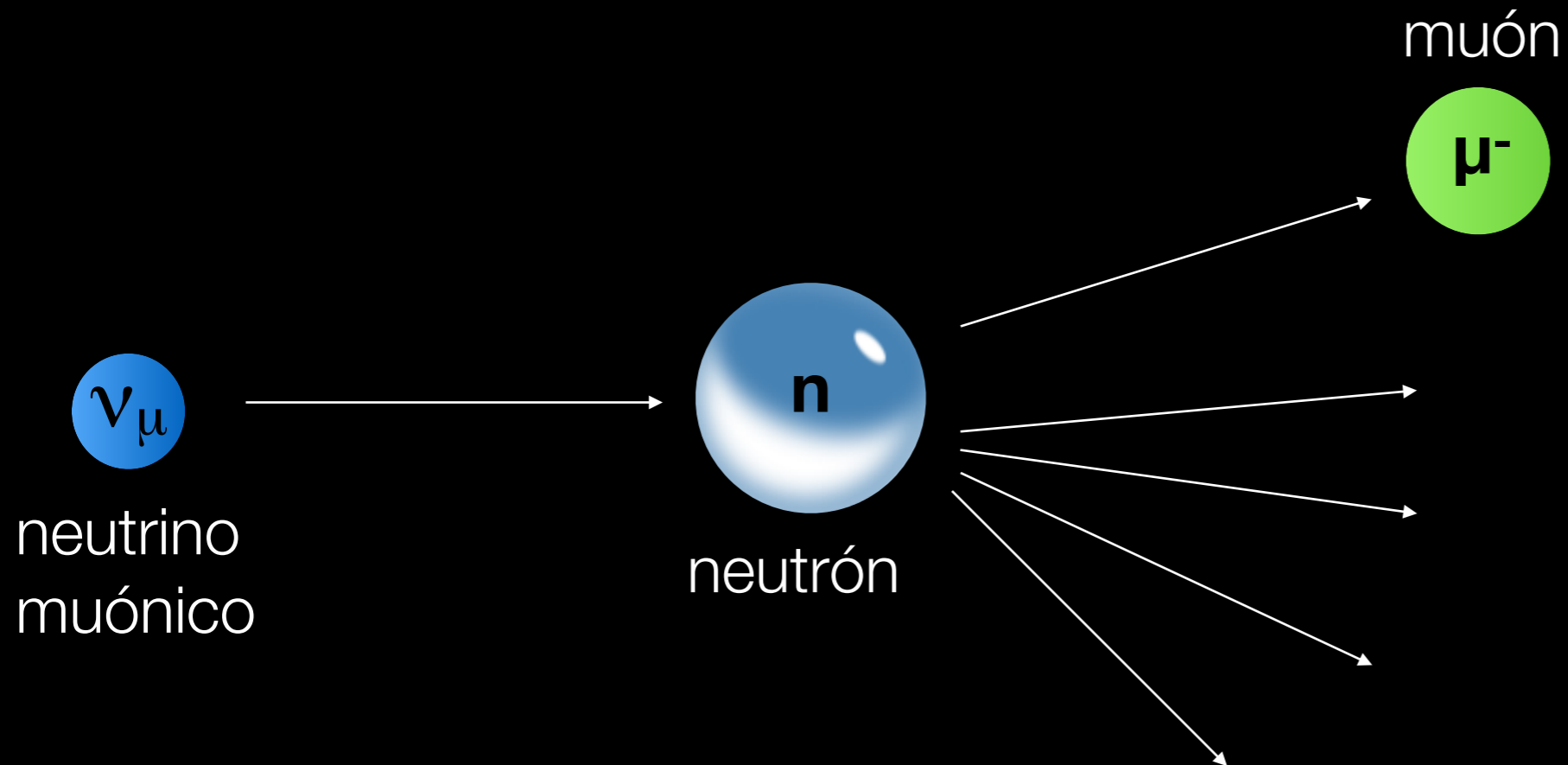
E ~ 1 GeV

interacción inelástica



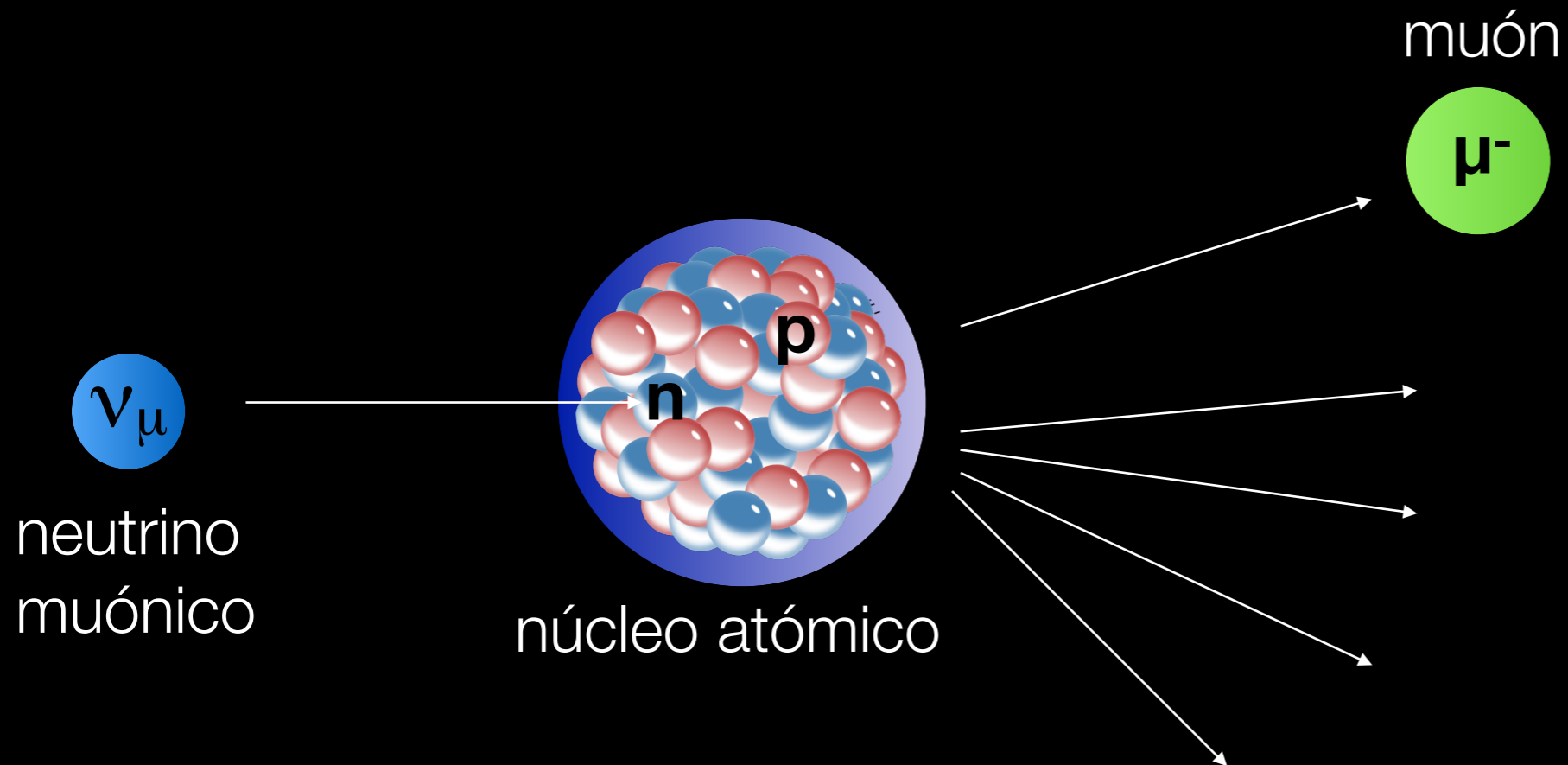
E = 1-2 GeV

interacción profundamente inelástica



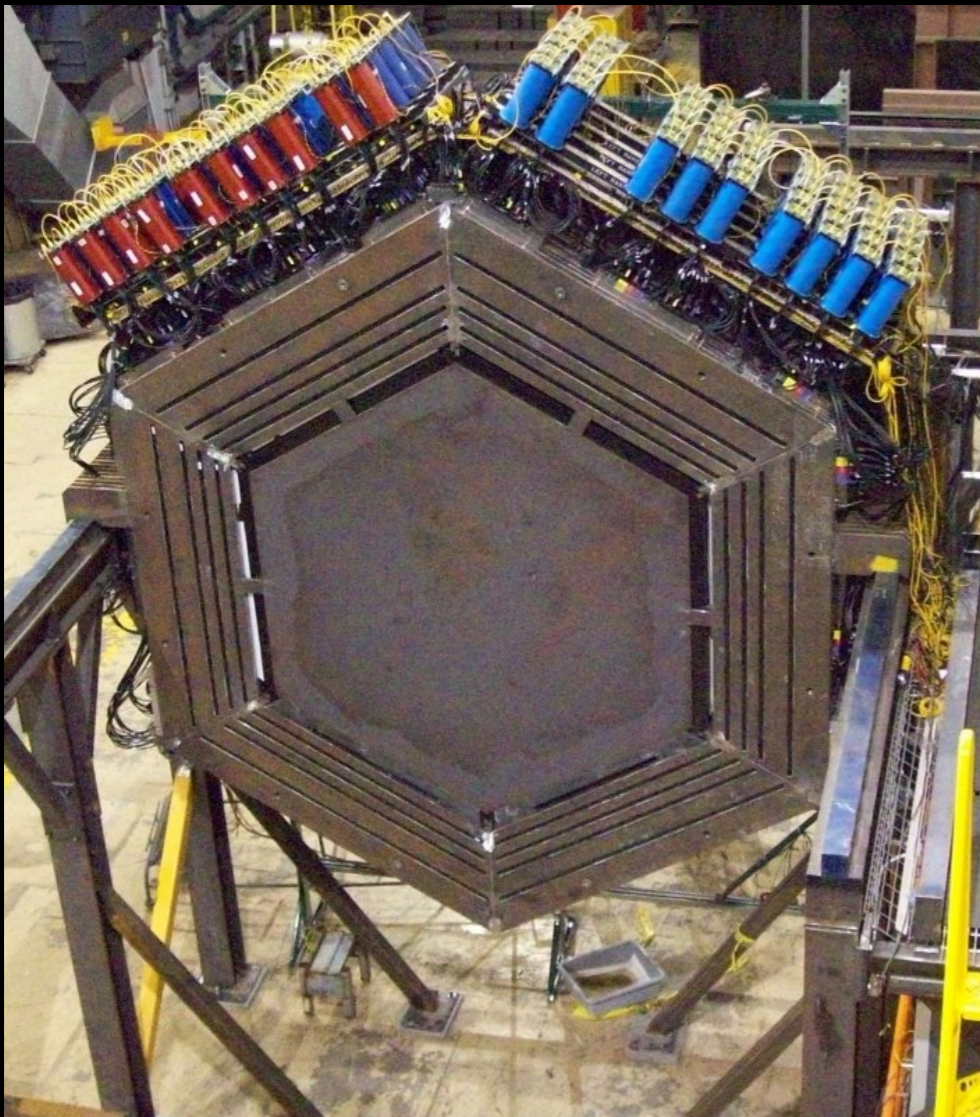
$E > 2 \text{ GeV}$

interacción profundamente inelástica

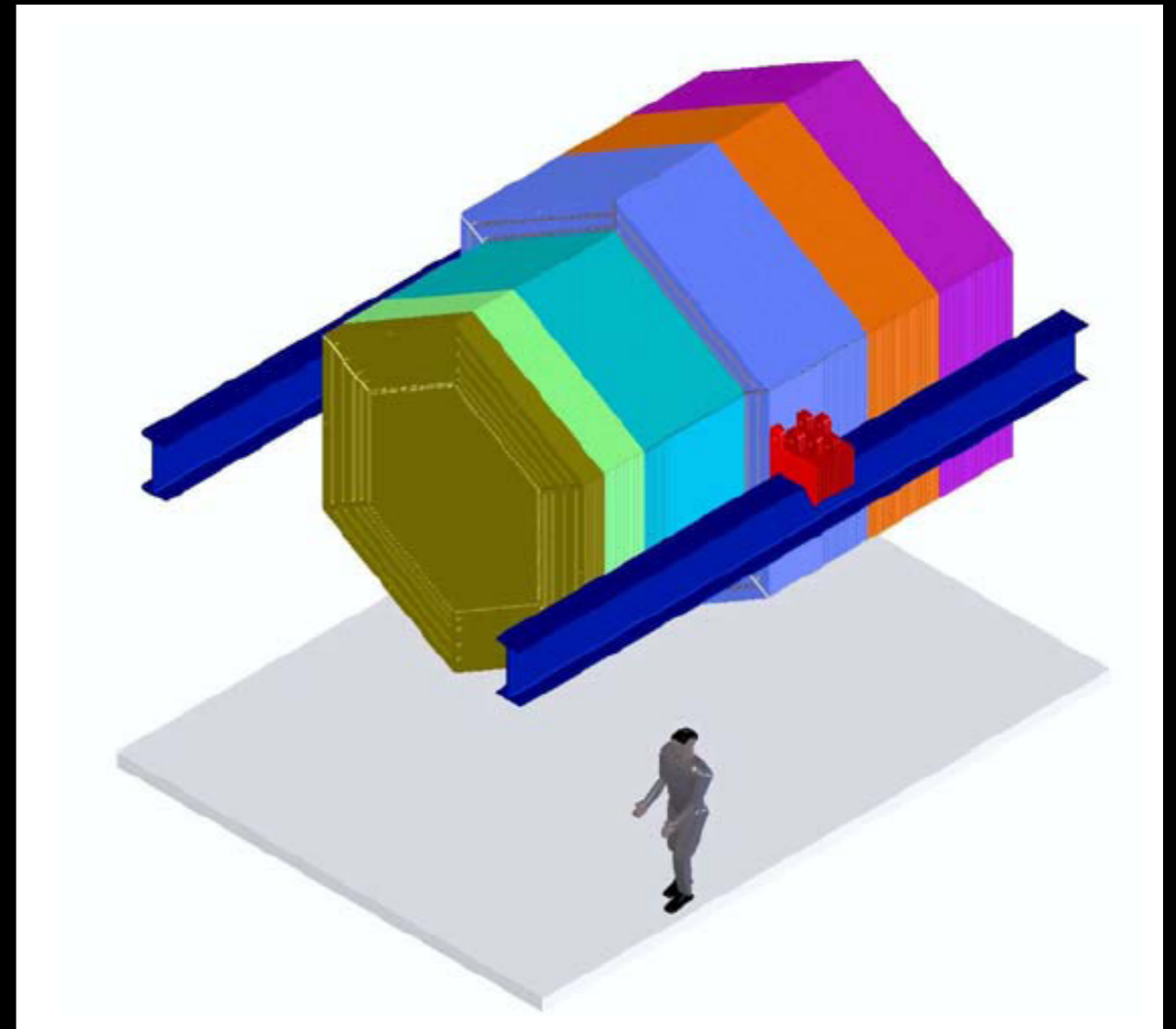
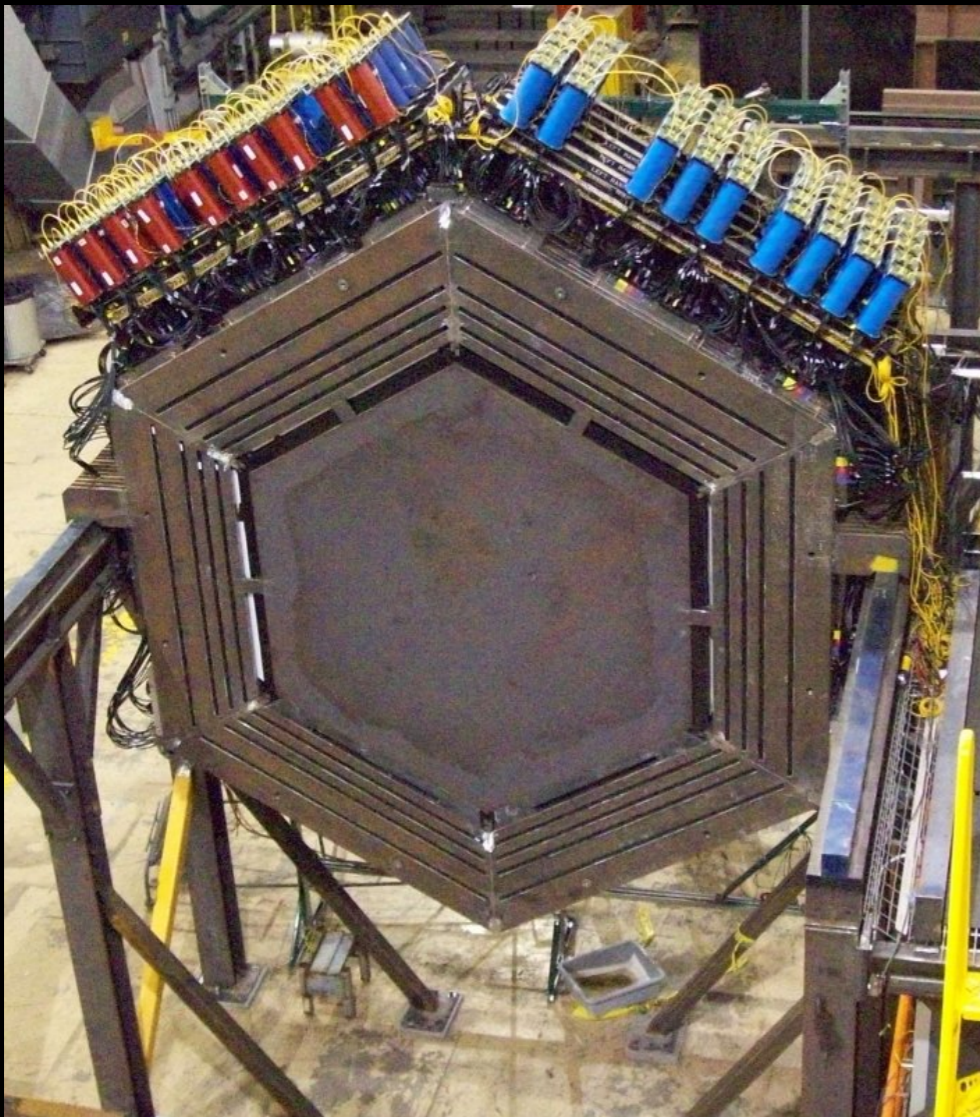


$E > 2 \text{ GeV}$

Minerva es un experimento de neutrinos en Fermilab, que estudia como estos interaccionan sobre diferentes blancos (He, C, Pb, H₂O, CH)



Minerva es un experimento de neutrinos en Fermilab, que estudia como estos interaccionan sobre diferentes blancos (He, C, Pb, H₂O, CH)



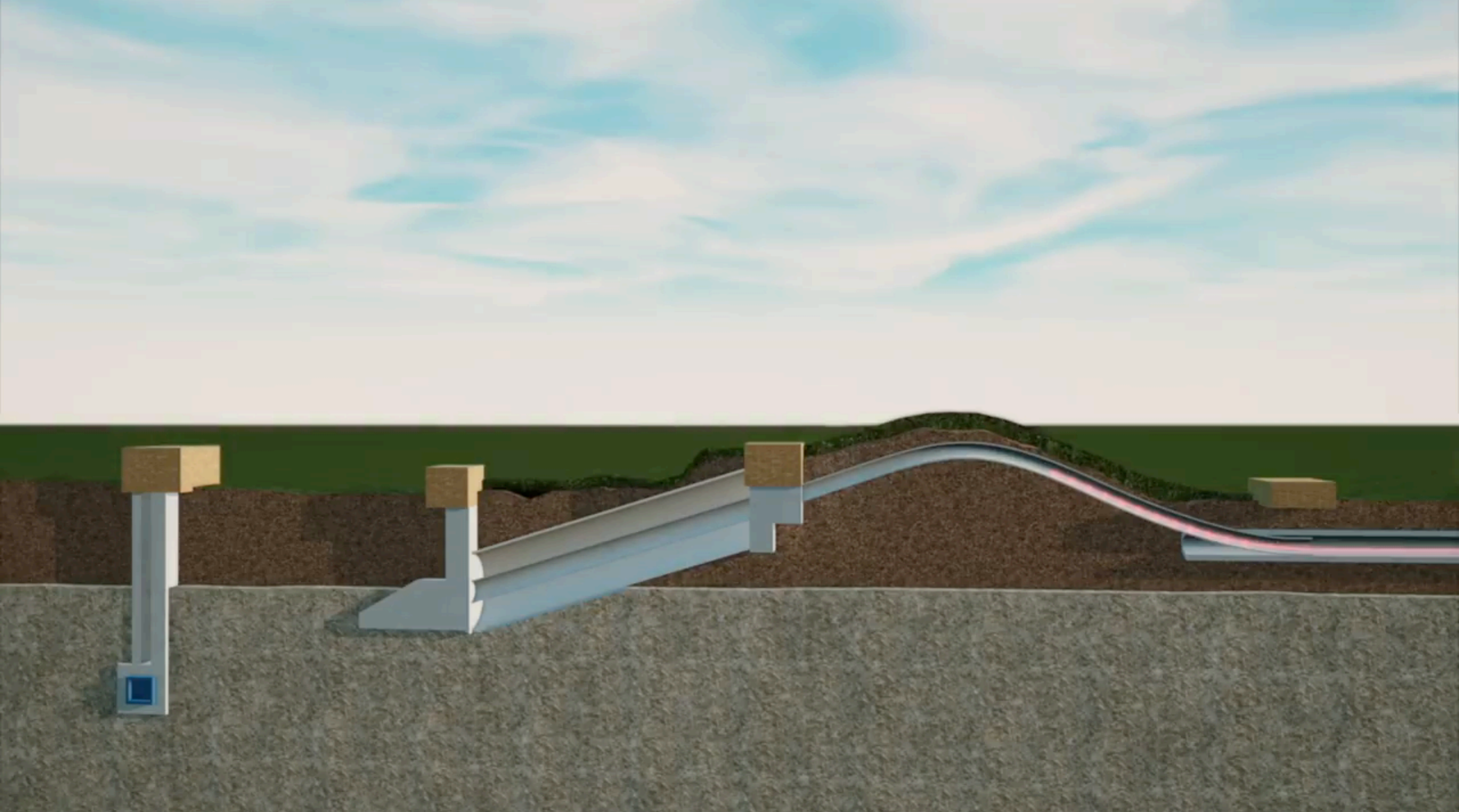
Como depende la probabilidad de interacción:

- del blanco (He, C, Pb, H₂O, CH)
- del canal (quasi-elastico, inelástico, profundamente inelástico)

Esto es muy relevante para entender las oscilaciones

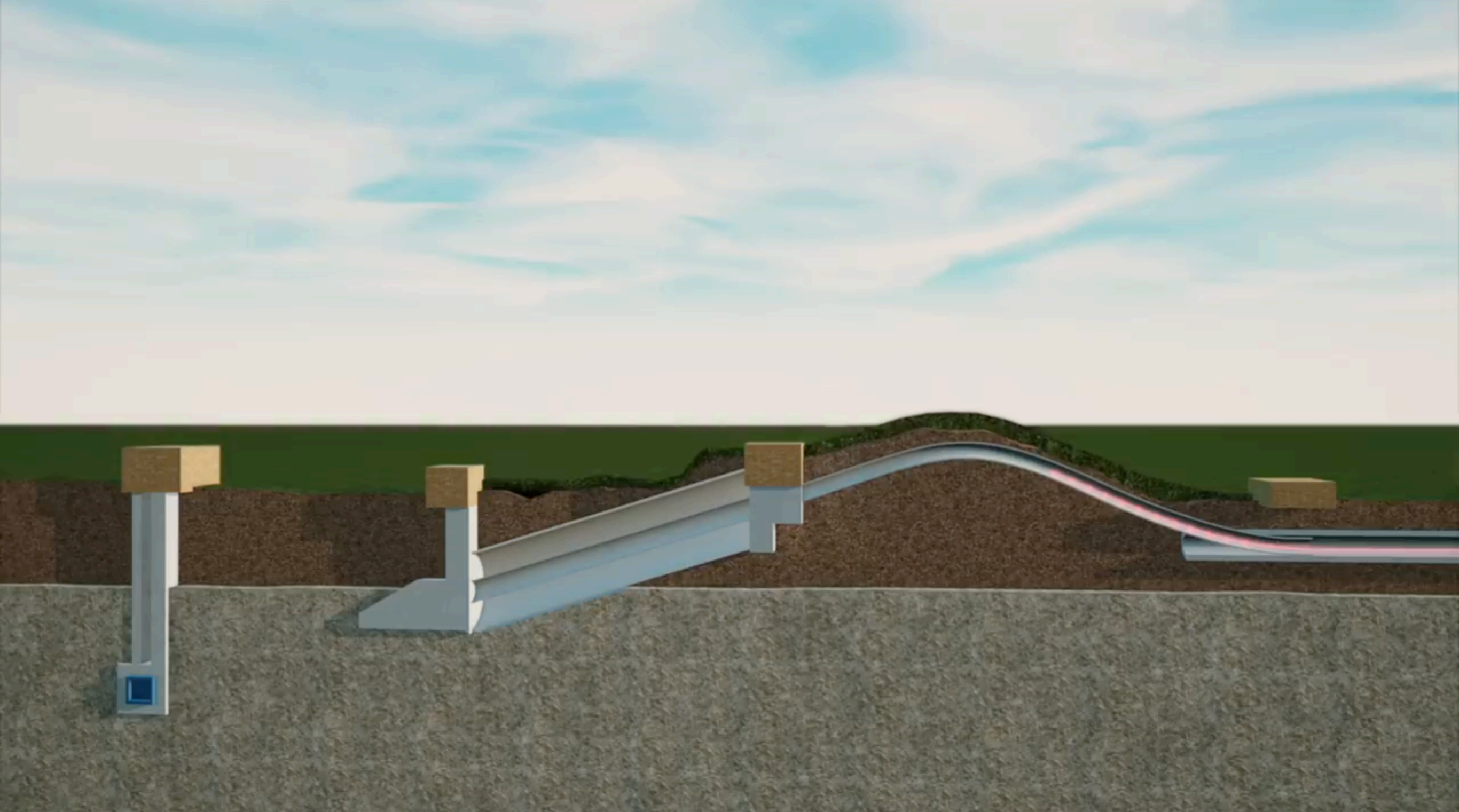
Por lo general un detector de partículas es capaz de convertir el paso de una partícula **cargada** en una serie de pulsos eléctricos que finalmente dan lugar a una imagen 3D de la trayectoria de la partícula

En realidad no es muy diferente a una cámara de fotos



El acelerador de Fermilab envía un chorro de 6×10^{13} protones cada segundo.

El chorro dura solamente **10 μ s**

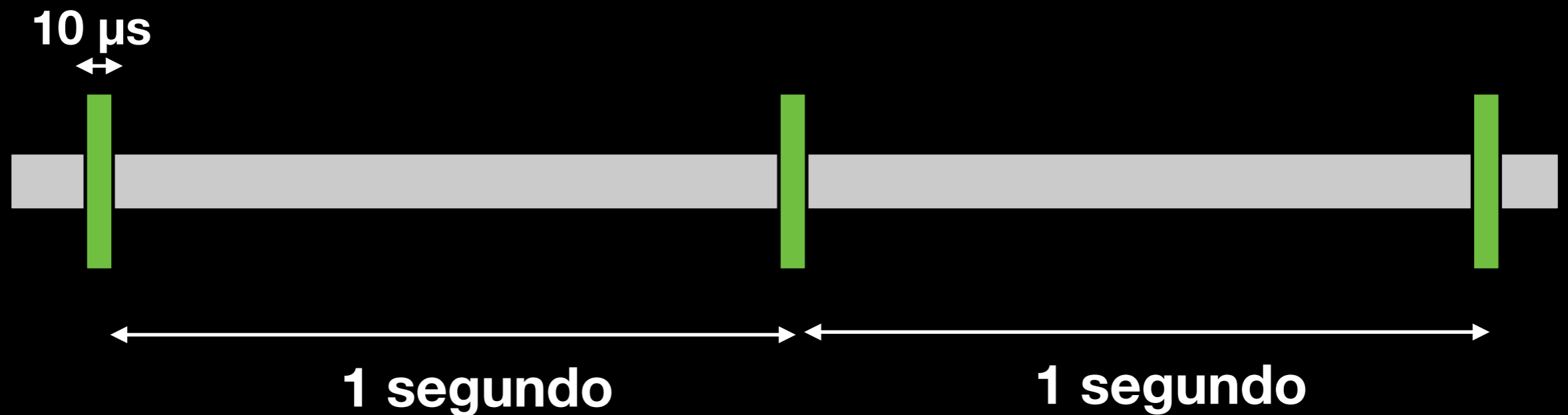


El acelerador de Fermilab envía un chorro de 6×10^{13} protones cada segundo.

El chorro dura solamente **10 μ s**

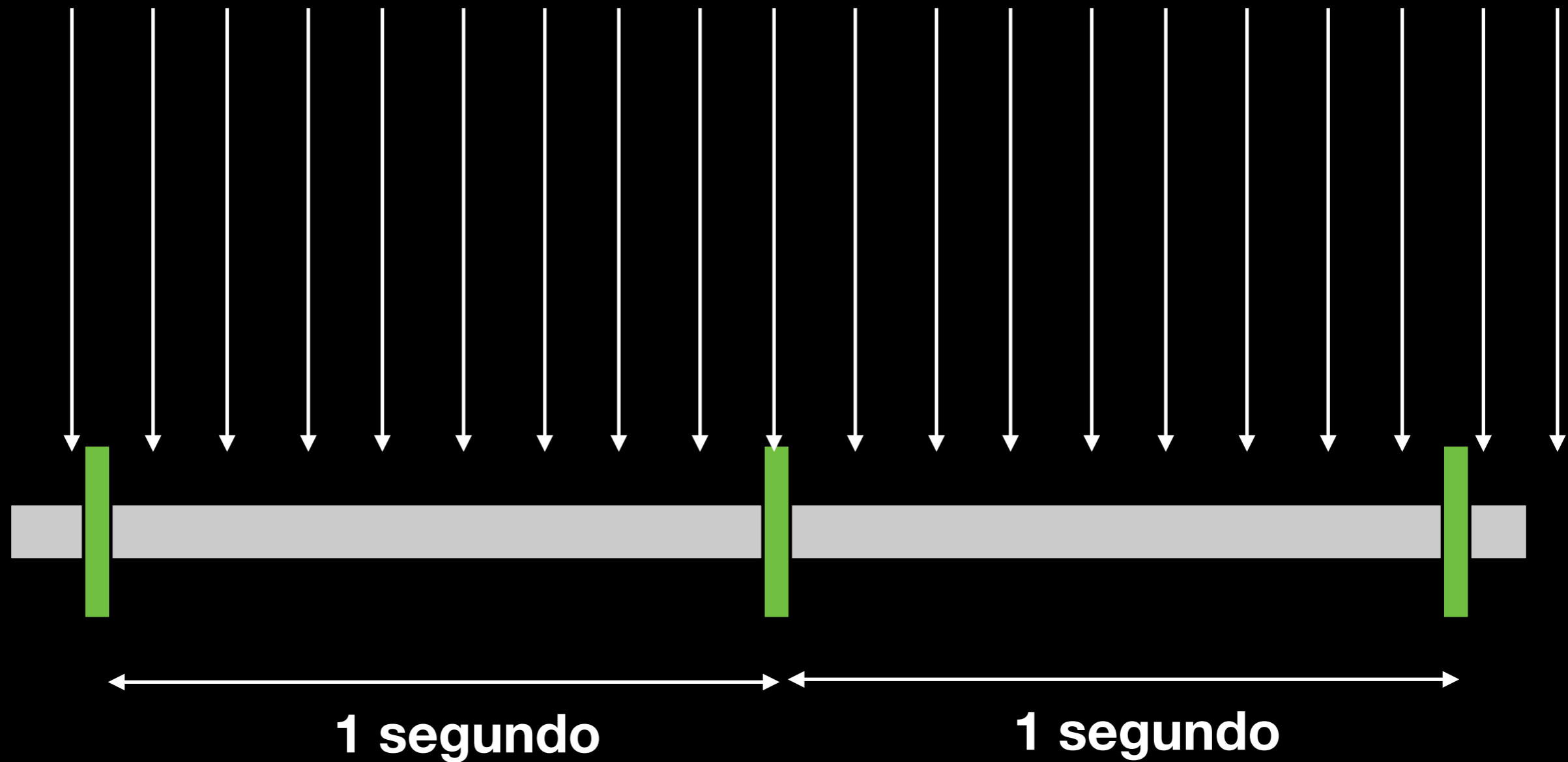
El acelerador de Fermilab envía un chorro de 6×10^{13} protones cada segundo. El chorro dura solamente **10 μs**

Esos protones generan finalmente neutrinos

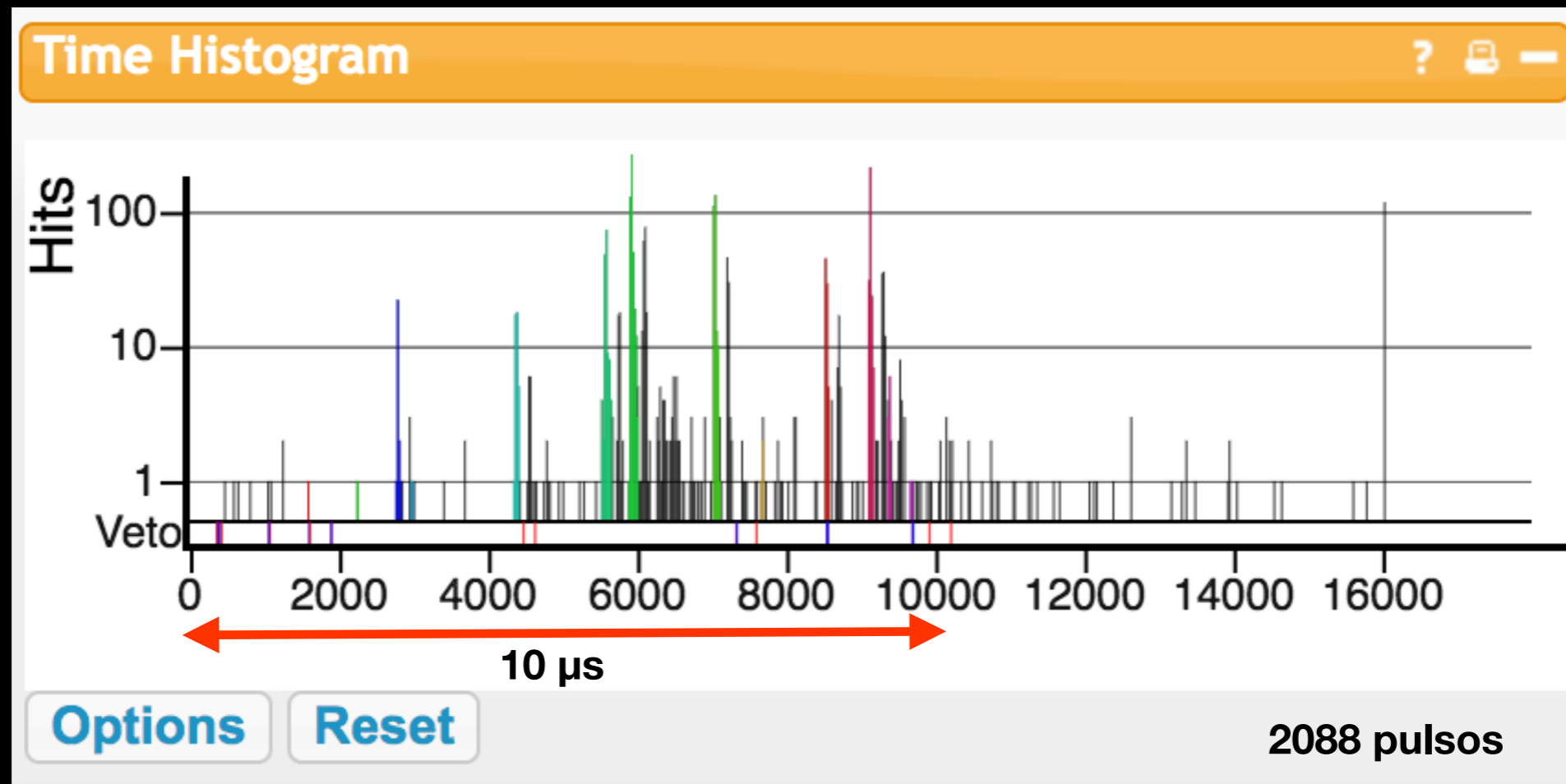


El detector solamente toma una foto durante esos **10 μs**

muones cósmicos



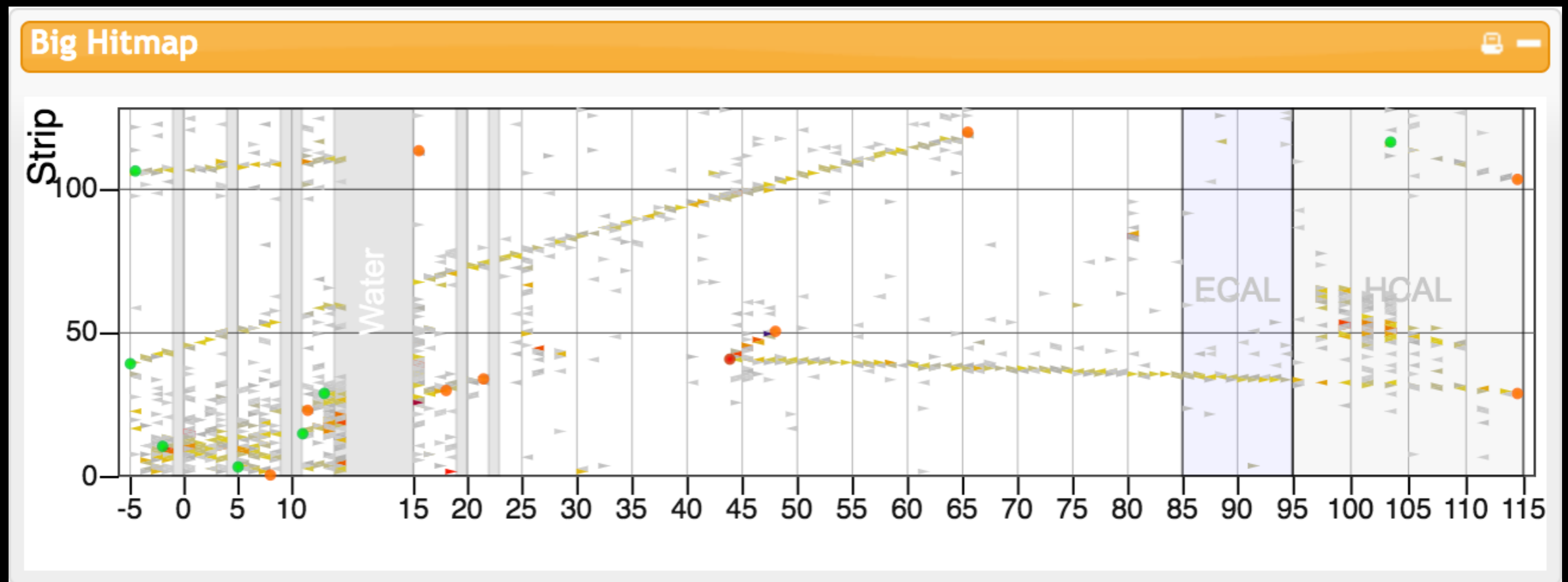
Con una foto de exposición rápida conseguimos deshacernos de la mayoría de muones cósmicos y por tanto la imagen será más nítida



Este histograma muestra la distribución de pulsos eléctricos recogidos por Minerva en uno de esos chorros de **$10 \mu\text{s}$**

La foto de los 10 μ s

En esos 10 μ s se producen varias interacciones, algunas de ellas generadas por neutrinos del haz, otras por muones c3smicos, ...

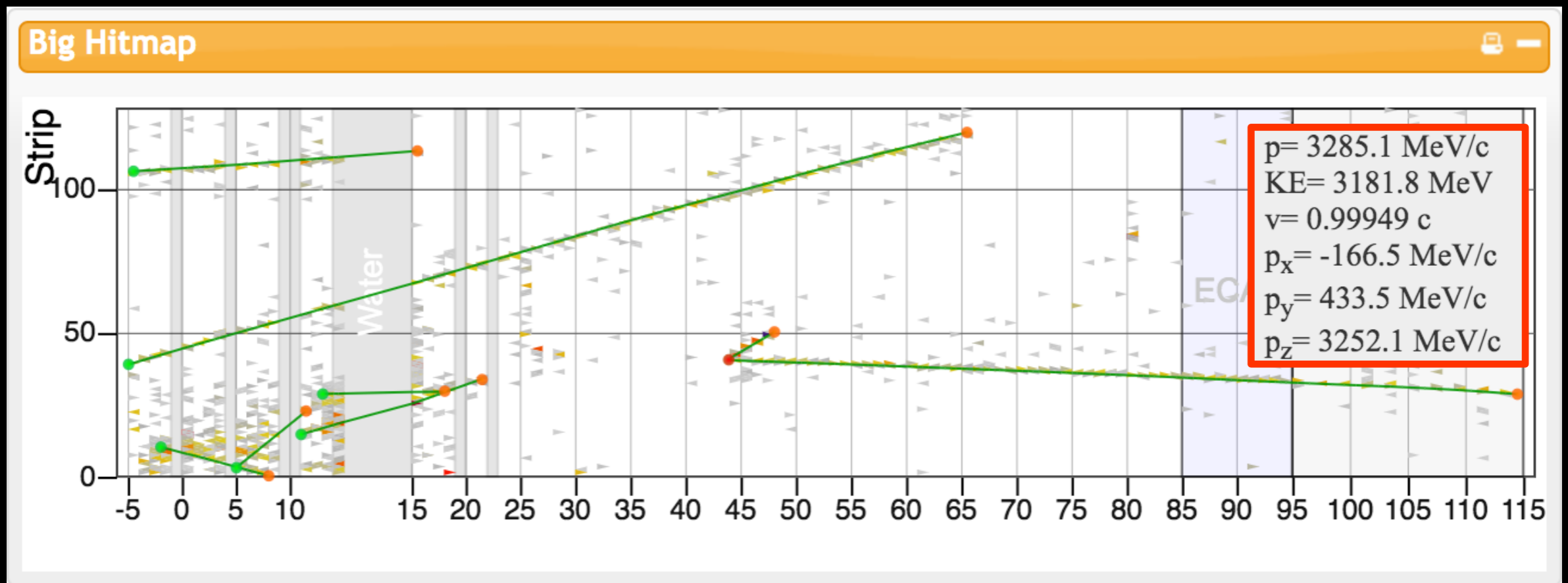


Cada punto es uno de los 2088 pulsos el3ctricos

Esta es una imagen en 2D de lo que ocurre en el detector

La foto de los 10 μ s

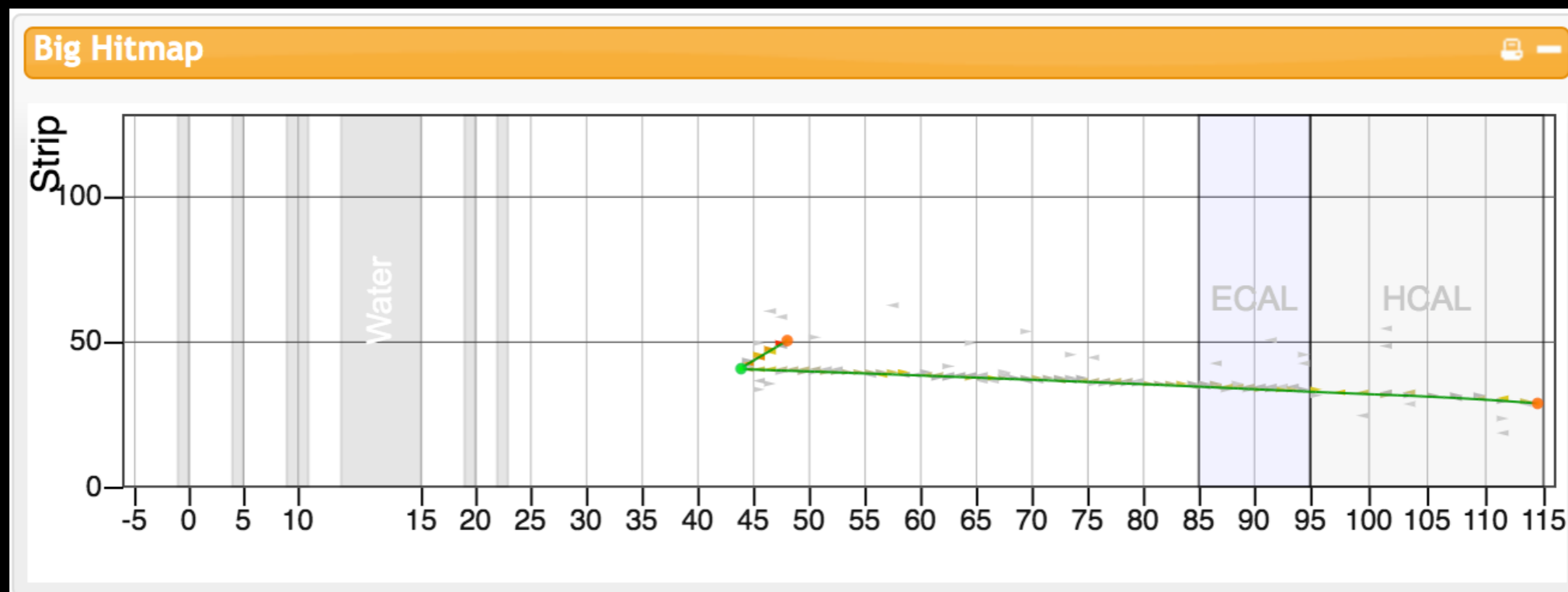
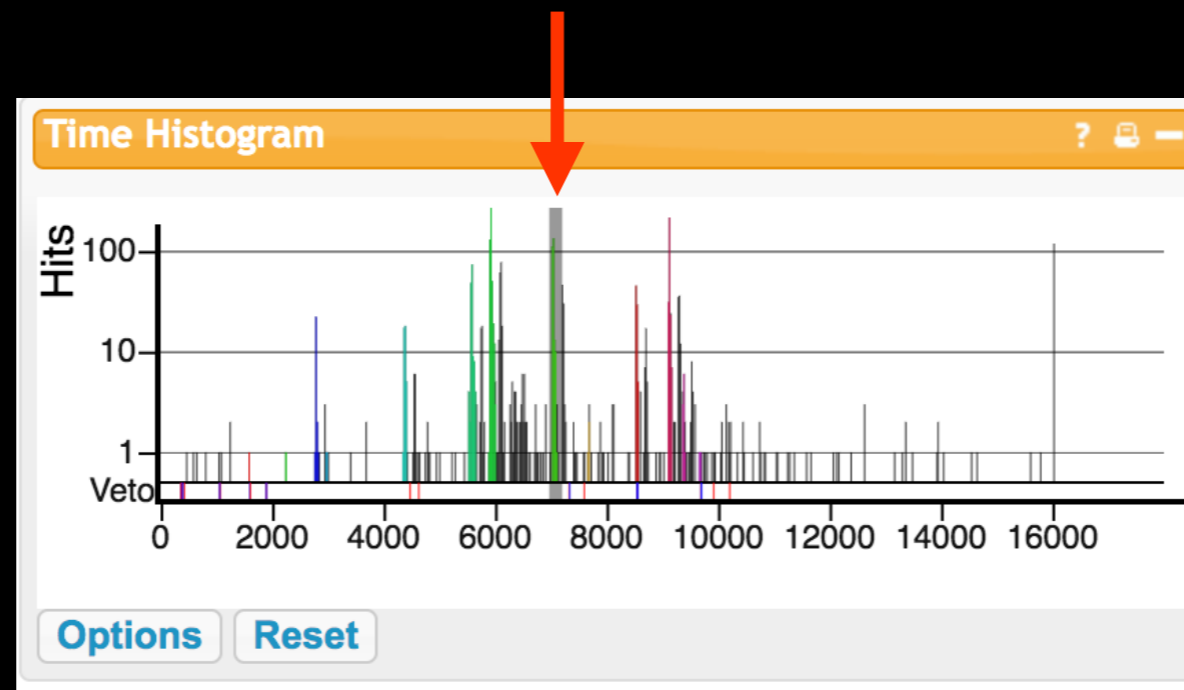
Un software de asociación de pulsos y reconocimiento de patrones es capaz de agrupar los pulsos para formar trazas. También estima la energía de cada partícula



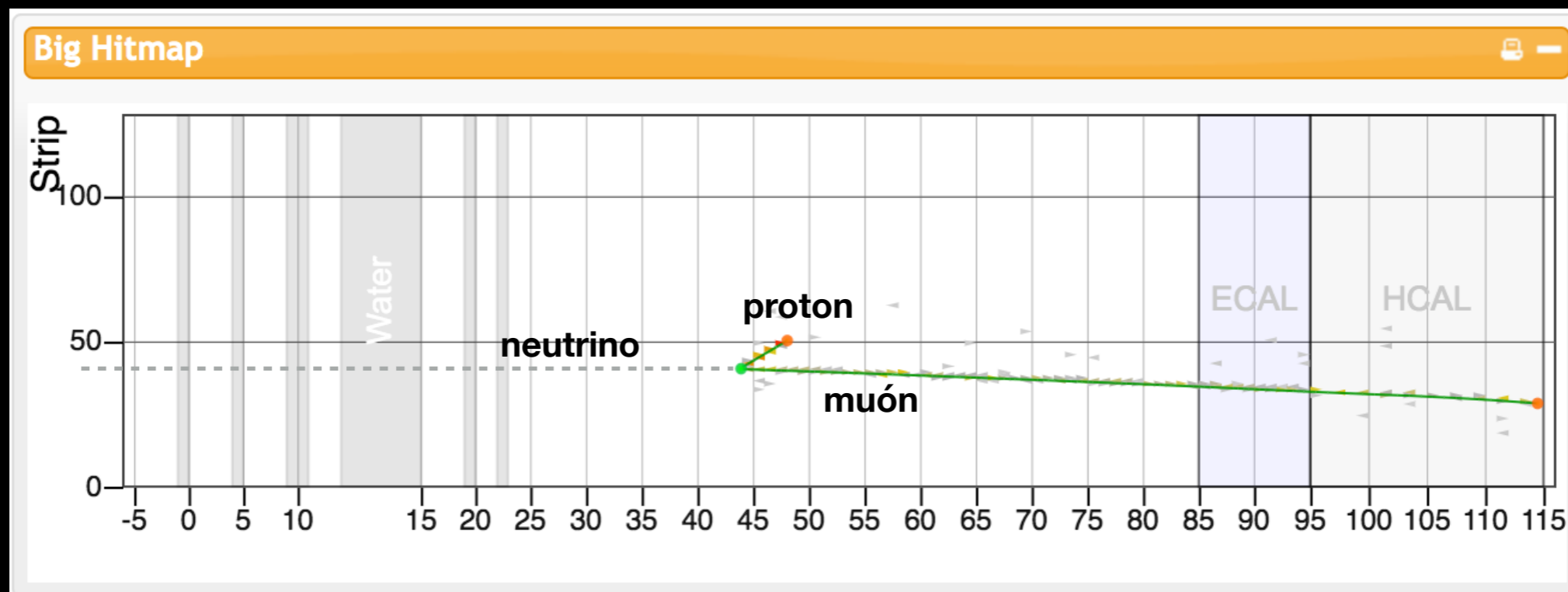
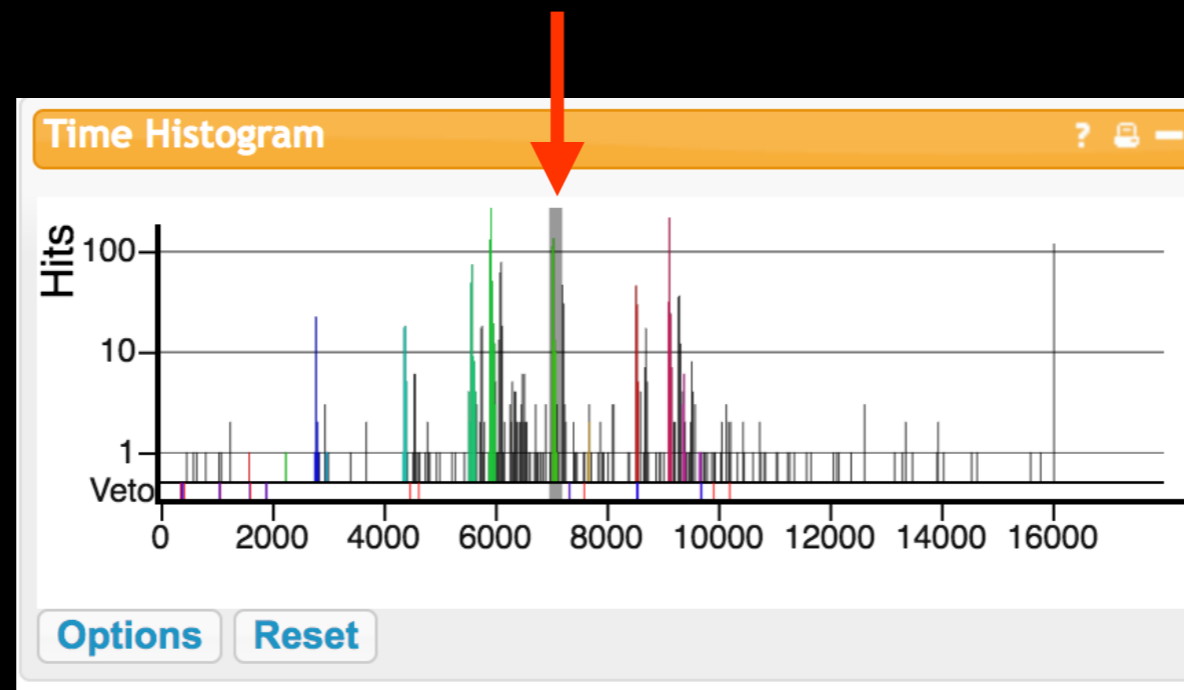
Cada punto es uno de los 2088 pulsos eléctricos

Esta es una imagen en 2D de lo que ocurre en el detector

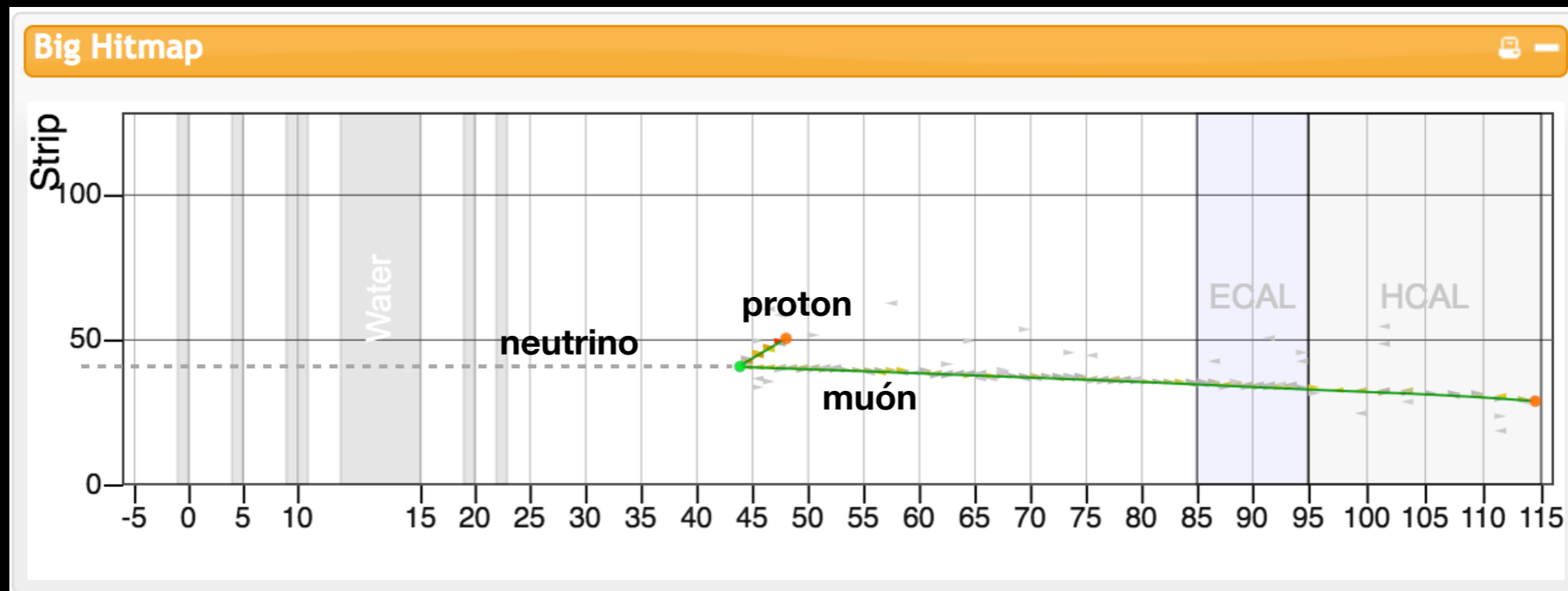
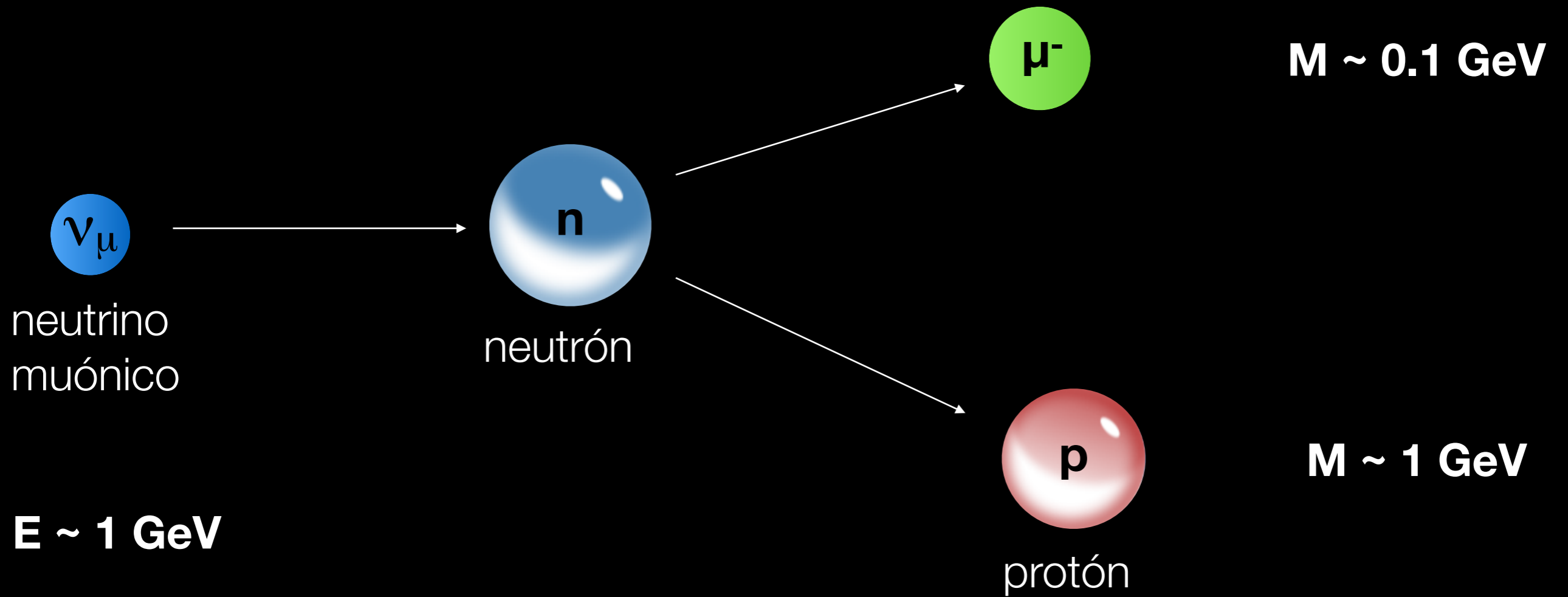
Para distinguir unas interacciones de otras podemos mirar en una ventana temporal más pequeña



Para distinguir unas interacciones de otras podemos mirar en una ventana temporal más pequeña



interacción quasi-elástica



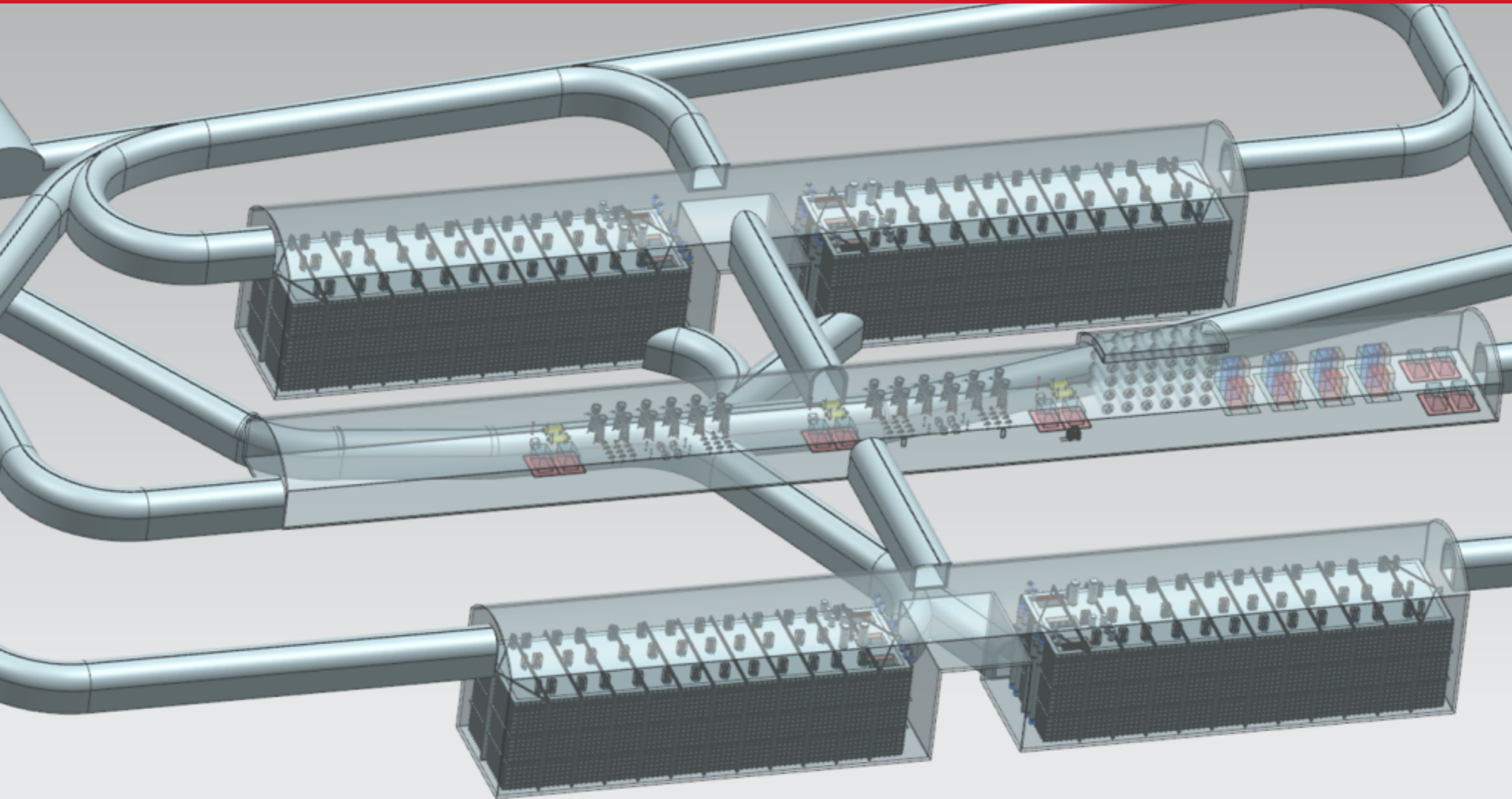
En definitiva, MINERvA ayudará a experimentos como DUNE a entender mejor lo que observan:

Para entender efectos sutiles como la oscilación de neutrinos debemos entender primero como estos interaccionan con la materia

backup

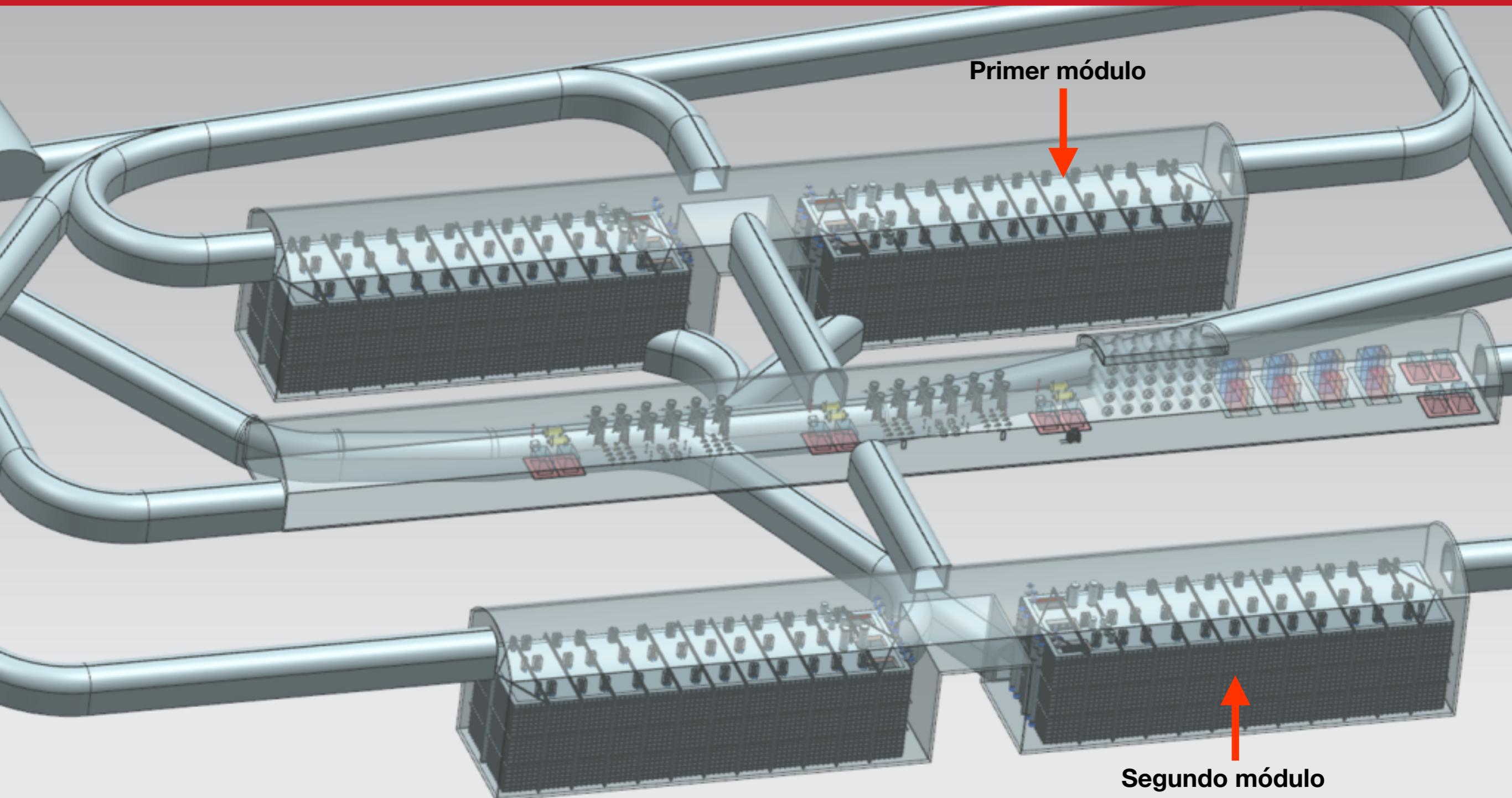
Detector lejano

**Cuatro TPCs de Argón Líquido de
10 Kton útiles (17 Kton total) cada una**

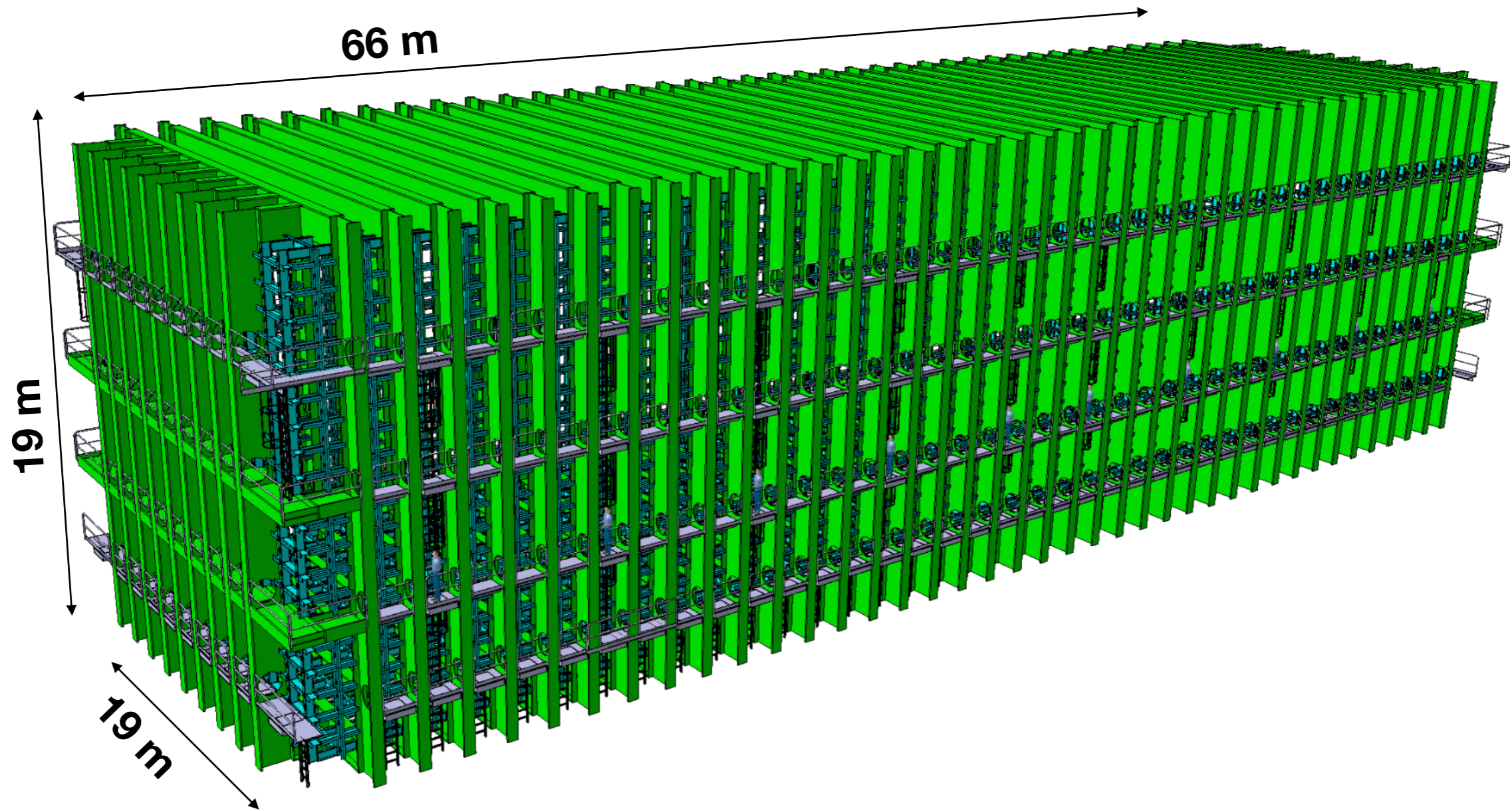


Detector lejano

Cuatro TPCs de Argón Líquido de
10 Kton útiles (17 Kton total) cada una



Los criostatos de DUNE



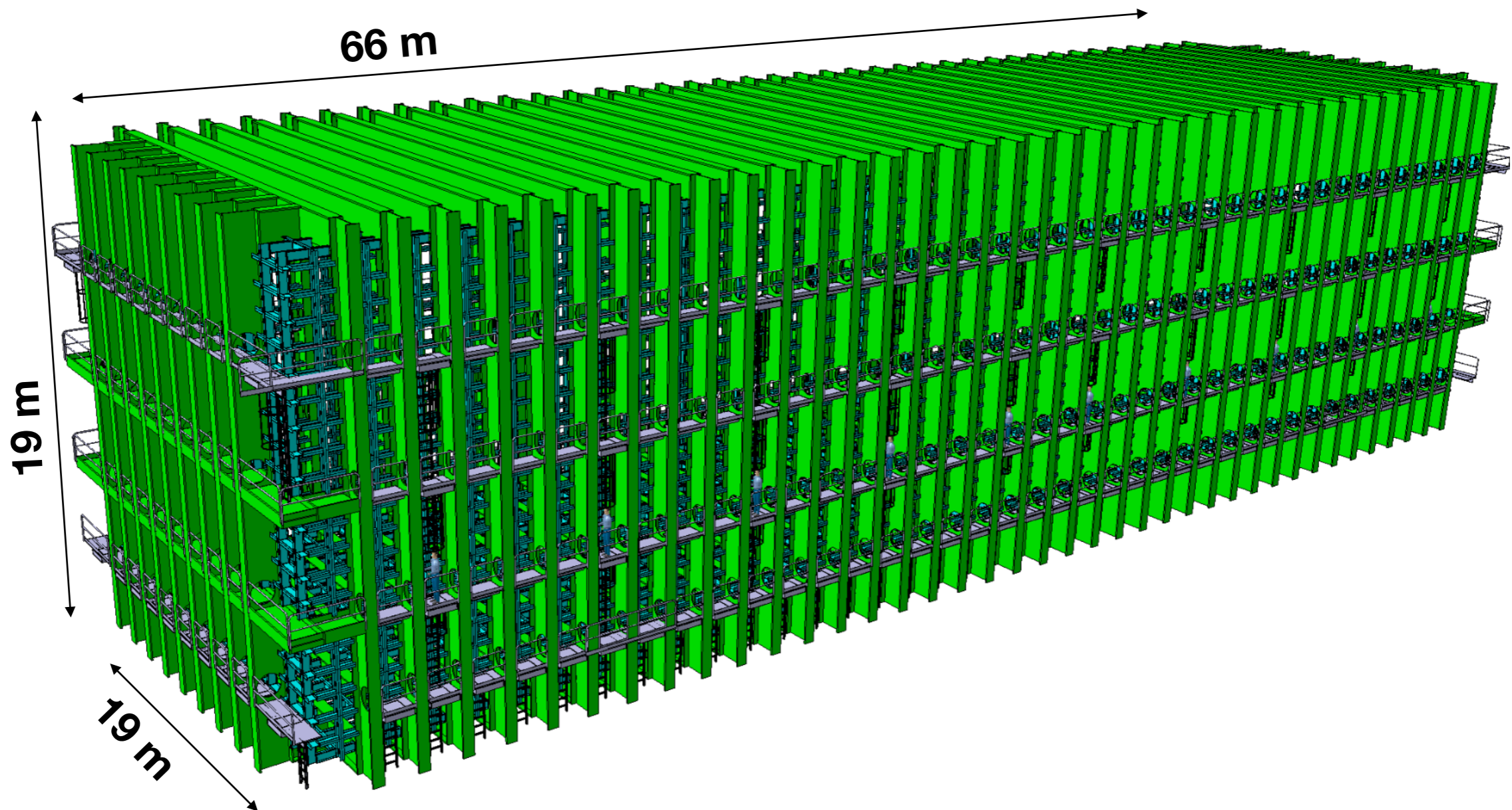
Deben ser capaces de mantener el LAr a 87 K, con pérdidas mínimas

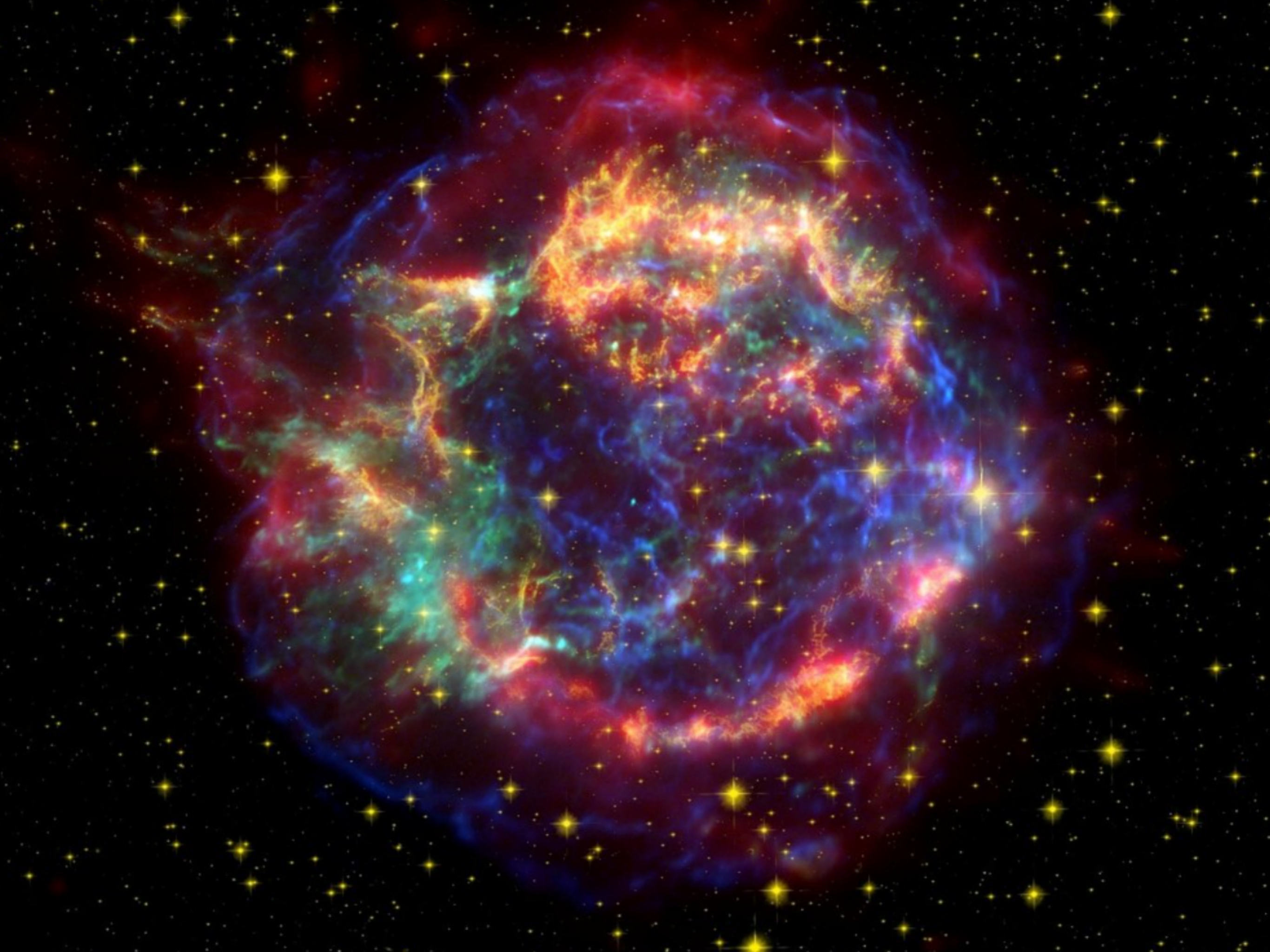
Instrumentación criogénica

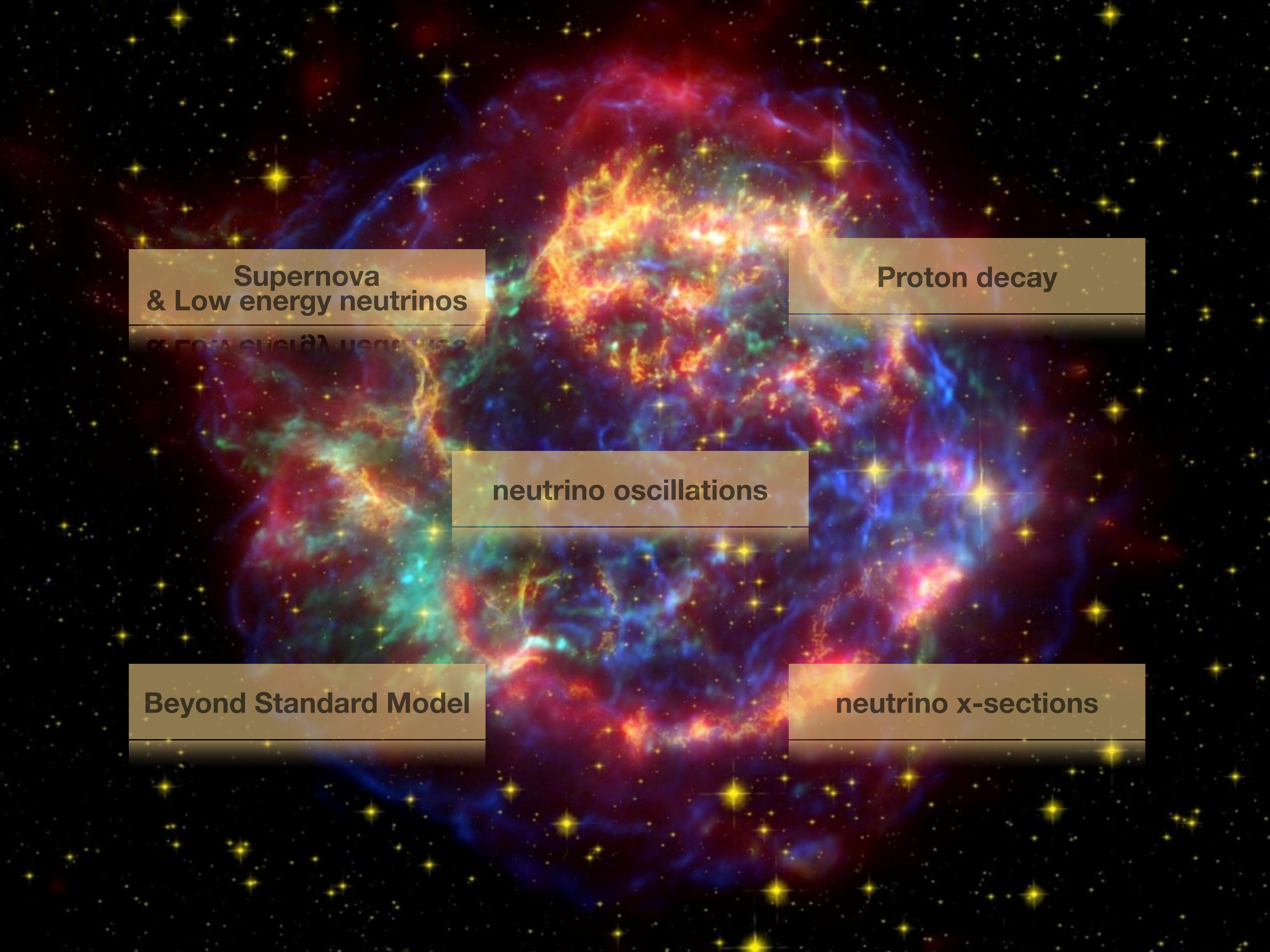


El criostato

Mantener 17 Kilotoneladas de Argón a 87 K, con pérdidas mínimas, y con altísima pureza







**Supernova
& Low energy neutrinos**

α β γ μ ν λ μ ν ρ σ

Proton decay

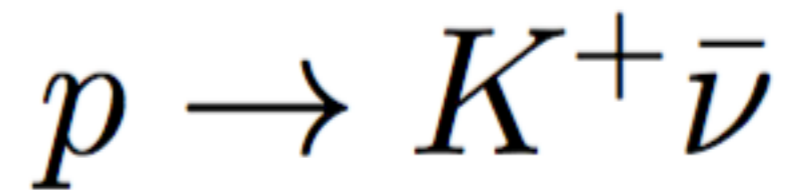
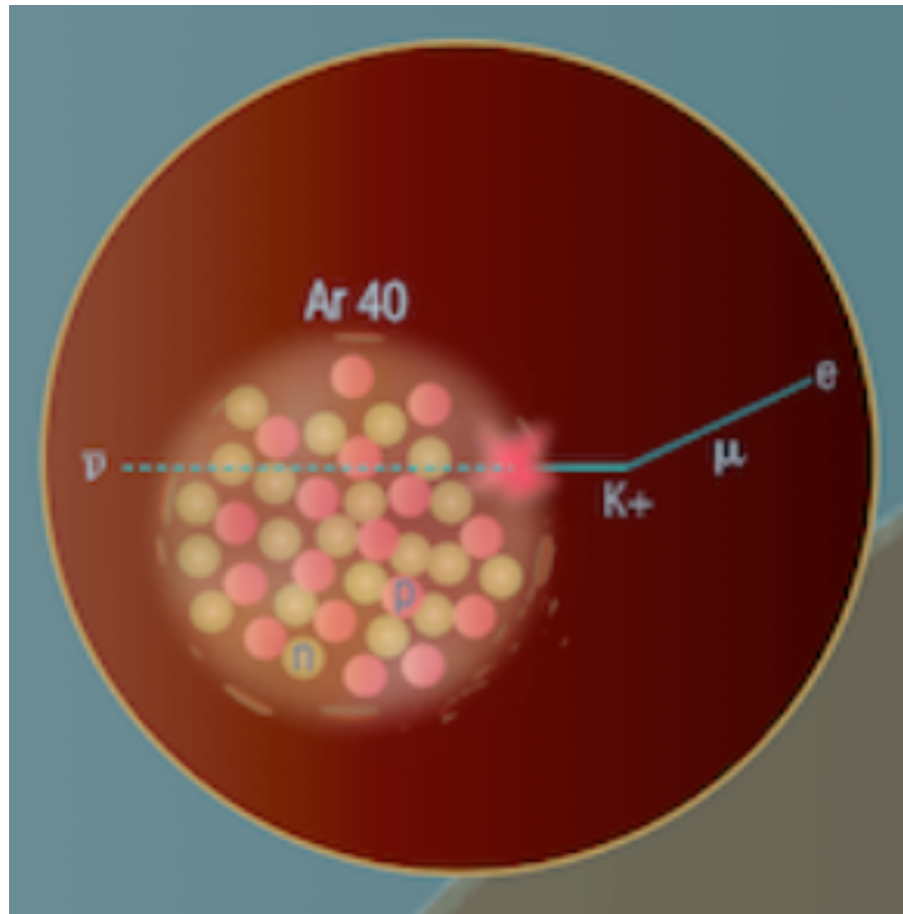
neutrino oscillations

Beyond Standard Model

neutrino x-sections

Desintegración del protón

Michel Sorel aporta experiencia al grupo

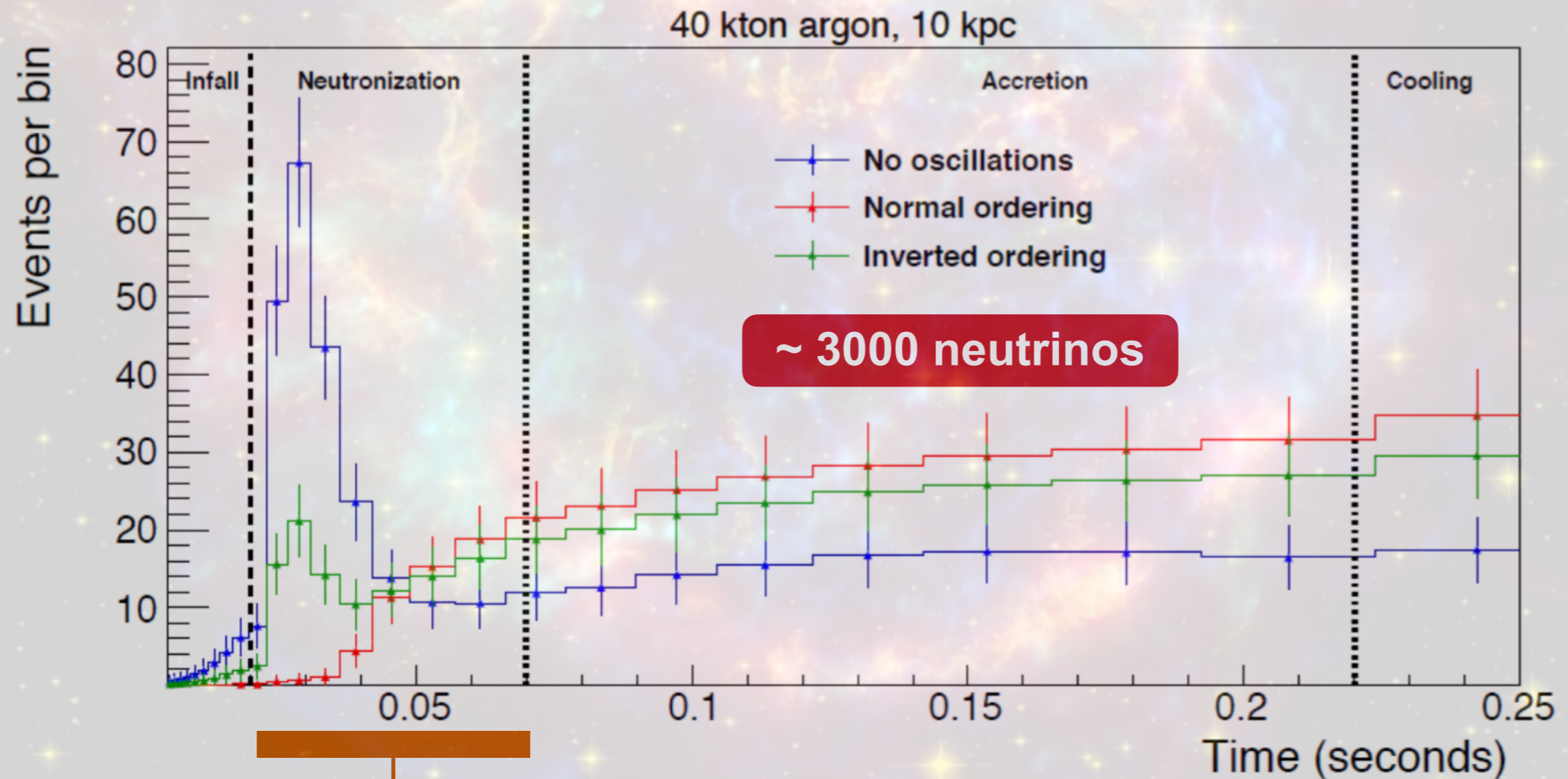


Por el momento estamos llevando a cabo estudios de identificación de kaones en ProtoDUNE

Explosiones de supernovas

Michel Sorel aporta experiencia al grupo

Esperamos 2-3 explosiones de supernovas pos siglo en nuestra galaxia

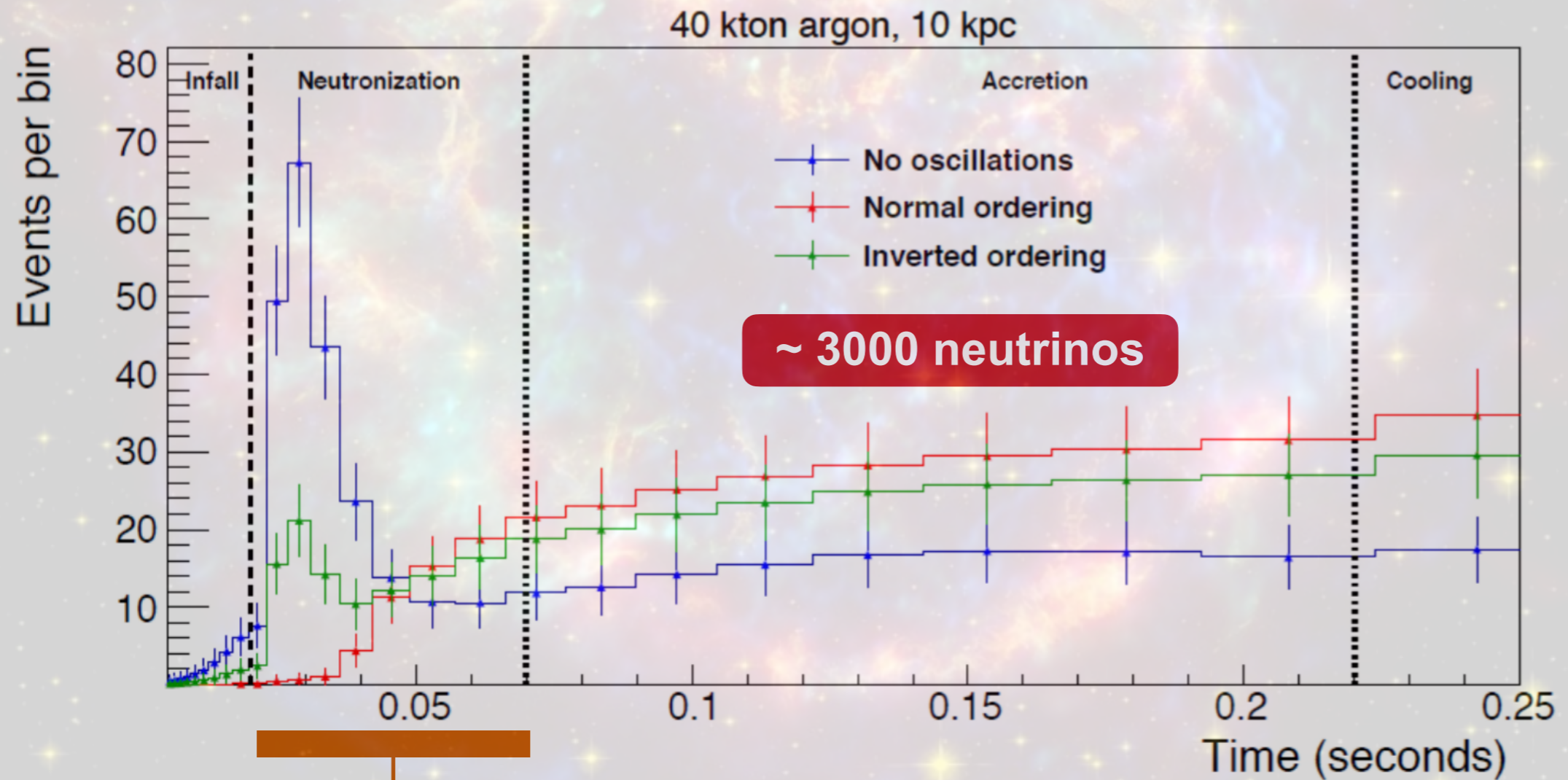


Sensibilidad a la jerarquía de masas y al modelo de explosión de las supernovas

Explosiones de supernovas

Michel Sorel aporta experiencia al grupo

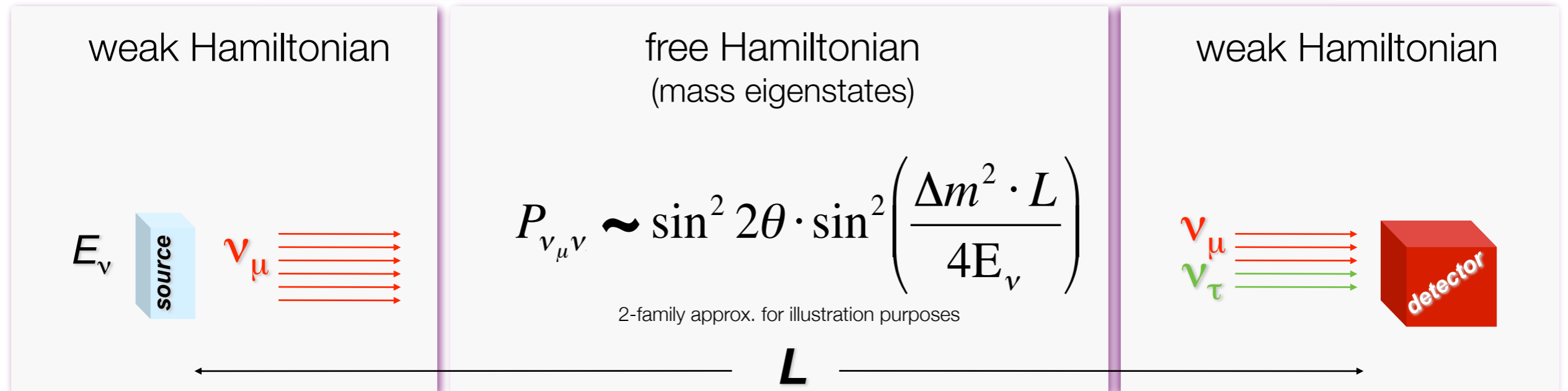
Esperamos 2-3 explosiones de supernovas pos siglo en nuestra galaxia



Sensibilidad a la jerarquía de masas y al modelo de explosión de las supernovas

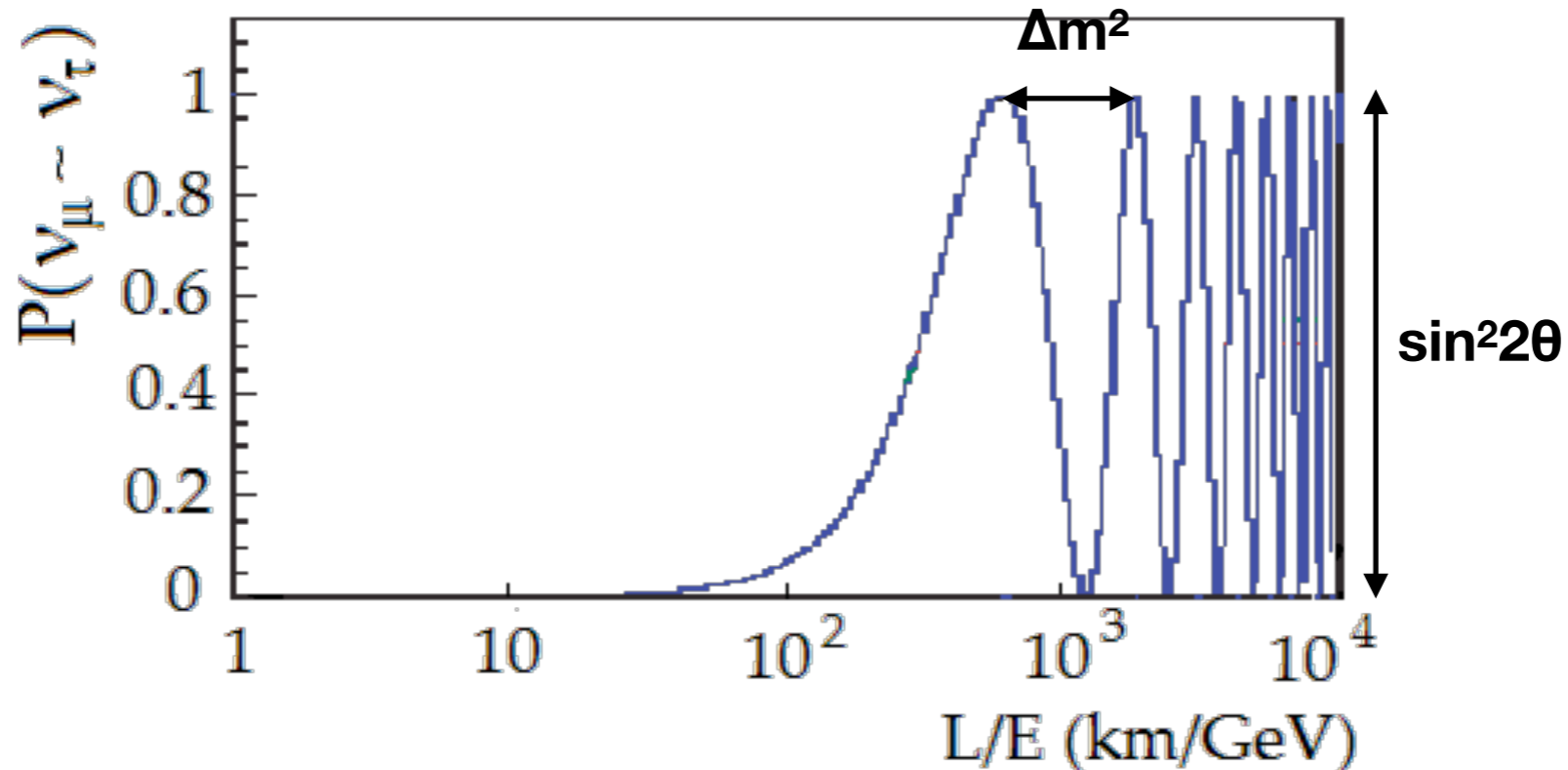
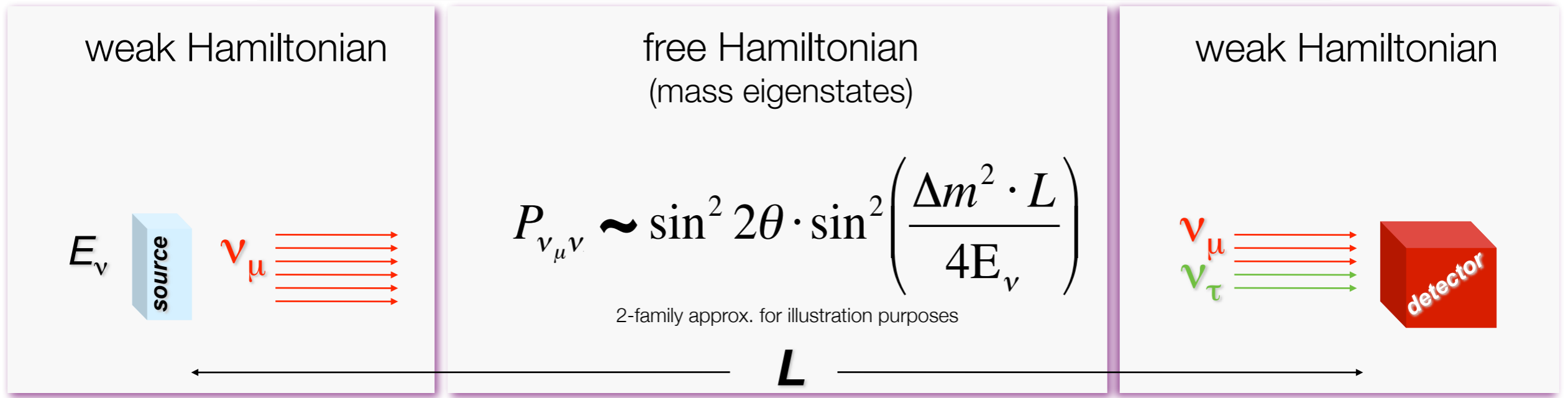
Neutrino oscillations

Requirements: Massive neutrinos & different masses



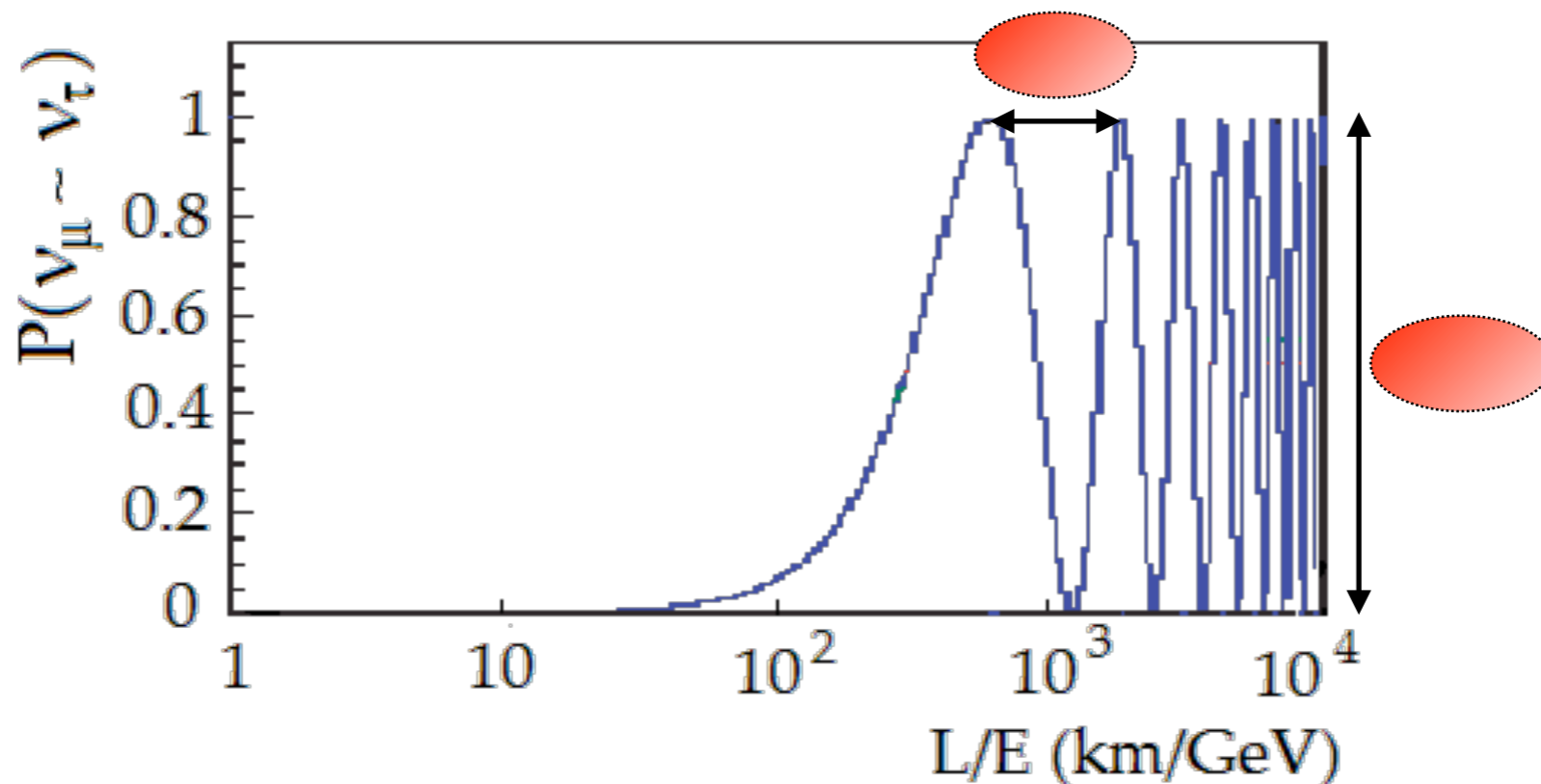
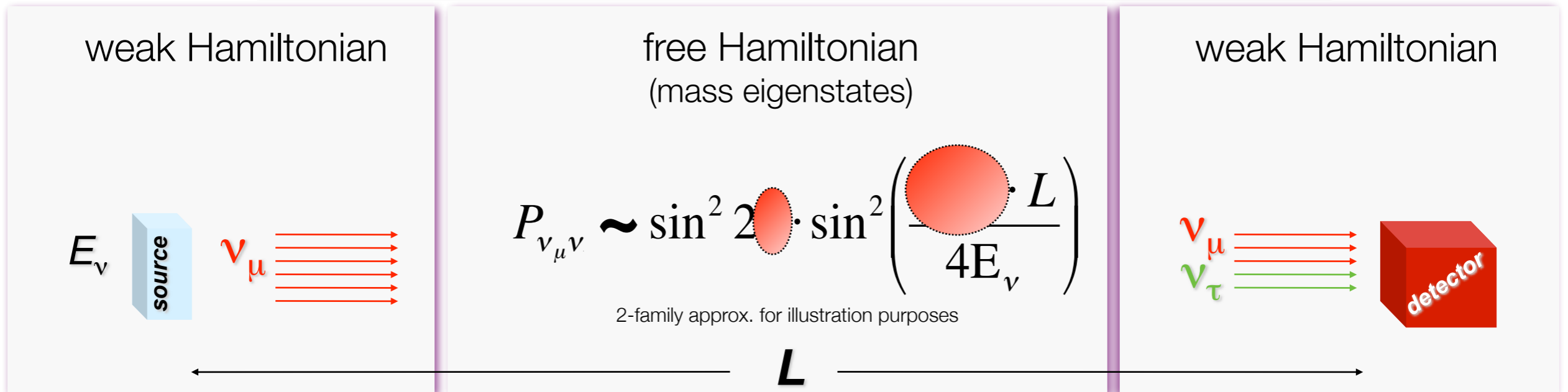
Neutrino oscillations

Requirements: Massive neutrinos & different masses



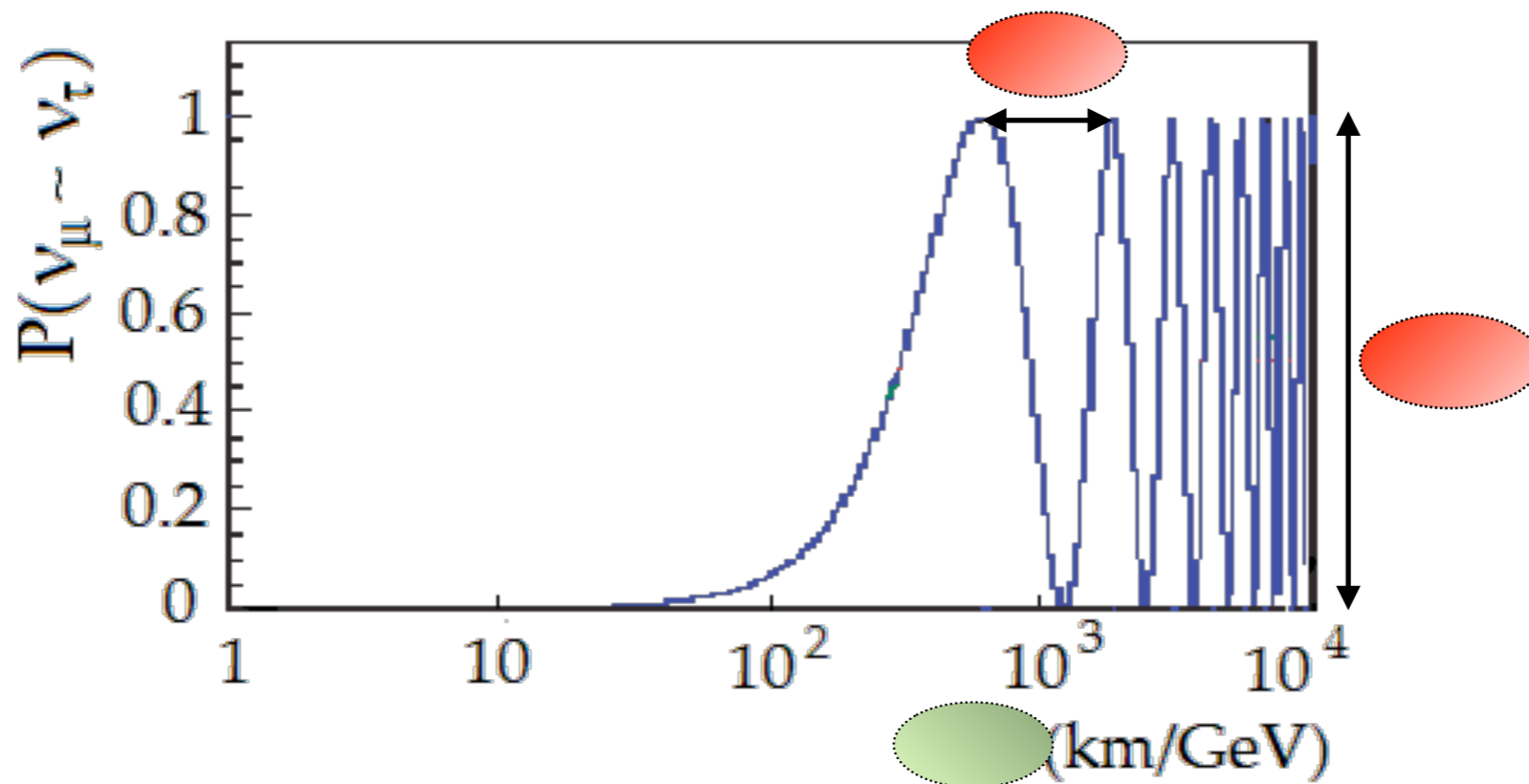
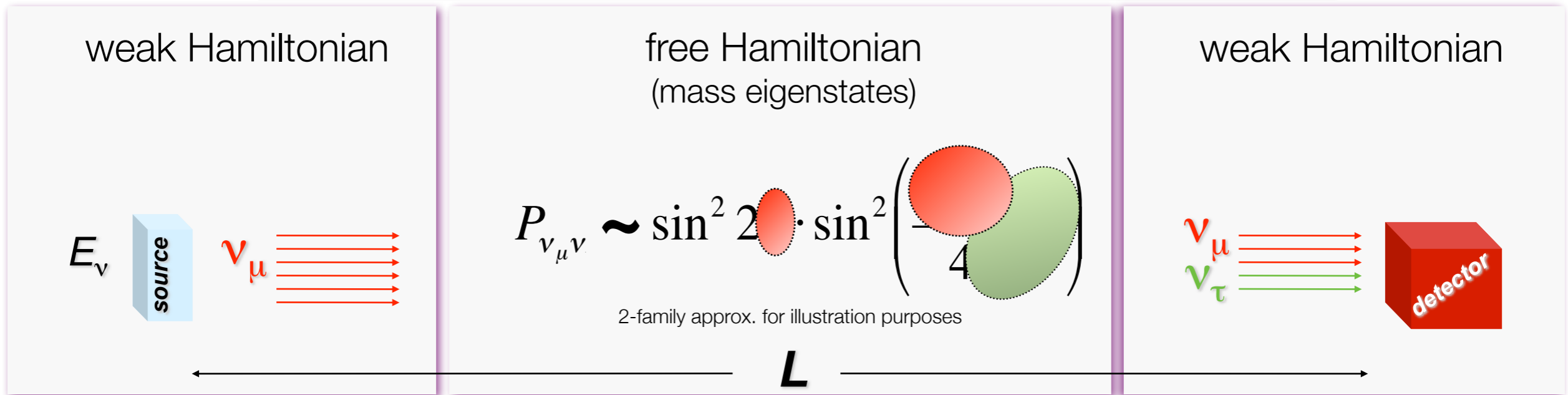
Neutrino oscillations

Requirements: Massive neutrinos & different masses



Neutrino oscillations

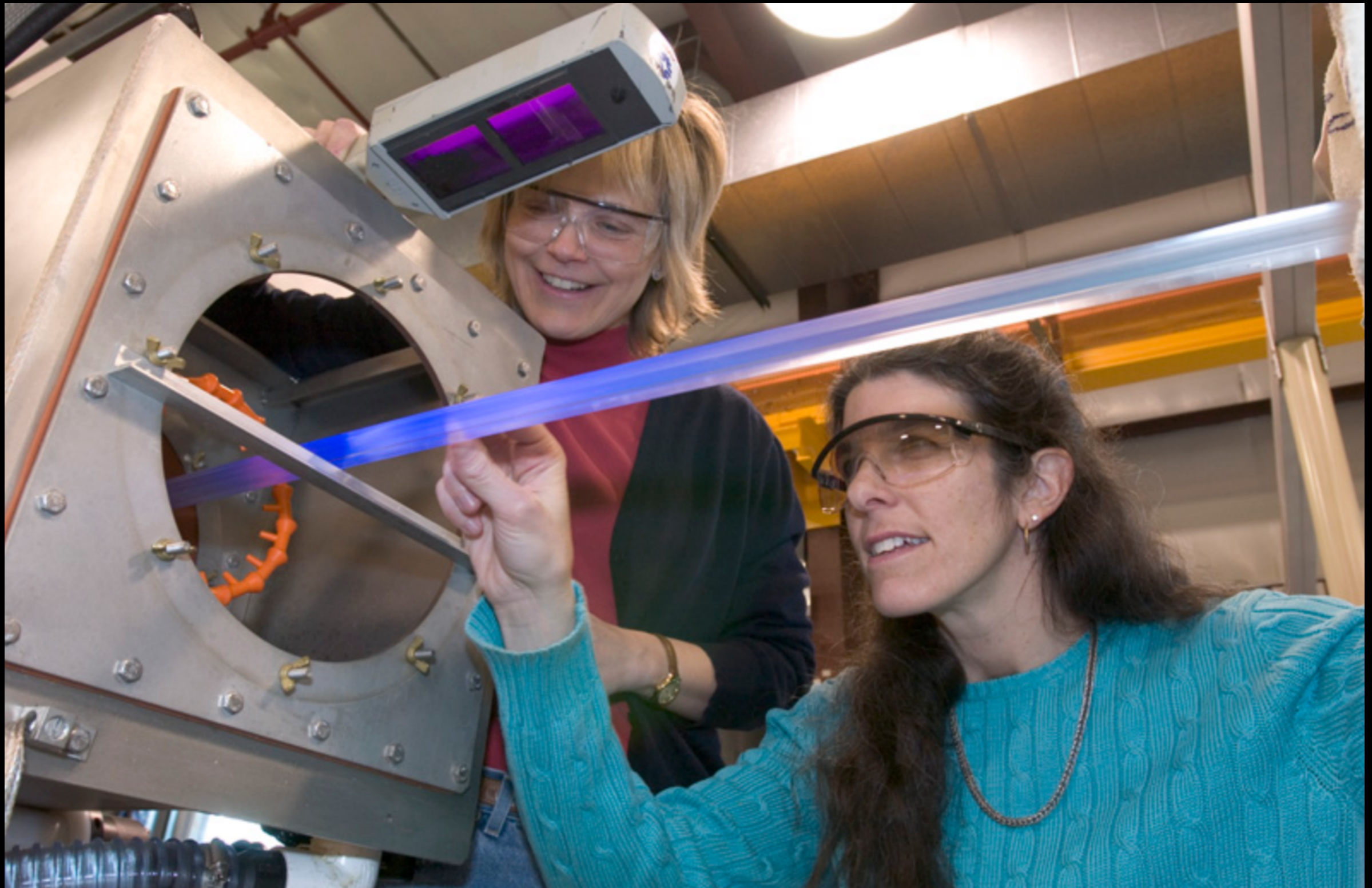
Requirements: Massive neutrinos & different masses

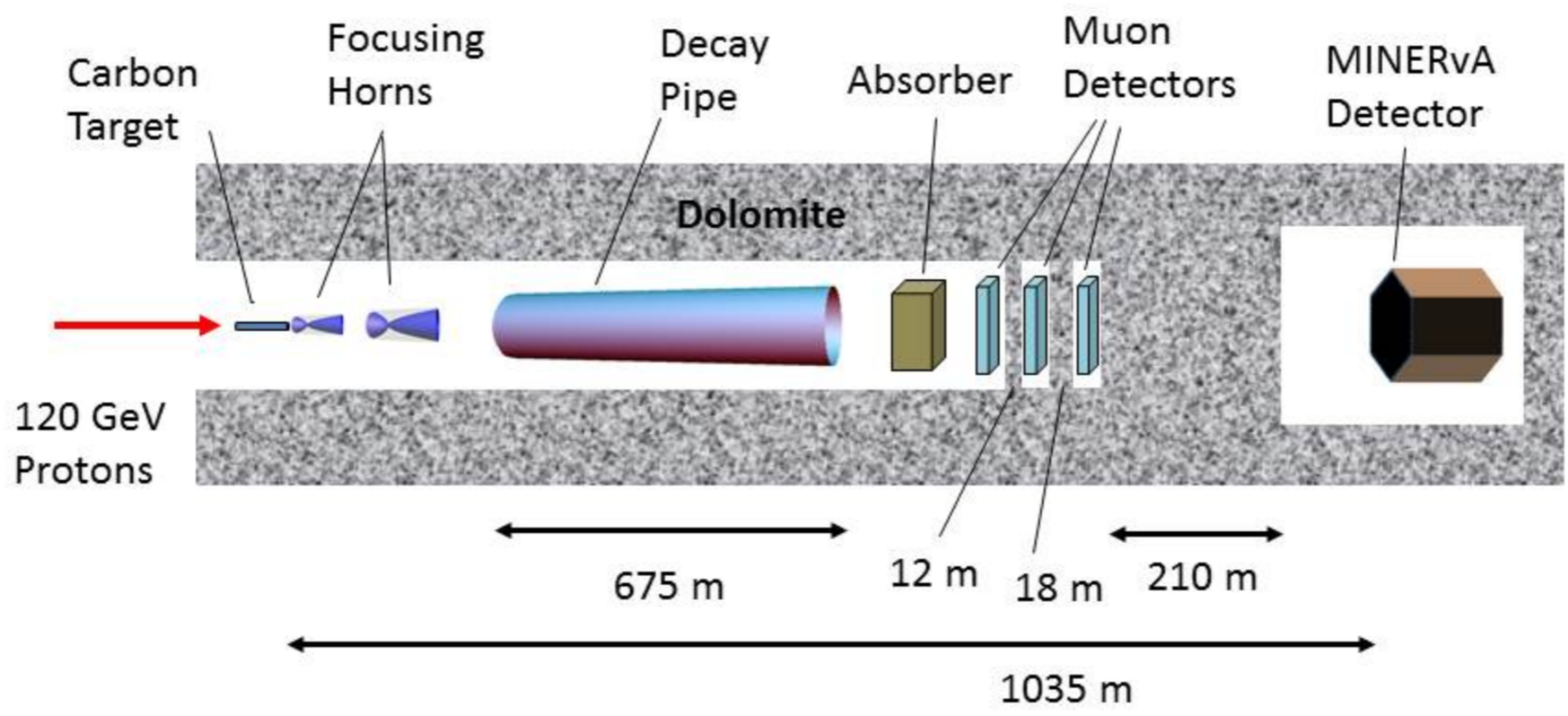


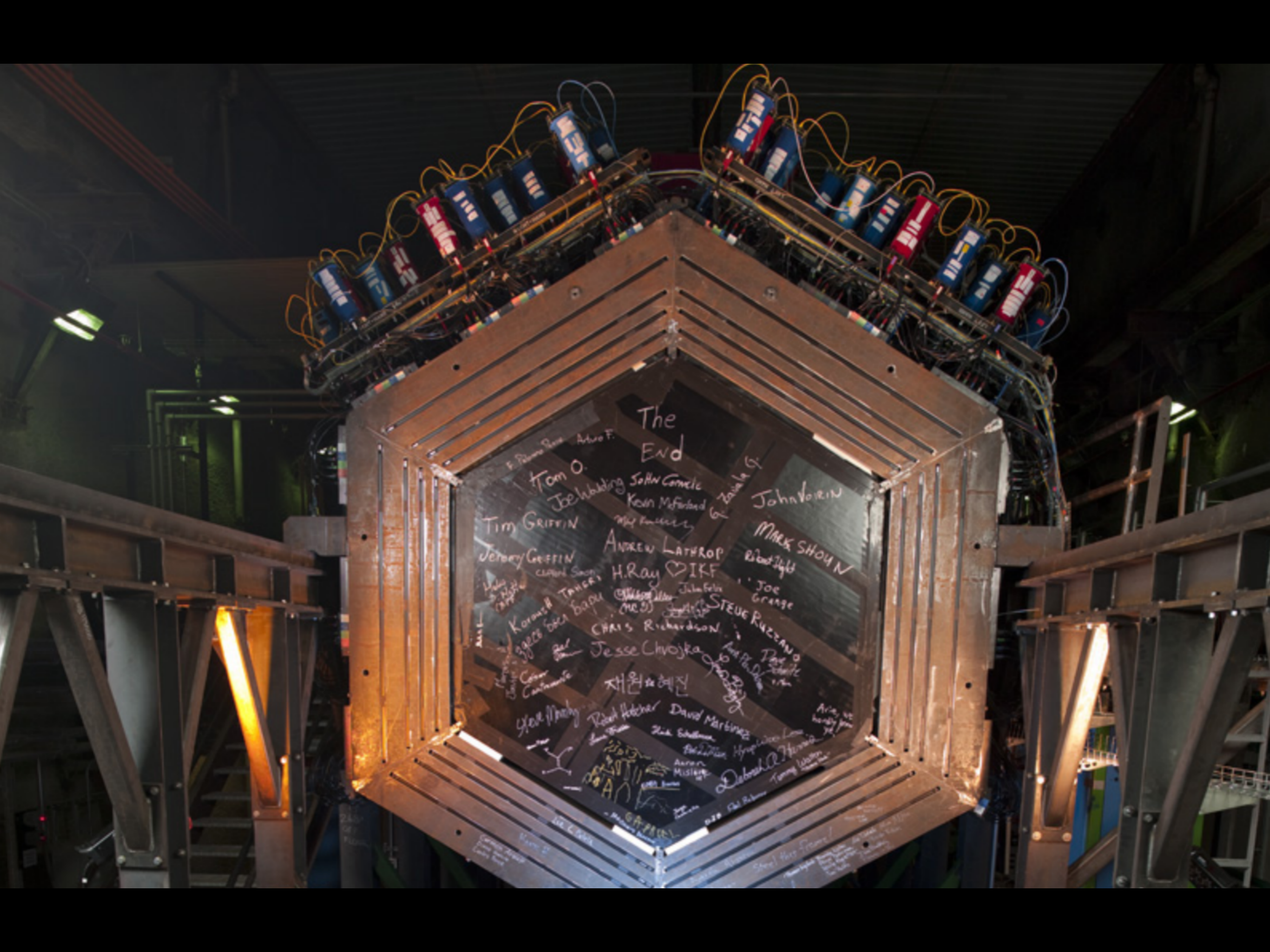
Cuando una partícula cargada llega o se produce en Minerva una barra centelleadora absorbe su energía, que es emitida en forma de luz visible.

Esta luz se transmite a través de fibras ópticas hasta unos detectores de luz llamados fotomultiplicadores, que mediante el efecto fotoeléctrico convierten la luz que reciben en pulsos eléctricos

El tiempo y la intensidad de estos pulsos son registrados







The End

F. Romeo, Steve, Arno F.
Tom O.
Joe Habbing, Sofin Cornele
Tim Griffin, Kevin McFarland
Jerome Griffin, Andrew Lathrop
H. Ray, IKF
Koravath, TAREK, Chris Richardson
Jesse Chvojka
Yee Minky
David Martinez
Deborah R. Hernandez
John Vorein
Mark Shou N
Joe Grange
STEVE RUZZANO
JULIA FELIX
CHRIS RICHARDSON
JESSE CHOYKA
DAVID MARTINEZ
DEBORAH R. HERNANDEZ



