



Telescopios de neutrinos

Otra forma de mirar al cielo

Juan Zúñiga Román

Dpto. de Física Atómica, Molecular y Nuclear (Facultad de Física)

Instituto de Física Corpuscular (UV-CSIC)

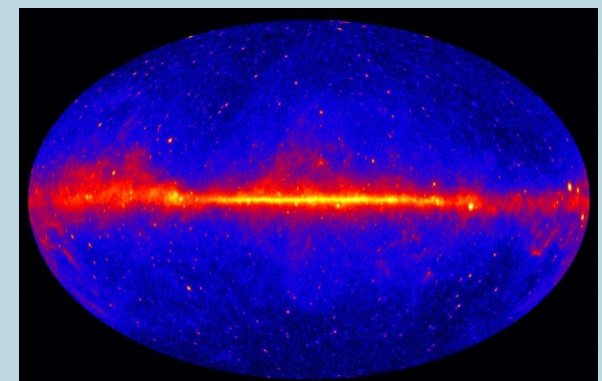
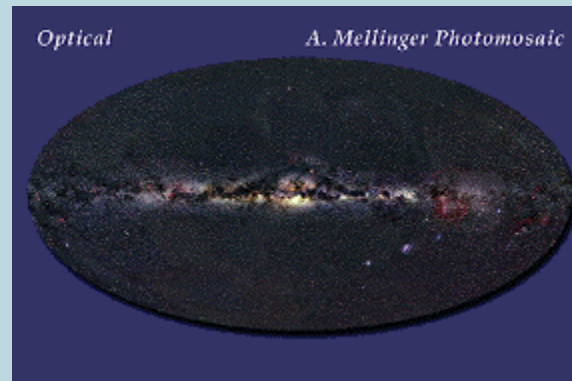
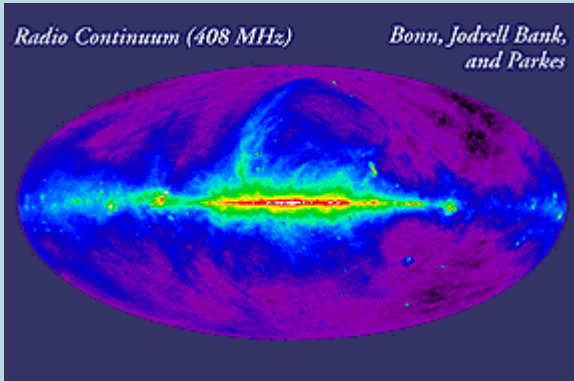
Universidad de Valencia

“Arquitectura Cósmica II: Materia y
Energía en el Universo”
FVEA, 17 octubre 2013



ASTRONOMÍA DE NEUTRINOS

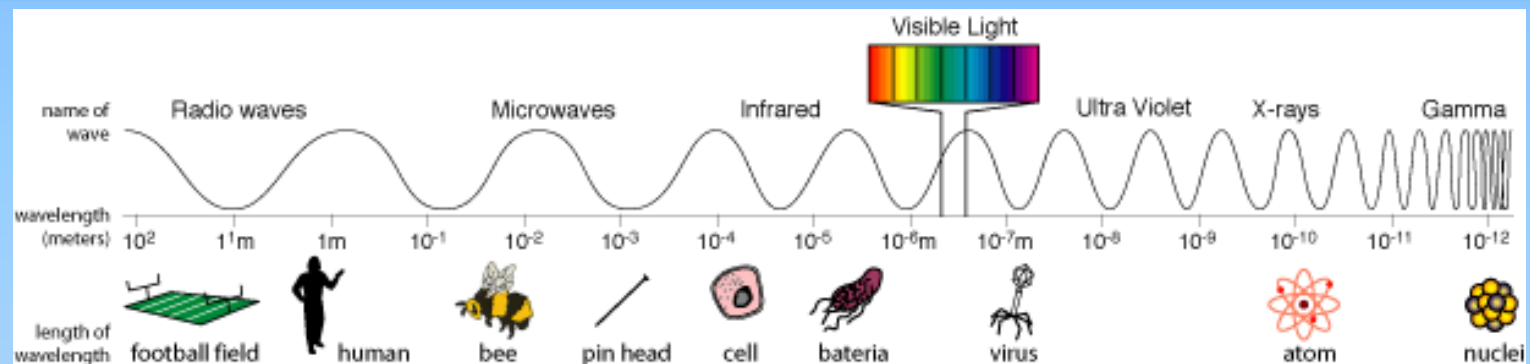
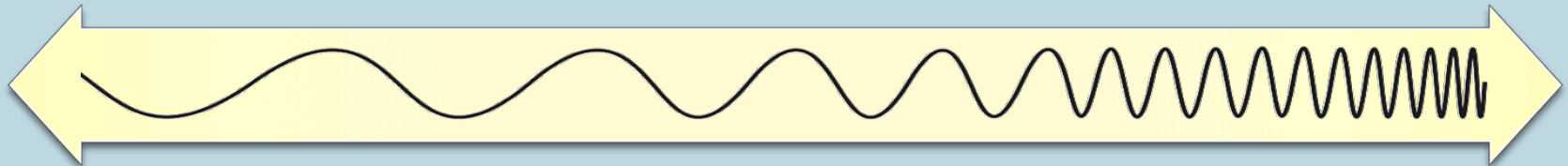
ASTRONOMÍA DE NEUTRINOS



Ondas de radio

Visible

Rayos X y gamma



Fuentes de neutrinos

El Sol

$$\nu_e$$

$$\Phi_{\nu}^{Tierra} = 6 \times 10^{10} \nu / \text{cm}^2\text{s}$$

$$E_{\nu} \sim 0.1 - 20 \text{ MeV}$$

El Big Bang

$$\rho_{\nu} = 330 / \text{cm}^3$$

$$E_{\nu} = 0.0004 \text{ eV}$$

$$(1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J})$$

SN1987

$$E_{\nu} \sim \text{MeV}$$

Neutrinos atmosféricos

$$\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_{\mu}, \nu_e, \nu_{\mu}$$

$$\Phi_{\nu} \sim 1 \nu / \text{cm}^2\text{s}$$

$$E_{\nu} \sim 0.1 - 100 \text{ GeV}$$

Cuerpo Humano

$$\Phi_{\nu} = 340 \times 10^6 \nu / \text{día}$$



Reactores Nucleares

$$E_{\nu} \sim \text{pocos MeV}$$

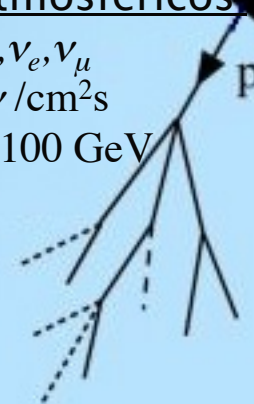


Radioactividad terrestre

$$\Phi_{\nu} \sim 6 \times 10^6 \nu / \text{cm}^2\text{s}$$

Aceleradores

$$E_{\nu} \sim 0.3 - 30 \text{ GeV}$$

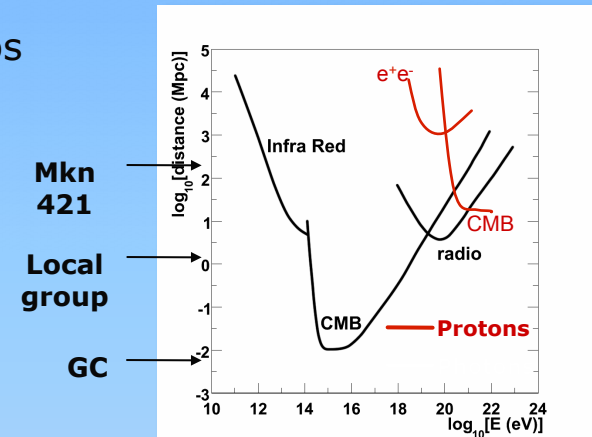


MENSAJEROS CÓSMICOS

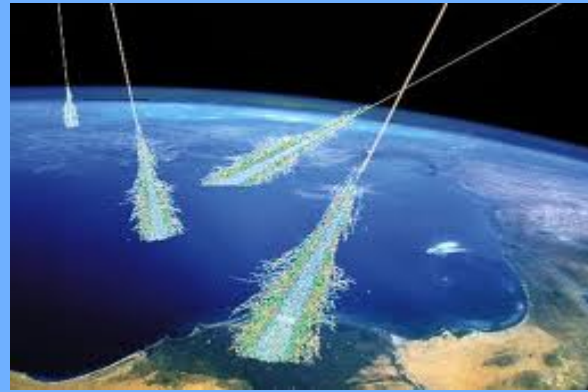
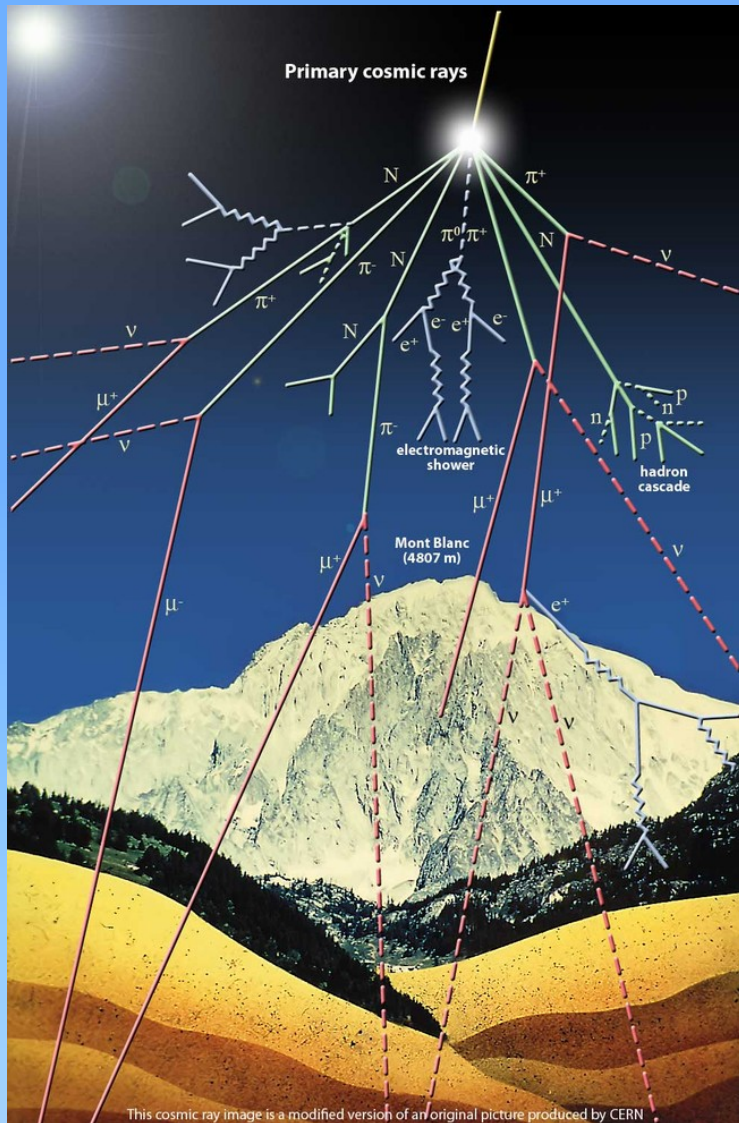
Otras astronomías



- ❑ **Rayos cósmicos.**- Son desviados por los campos magnéticos en su recorrido hacia la Tierra y además, a muy alta energía, sin embargo el fondo de micro-ondas los absorbe.
- ❑ **Neutrones.**- Otras partículas viven muy poco tiempo...
- ❑ **Rayos gamma.**- Los “fotones” de muy alta energía son absorbidos.
- ❑ Los **neutrinos** apenas interactúan y no son desviados.



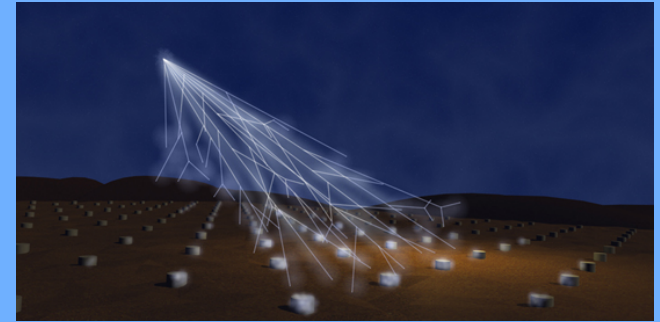
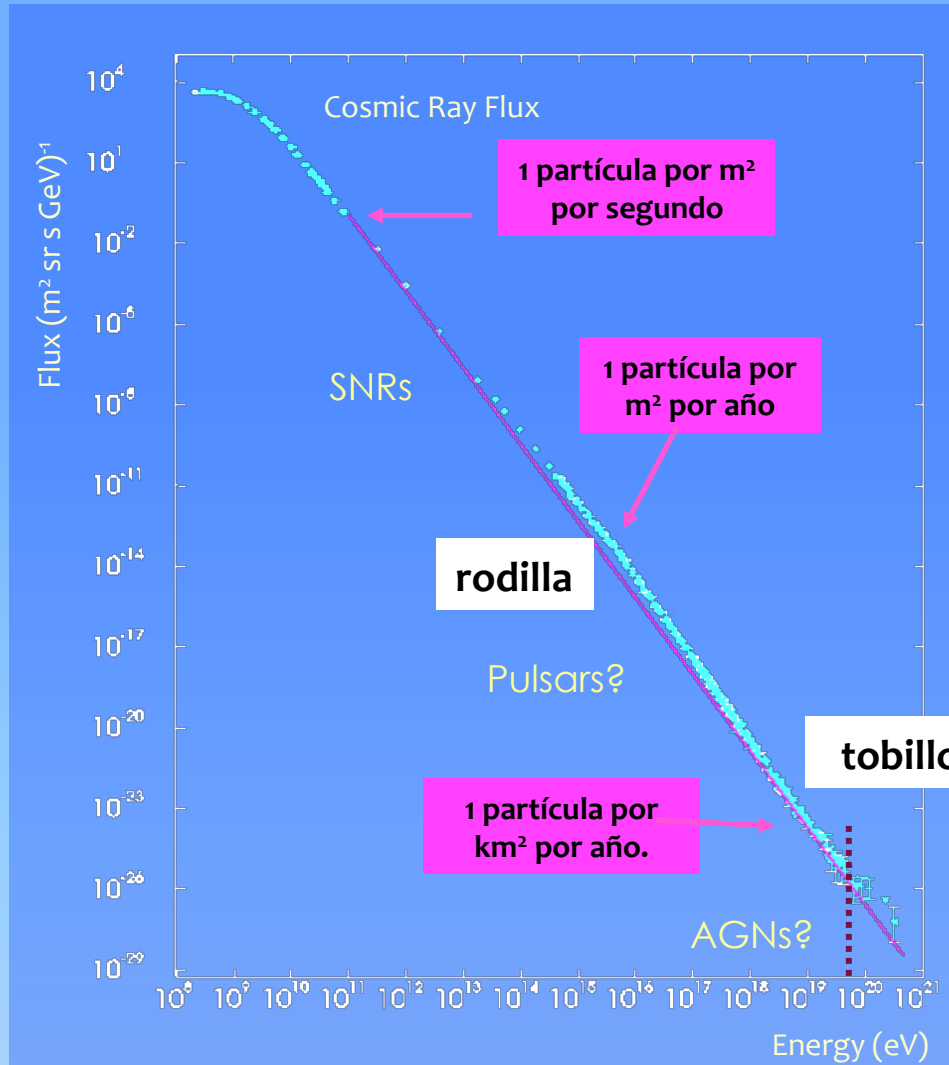
RAYOS CÓSMICOS



- Descubiertos hace 100 años (Hess, 1912)
- Atraviesan constantemente el espacio y vienen de todas direcciones
- Sabemos que son:
 - Protones (90%)
 - Núcleos de He (9%)
 - Electrones (1%)
- Producen lluvias de partículas al chocar con la atmósfera.
- Sin embargo, su origen sigue siendo un misterio.

RAYOS CÓSMICOS

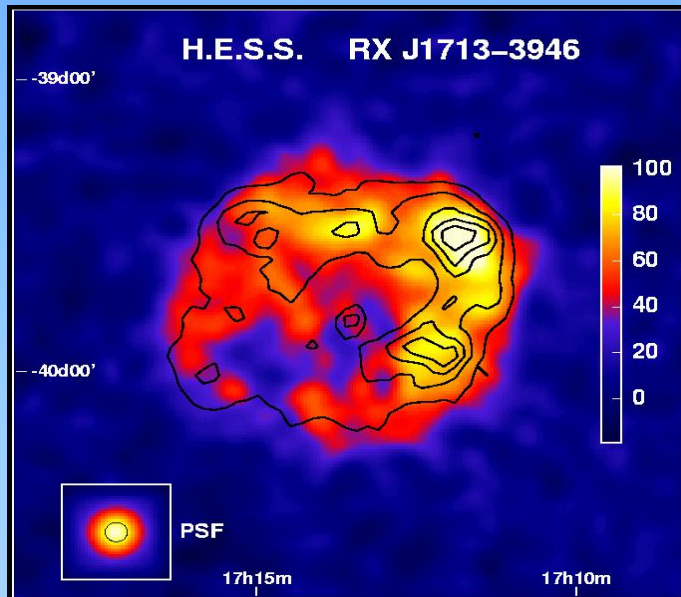
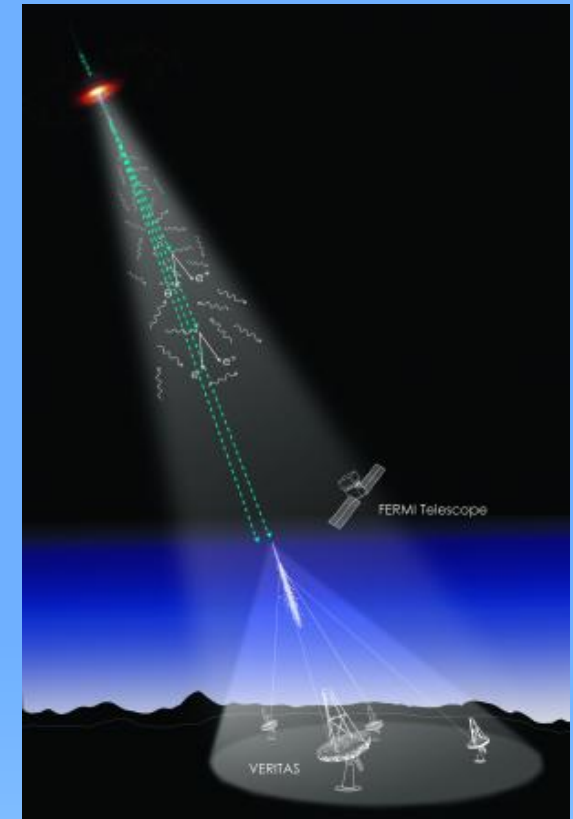
Espectro de energías



- El problema del origen de los rayos cósmicos sigue sin estar resuelto:
 - ☐ $E < 10^{15}$ eV: SNRs?
 - ☐ $E \sim 10^{15} - 5 \times 10^{18}$ eV: púlsares?
 - ☐ $E > 5 \times 10^{18}$ eV: AGNs?, GRBs?
- Por encima de $\sim 6 \times 10^{19}$ eV, el flujo disminuye drásticamente por la interacción de los protones con el fondo de radiación de microondas
- Los neutrinos pueden ser la clave para entender el origen de los rayos cósmicos

RAYOS GAMMA

- Son los cuantos de luz más energéticos del espectro electromagnético.
- Los más energéticos también producen lluvias de partículas en la atmósfera.
- Durante los últimos años, se han observados varias fuentes que emiten rayos gamma de energías por encima del TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).



- Para explicar este fenómeno, se han propuesto dos mecanismos diferentes:
 - **procesos leptónicos** (*Compton inverso, radiación de frenado*)
 - **la desintegración de piones neutros** (*producidos en interacciones hadrónicas*). En este último caso se producirían también neutrinos.

ASTRONOMÍA DE NEUTRINOS

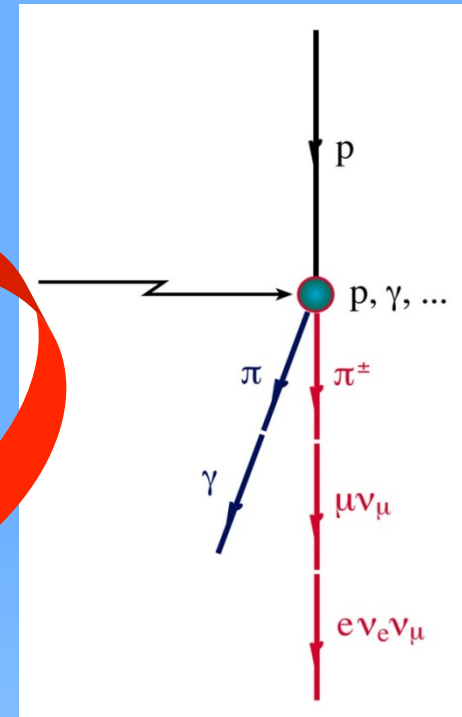
Conexión con los rayos cósmicos

Los neutrinos se pueden producir en las interacciones de nucleones de alta energía con radiación o con materia

$$pp, p\gamma \rightarrow \pi^\pm (K^\pm \dots) + Y \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu) + Y$$

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e (\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu (\nu_\mu)$$

¡Donde quiera que haya protones acelerados tiene que haber neutrinos!

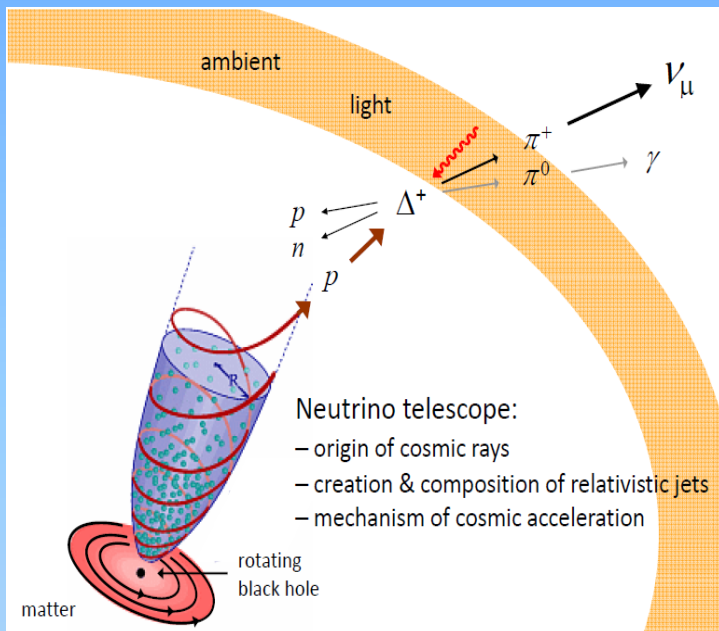


Conexión con los rayos gamma

$$pp, p\gamma \rightarrow \pi^0 + Y \rightarrow \gamma\gamma + Y$$

A su vez, los rayos gamma se pueden producir en las desintegraciones de los piones neutros

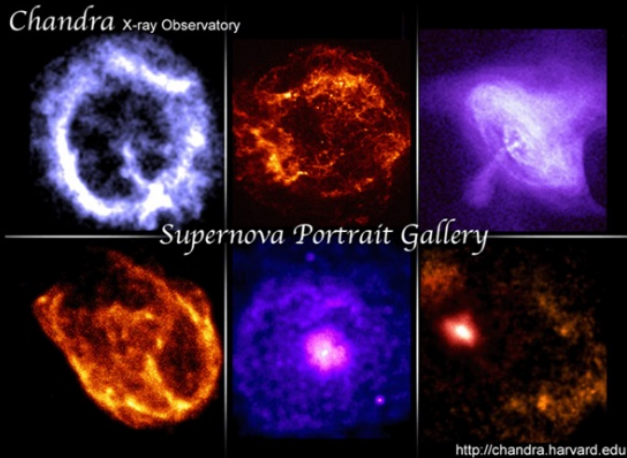
¡Dichos neutrinos vienen con gammas!



POSIBLES FUENTES DE NEUTRINOS CÓSMICOS

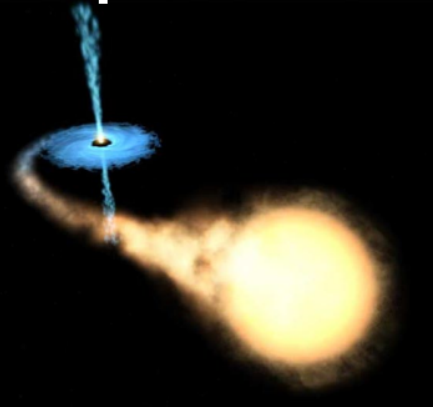
Fuentes Galácticas

Remanentes de supernovas

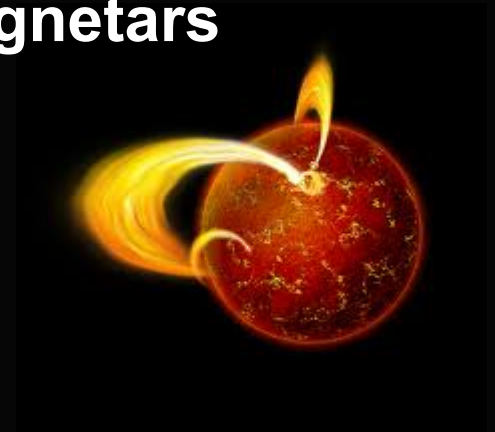


Diferentes remanentes de supernovas observados con el telescopio Chandra

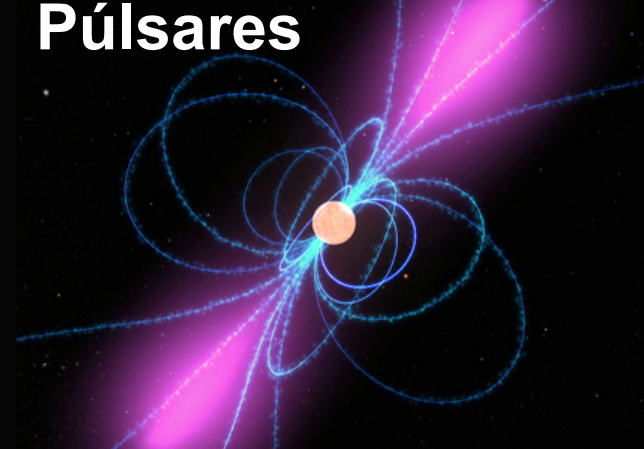
Microquásares



Magnetars



Púlsares



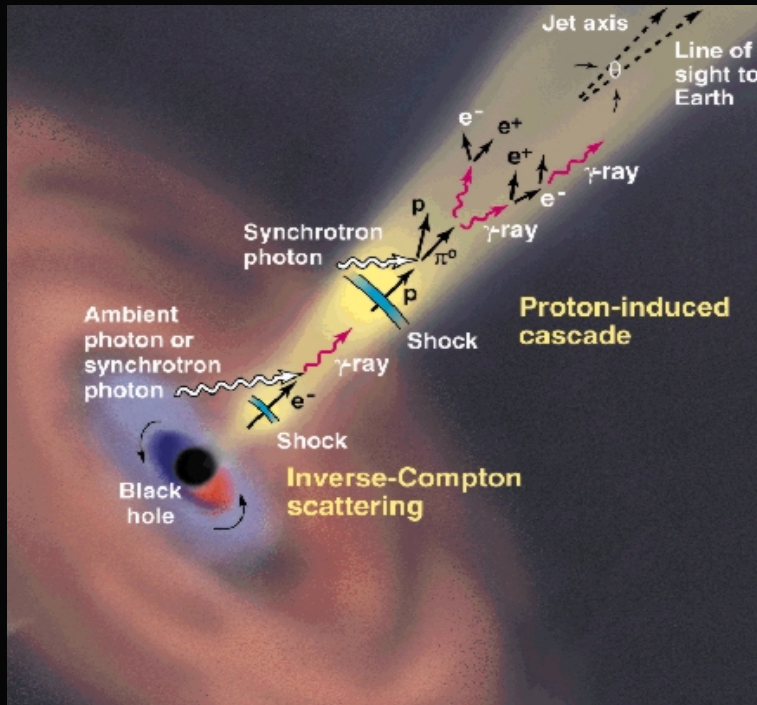
Centro Galáctico



Fuentes Extra-Galácticas

Núcleos de Galaxias Activas

- Los Núcleos de Galaxias Activas (AGNs) incluyen varios tipos de objetos: Seyferts I y II, quasars, radio-galaxias y blazars.
- El modelo estándar de AGNs sugiere que son el mismo objeto observado desde distintos ángulos

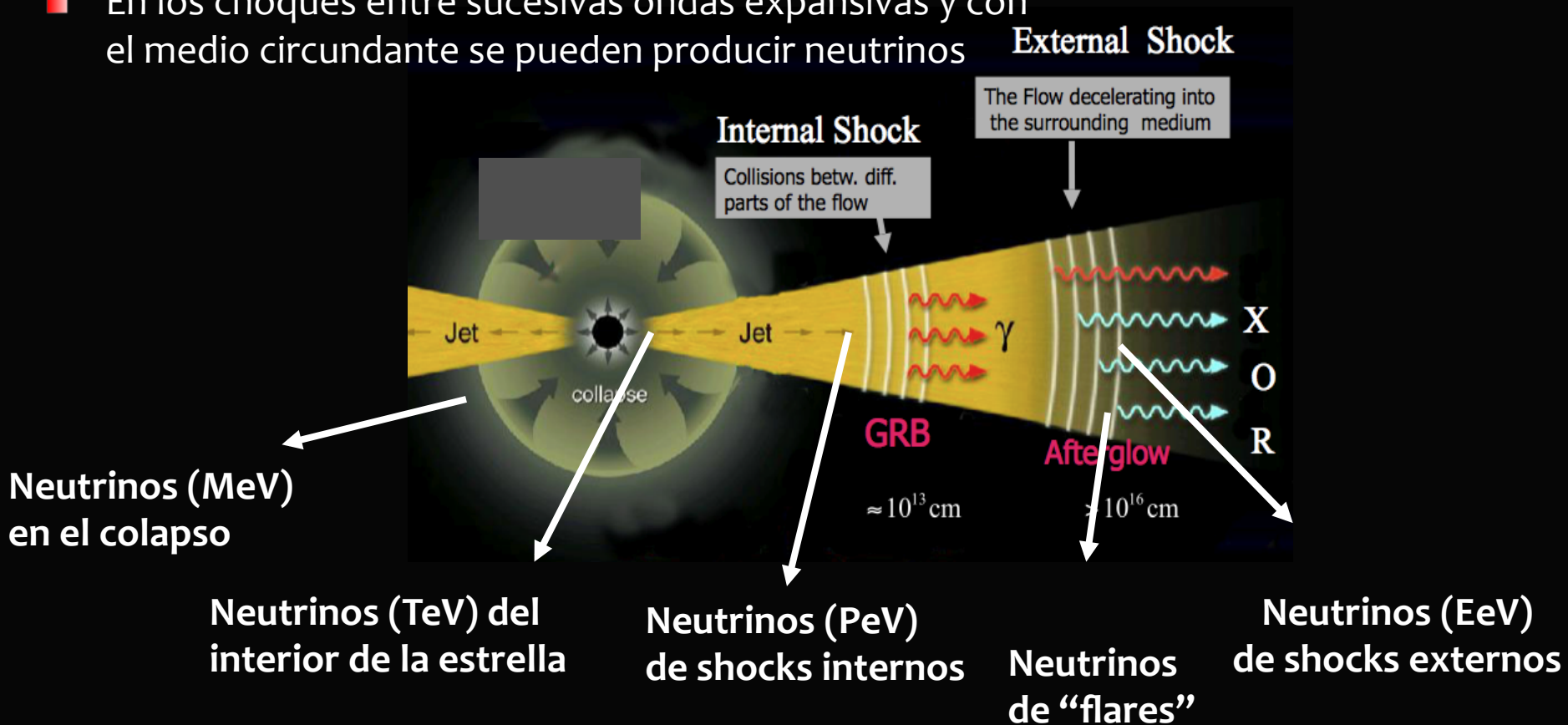
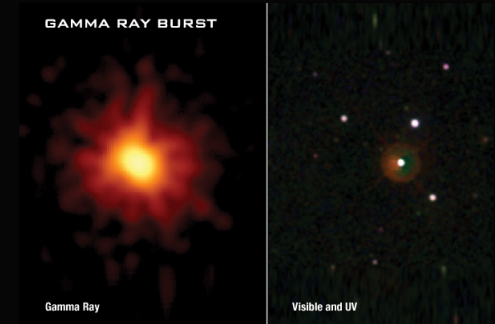


- Se cree que consisten en un agujero negro supermasivo (10^6 - $10^8 M_{\odot}$) hacia el que grandes cantidades de materia son acretadas.
- Si hay aceleración de protones en los jets, también debe haber neutrinos de alta energía.

EXPLOSIONES DE RAYOS GAMMA

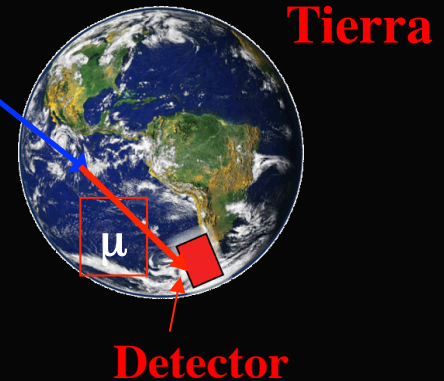
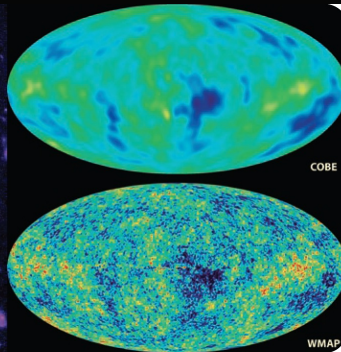
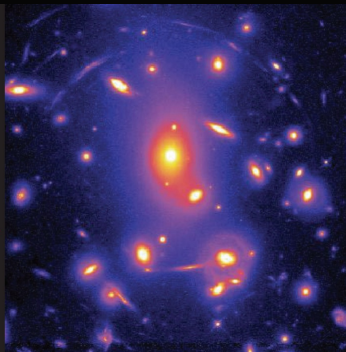
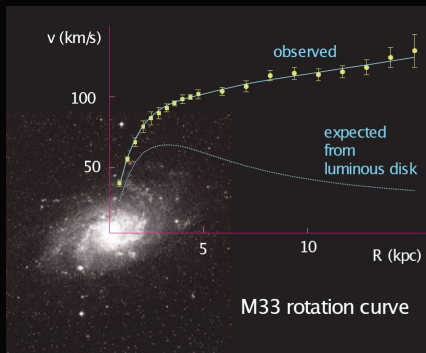
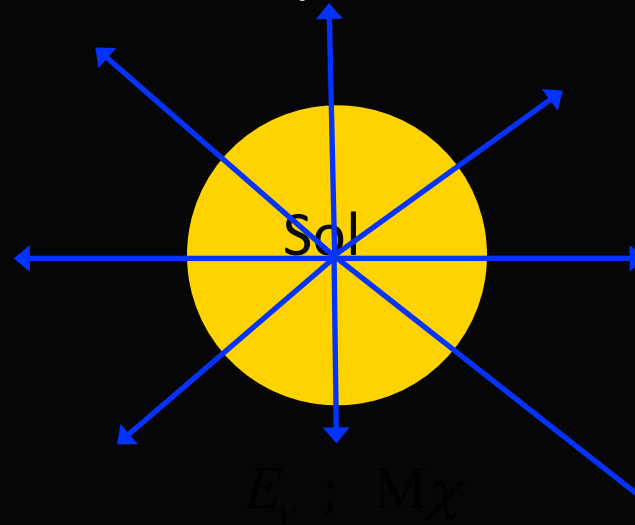
(Gamma Ray Bursts)

- Son explosiones intensas y breves de rayos gamma, seguidas de emisión de rayos X, luz visible y radio.
- Se piensa que se originan por el colapso de una estrella super-masiva
- En los choques entre sucesivas ondas expansivas y con el medio circundante se pueden producir neutrinos



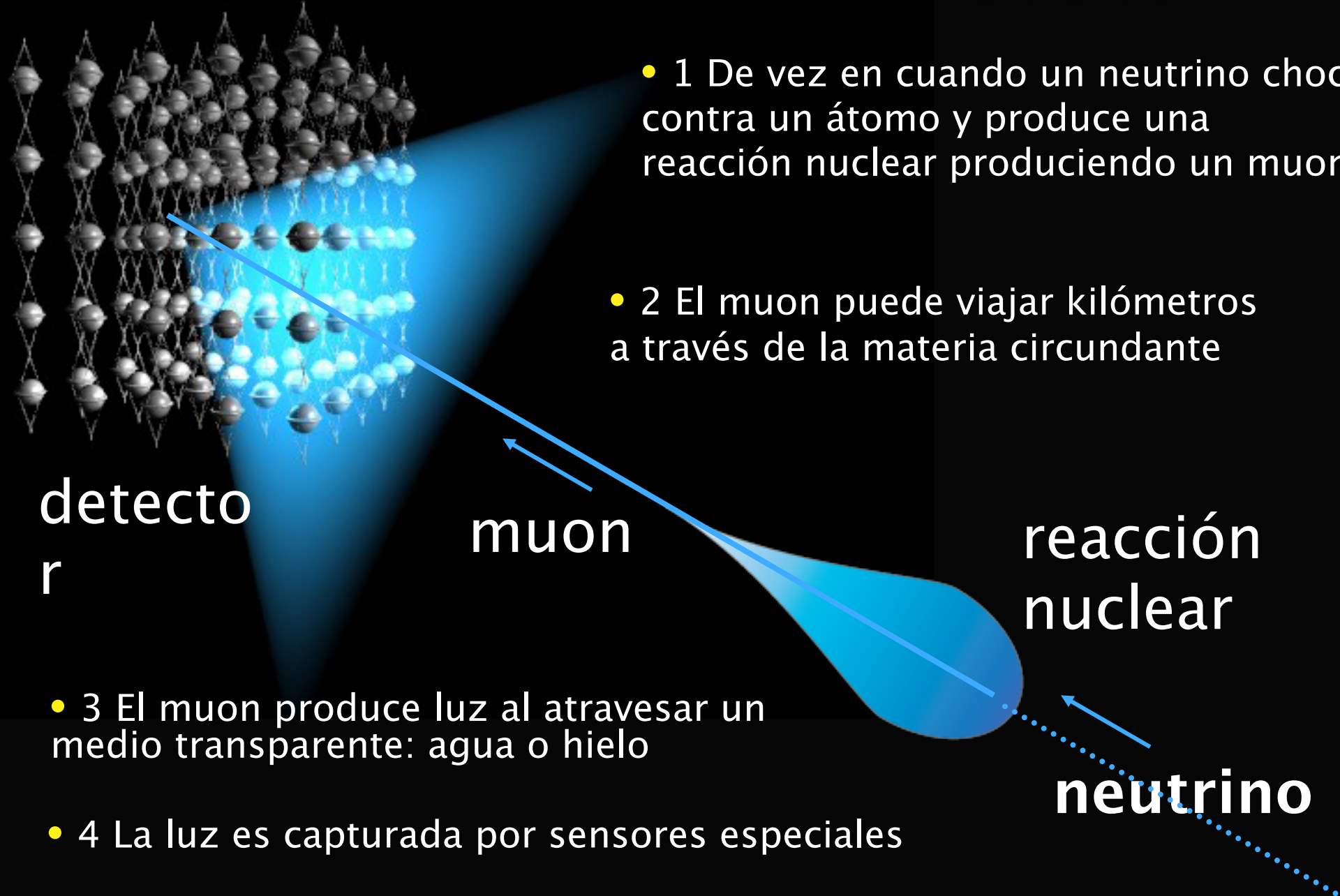
MATERIA OSCURA

- ❑ La materia oscura podría estar formada por neutralinos, que se acumularían en objetos masivos como el Sol o el Centro Galáctico
- ❑ Los productos de su auto-aniquilación darían lugar a neutrinos, que podrían ser detectados por los telescopios de neutrinos

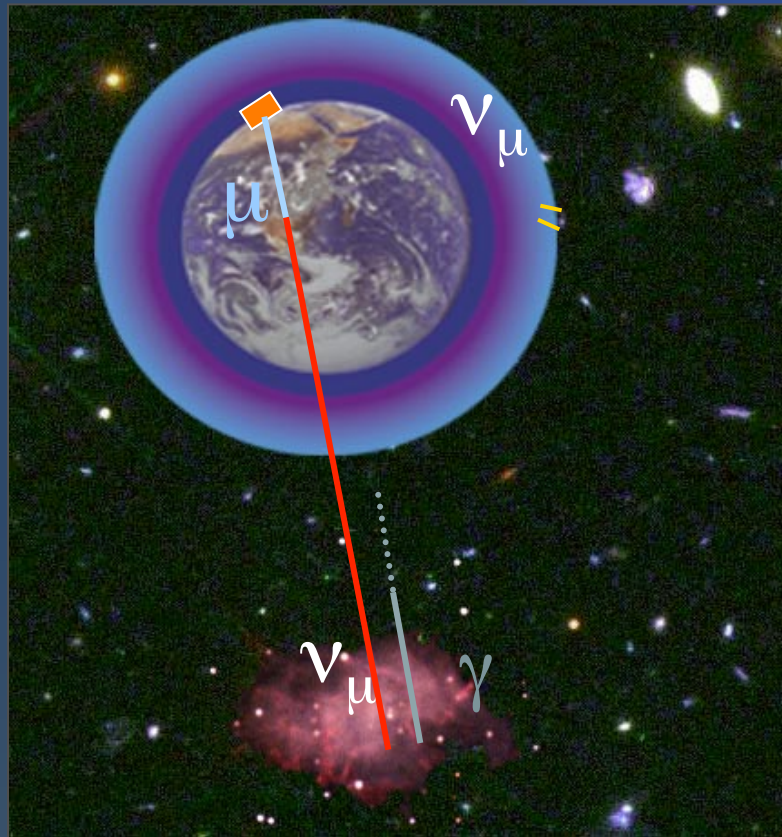


PRINCIPIO DE DETECCIÓN

PRINCIPIO DE DETECCIÓN



PRINCIPIO DE DETECCIÓN



Luz Cherenkov
inducida por el μ

2500 m
profundidad

3D PMT array

γ

43°

Medida del tiempo de
llegada y la posición de
los fotones

μ ($\sim \nu$) trayectoria

interacción



16

EFECTO CHERENKOV

¿Qué sucede cuando quien produce las ondas va a mayor velocidad que las propias ondas?

Fuente estacionaria

$$v_{\text{fuente}} < v_{\text{onda}}$$

$$v_{\text{fuente}} = v_{\text{onda}}$$

$$v_{\text{fuente}} > v_{\text{onda}}$$

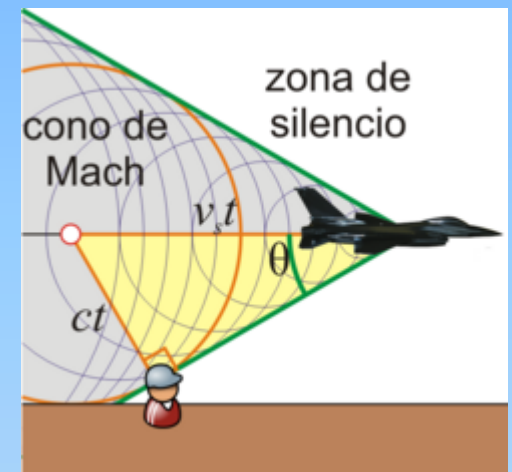
•

•

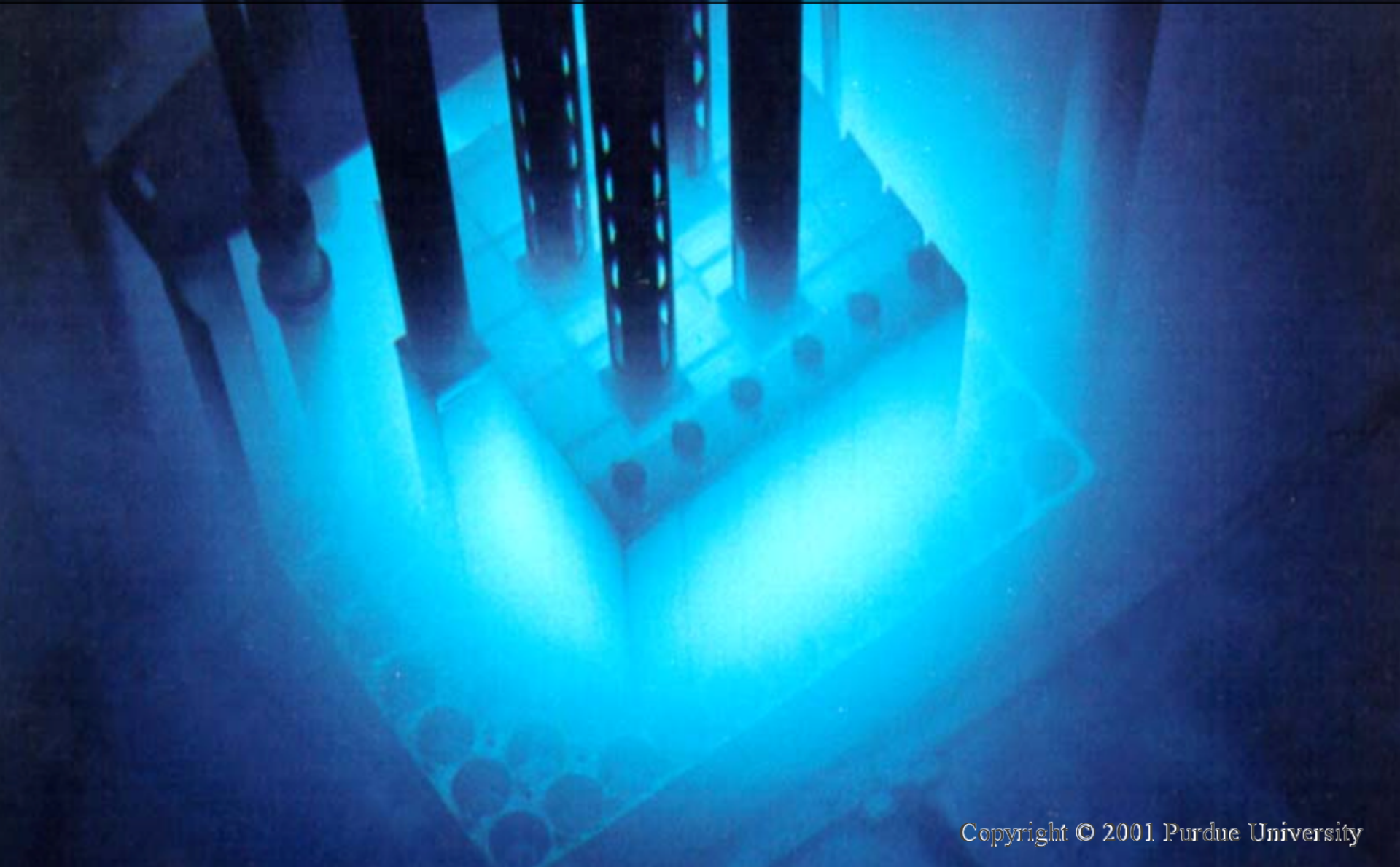
•

•

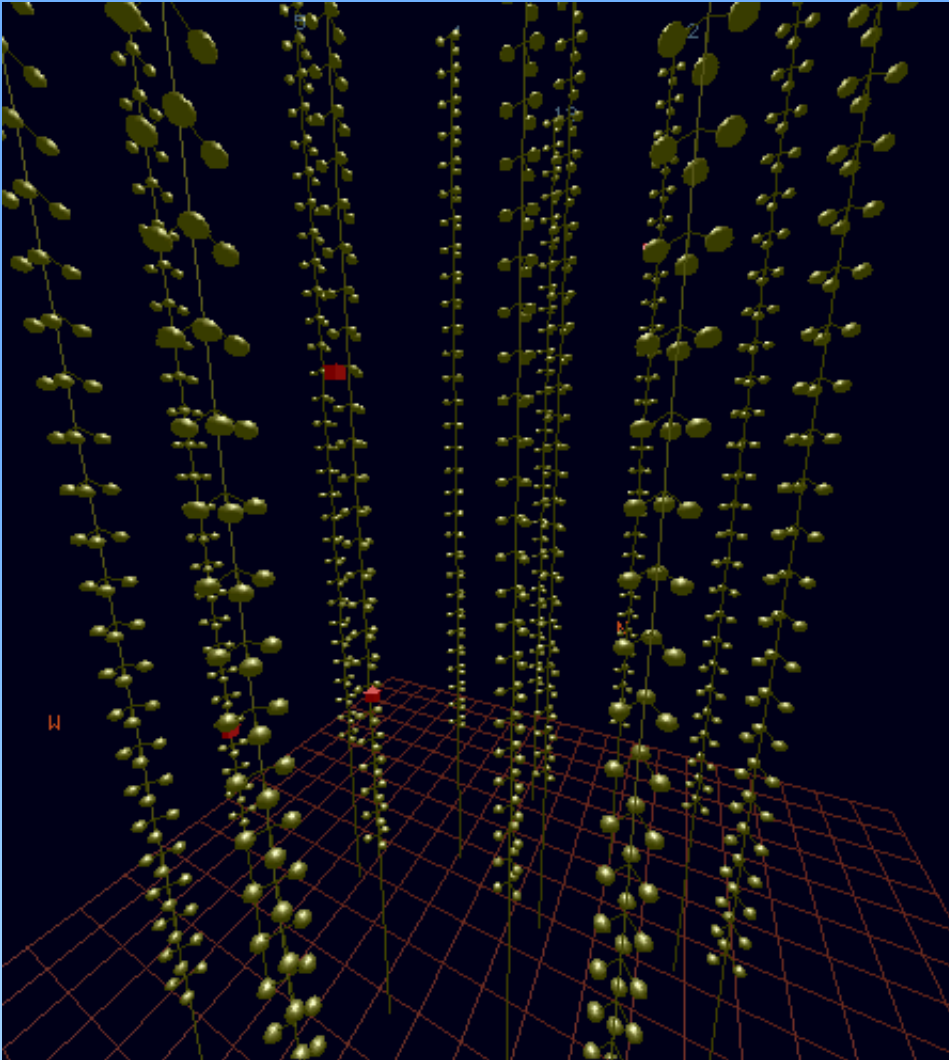
- Fenómeno equivalente a la **estela de los barcos**, o la onda de choque de los **aviones supersónicos**.
- Cuando es producido por partículas cargadas que viajan a mayor velocidad que la luz en el medio se denomina **efecto Cherenkov**.
- Los muones polarizan y excitan las moléculas de agua que al des-excitarse emiten **radiación Cherenkov**.



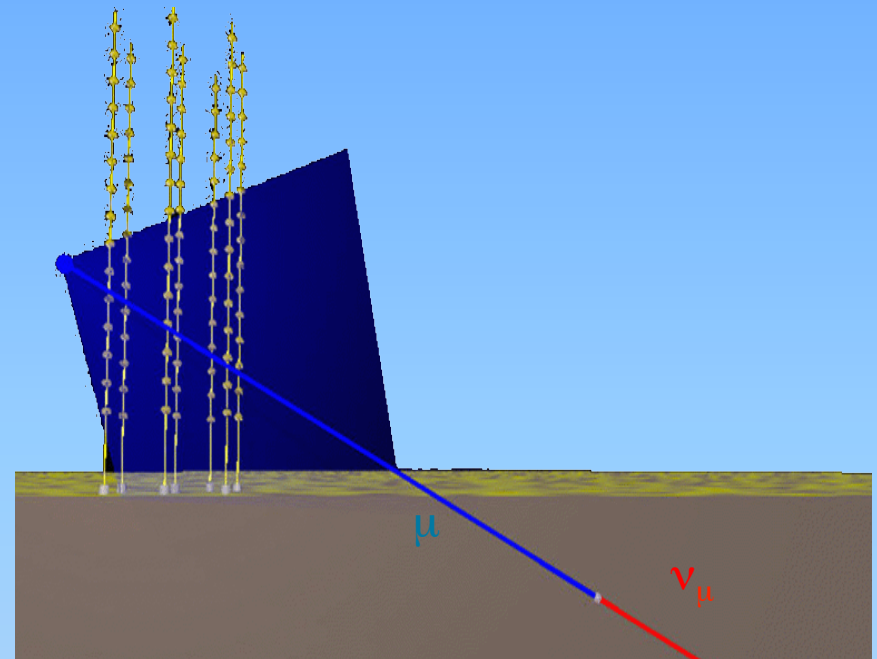
Luz azulada emitida por las partículas producidas en un reactor nuclear



PRINCIPIO DE DETECCIÓN



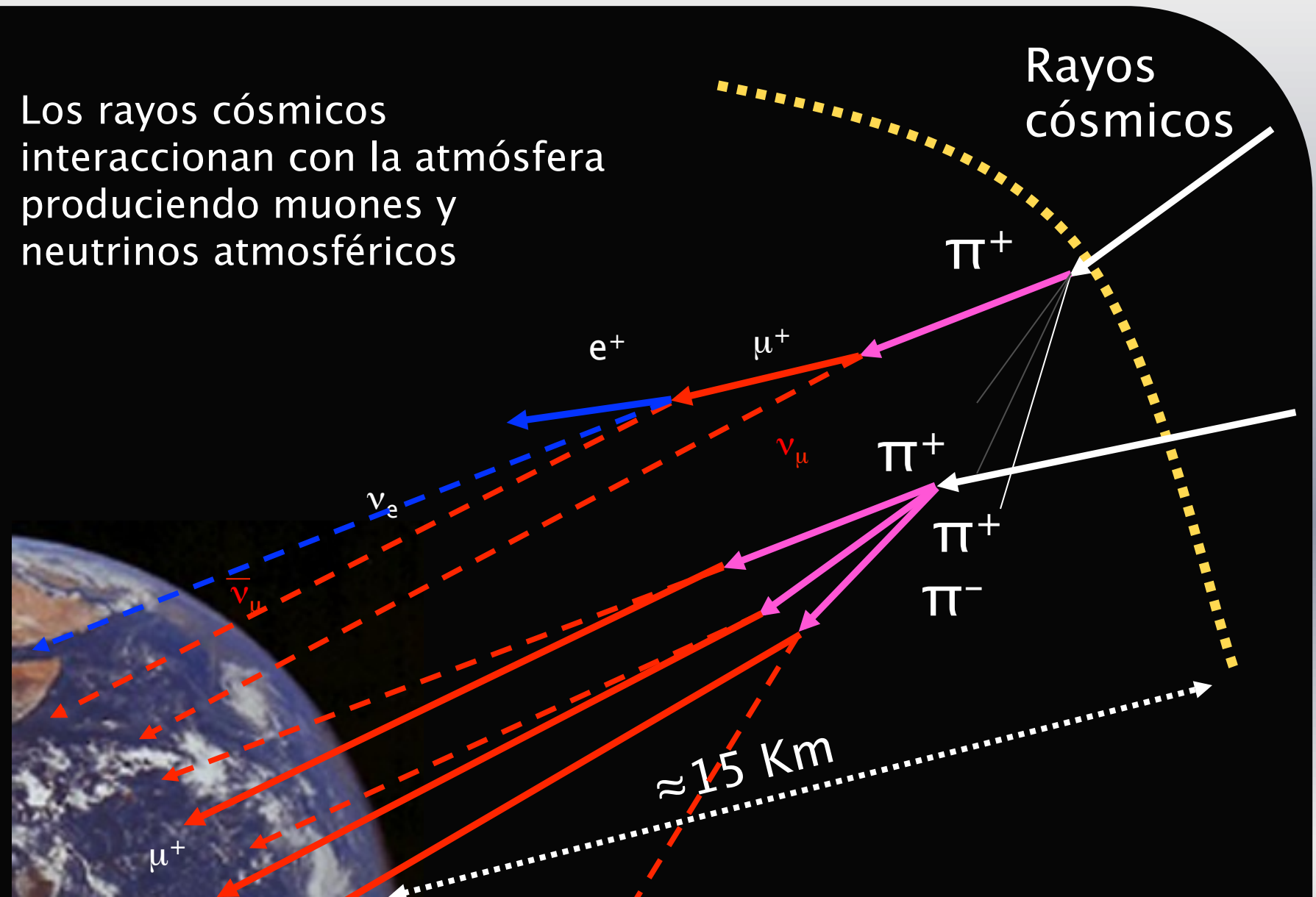
***Muon de energía
1.2 TeV cruzando
el detector***



FONDO FÍSICO

¡Tenemos un problema, o dos!

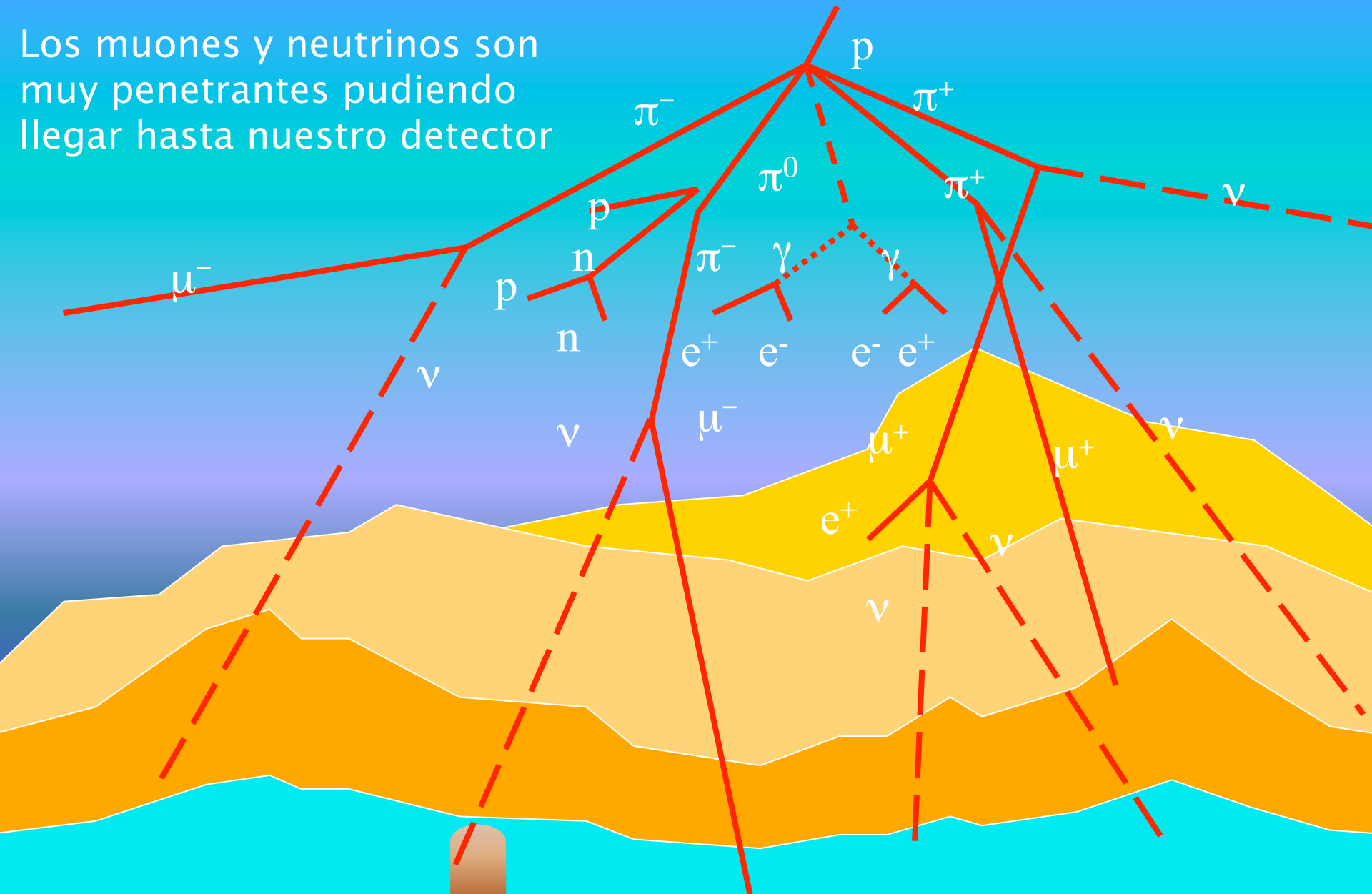
Los rayos cósmicos interactúan con la atmósfera produciendo muones y neutrinos atmosféricos



FONDO FÍSICO

¡Tenemos un problema, o dos!

Los muones y neutrinos son muy penetrantes pudiendo llegar hasta nuestro detector



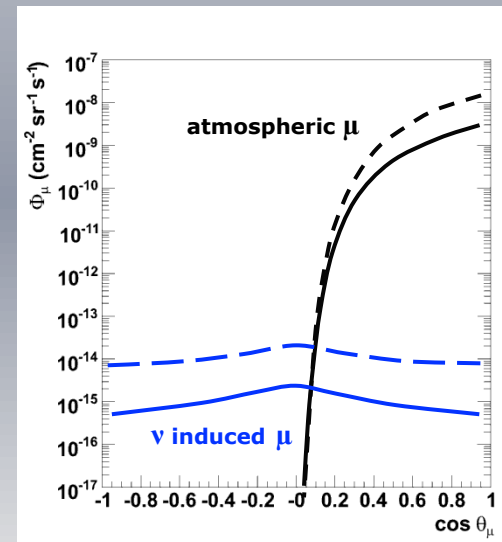
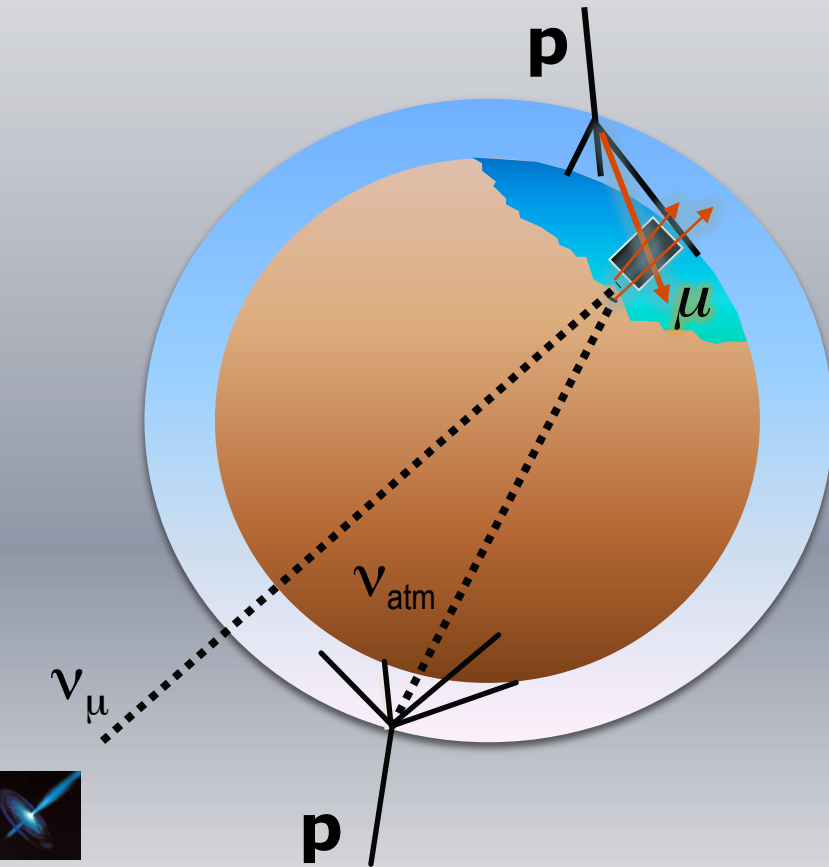
FONDO FÍSICO

MIRANDO EN DIRECCIÓN CONTRARIA

1.- Los neutrinos cósmicos interactúan en la Tierra y producen un muon

2.- Pero los muones atmosféricos también pueden inducir una señal en el detector

3.- Así como los neutrinos atmosféricos indistinguibles de los neutrinos cósmicos



Solución: buscar siempre sucesos **ascendentes** y **acumulaciones** en direcciones concretas o energía para descartar que sean neutrinos atmosféricos

EL TELESCOPIO DE NEUTRINOS ANTARES

La colaboración ANTARES



NIKHEF Amsterdam
KVI Groningen
NIOZ Texel



University of Erlangen
Bamberg Observatory
Univ. of Wurzburg



Moscow
(ITEP, MSU)

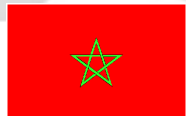


APC Paris
IFREMER, Brest
IRFU, Saclay
GRPHE Mulhouse
IReS, Strasbourg
CPPM Marseille
IFREMER, Toulon
COM, Marseille
OCA, Nice

8 países
31 Institutos
~150 científicos + ingenieros



❖ IFIC, Valencia
❖ UPV, Valencia
❖ UPC, Barcelona



Oujda

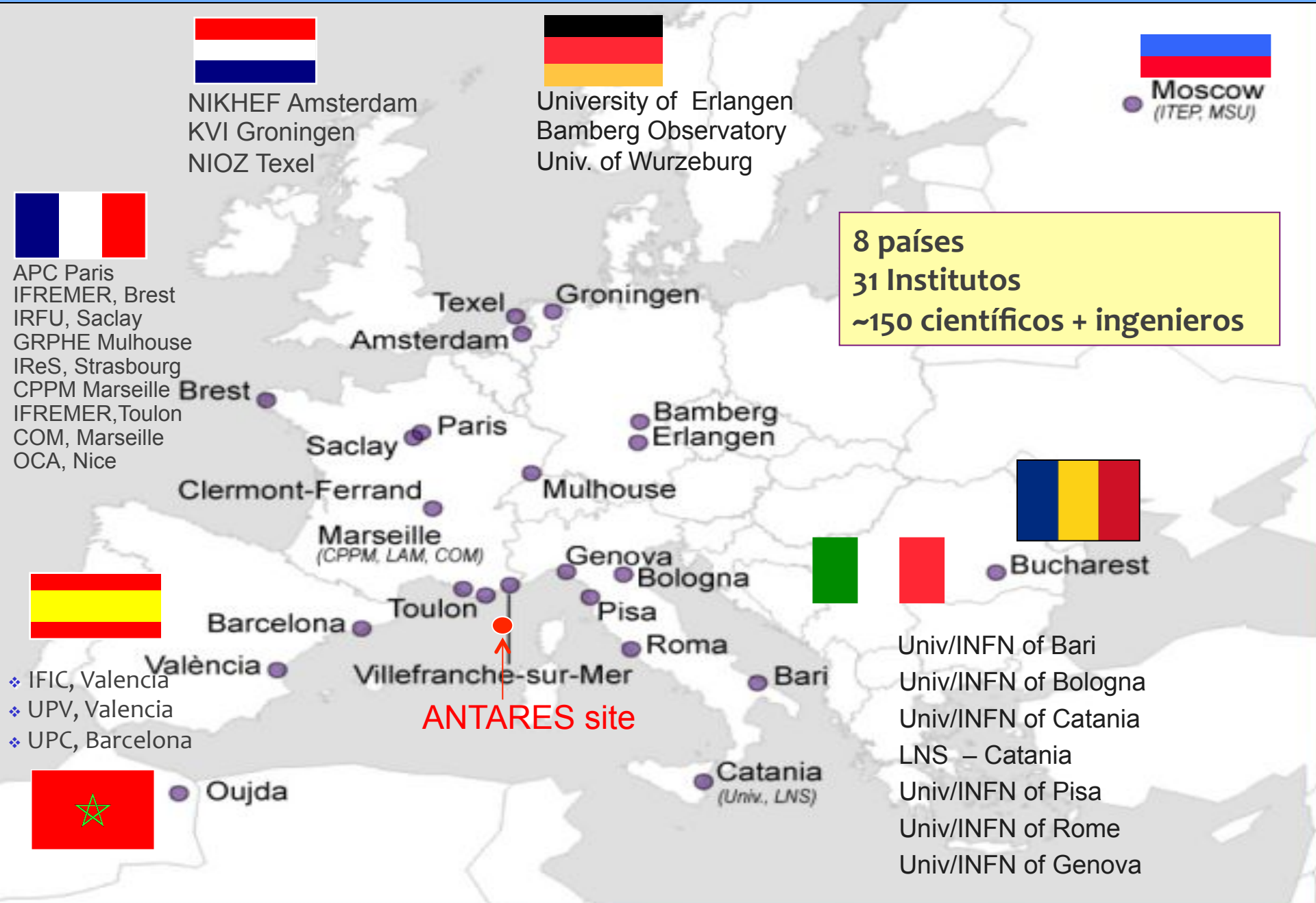


Bucharest



Univ/INFN of Bari
Univ/INFN of Bologna
Univ/INFN of Catania
LNS – Catania
Univ/INFN of Pisa
Univ/INFN of Rome
Univ/INFN of Genova

ANTARES site



EL DETECTOR ANTARES

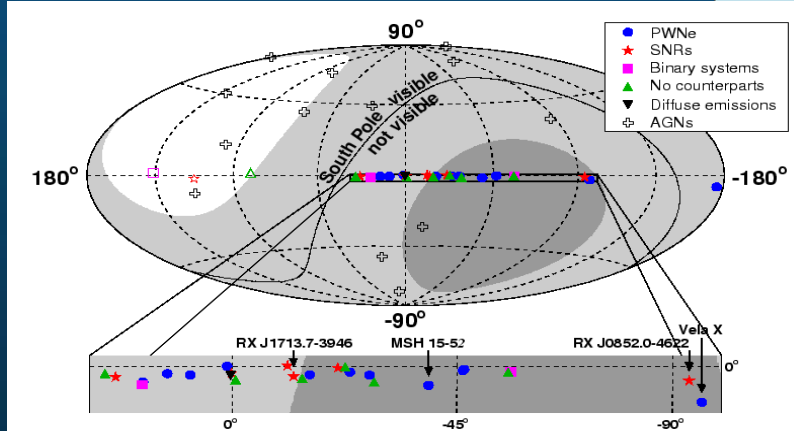


Los telescopios de neutrinos “miran hacia abajo”. ANTARES al estar en el Hemisferio Norte, puede observar el Centro Galáctico.

El detector ANTARES está situado en el mar Mediterráneo ($42^{\circ}50'N$, $6^{\circ}10'E$) a 2500 m de profundidad, cerca de la costa de Toulón (Francia).



Galactic coordinates



Estación de control en el Instituto M. Pacha



EL DETECTOR ANTARES

2500m
profundidad

Boya

350 m

14.5 m

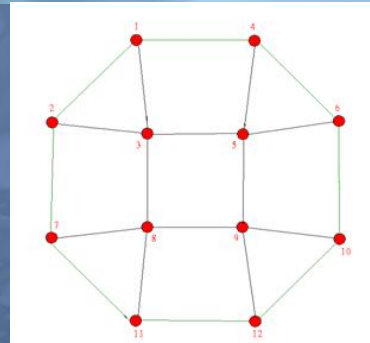
Cable electro-
óptico

100 m

Caja de
conexiones

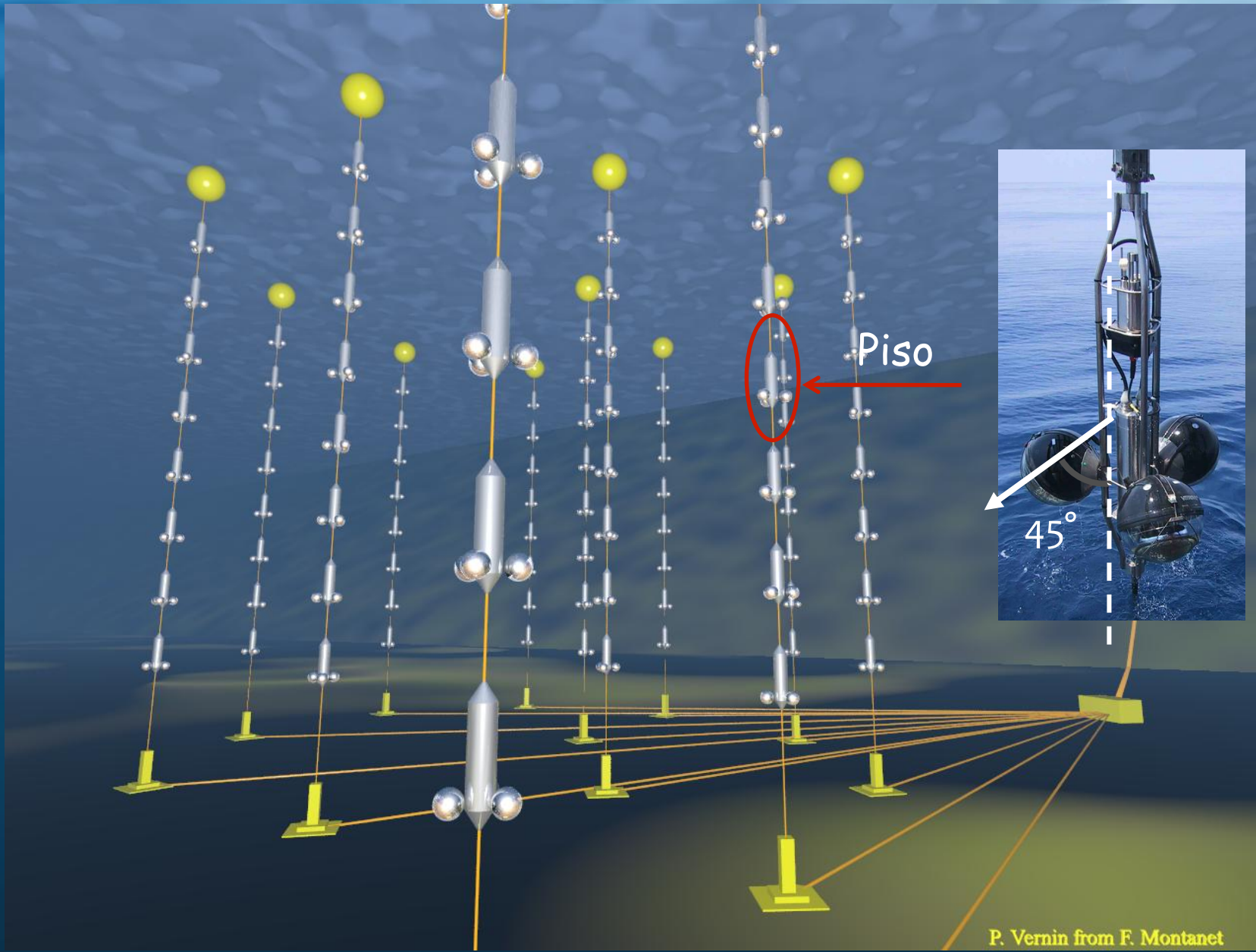
Cable de
conexión

~60 m



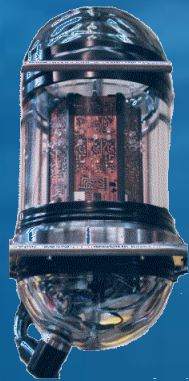
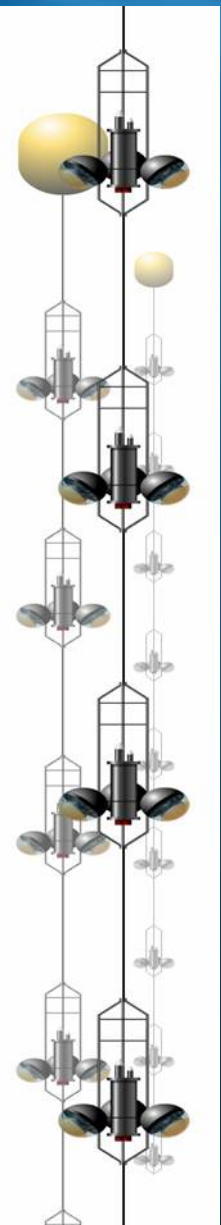
57 m

EL DETECTOR ANTARES

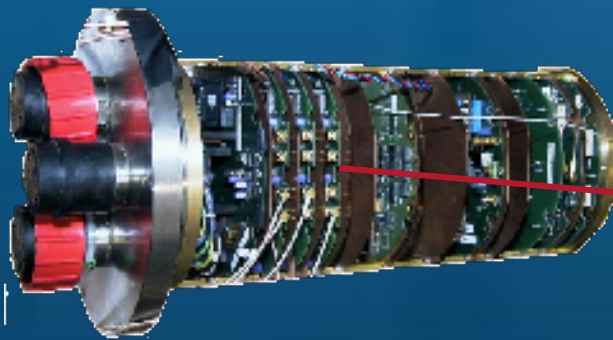




EL Detector ANTARES

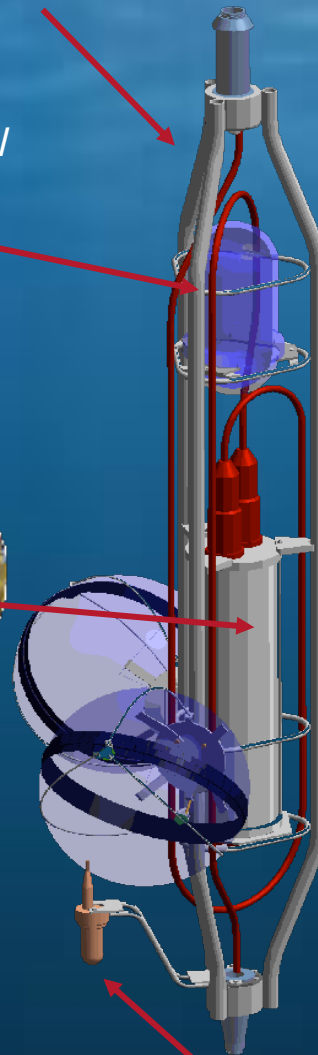


Optical Beacon
con LEDs azules
Calibración temporal



Módulo de Control Local (Ti):
*Electrónica, ASIC, DAQ/SC,
DWDM,
Reloj, brújulas, inclinómetros,
alta tensión,...*

Estructura soporte de titanio



Módulo Óptico:
10" Hamamatsu PMT in
17" esfera de vidrio
Detección de fotones



Hidrófono:
*Posicionamiento
acústico*

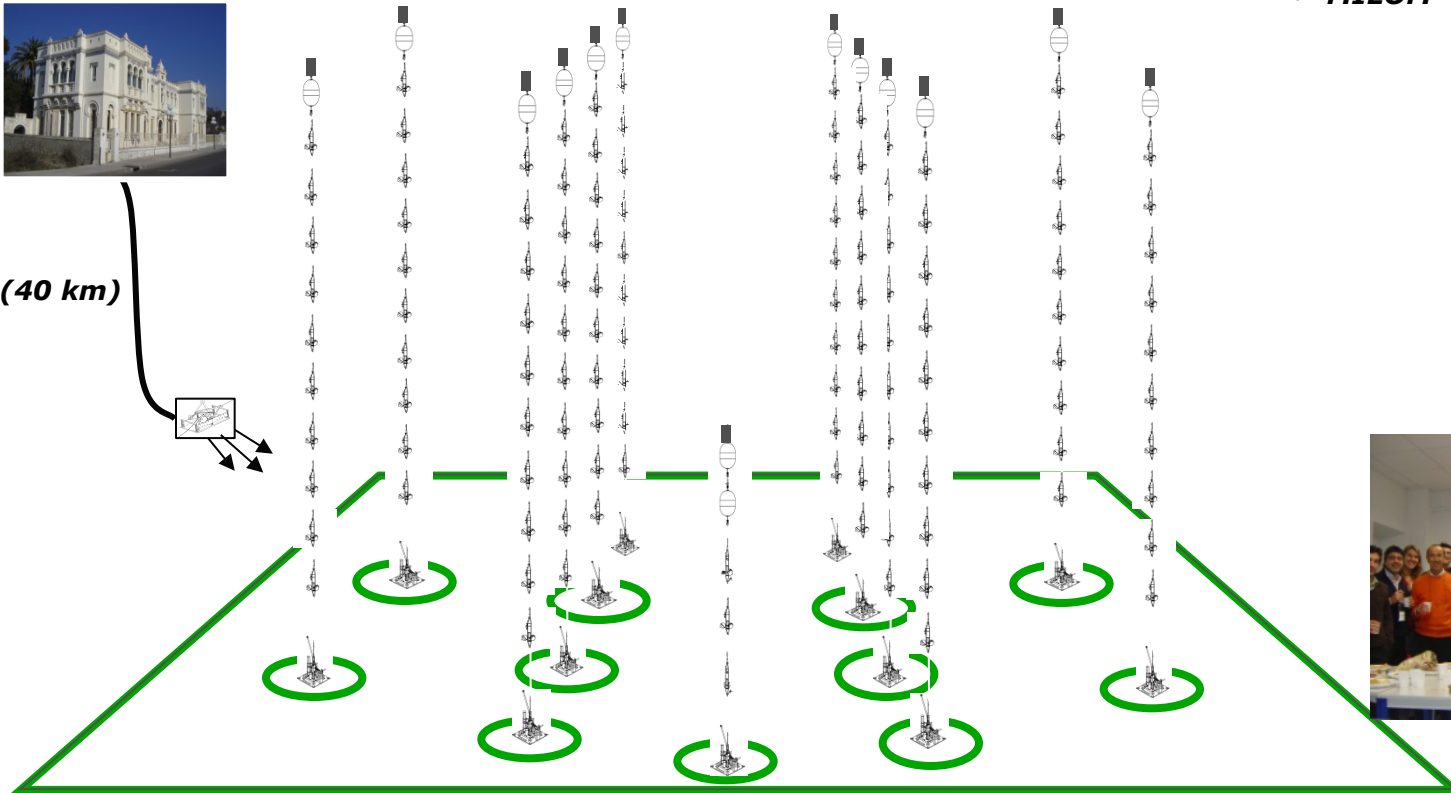
Despliegue e Instalación



La Seyne-sur-Mer



(40 km)



(2.5 km depth)

Data taking periods:

- **MILOM** : Mar '05 – Mar '06





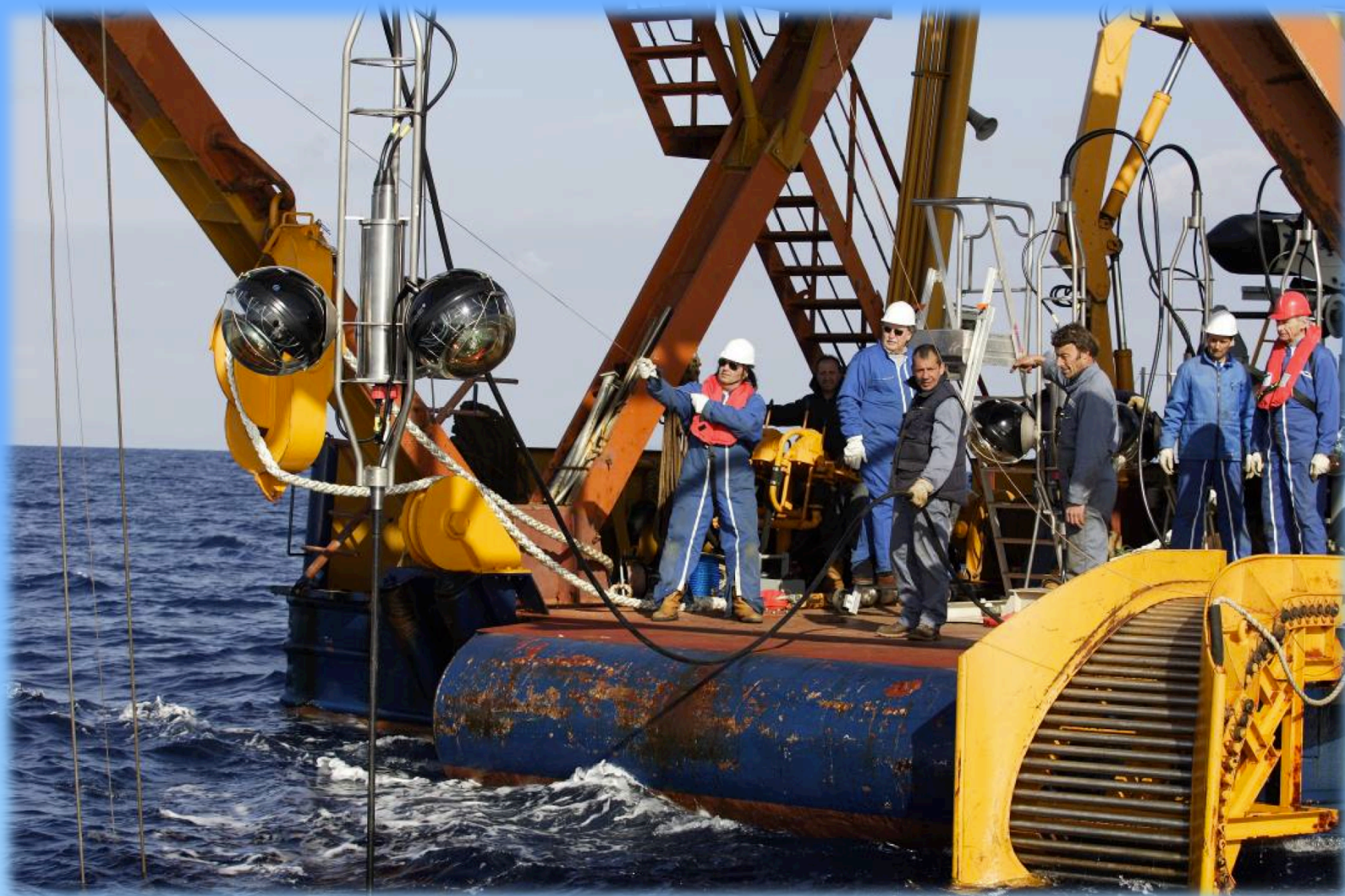


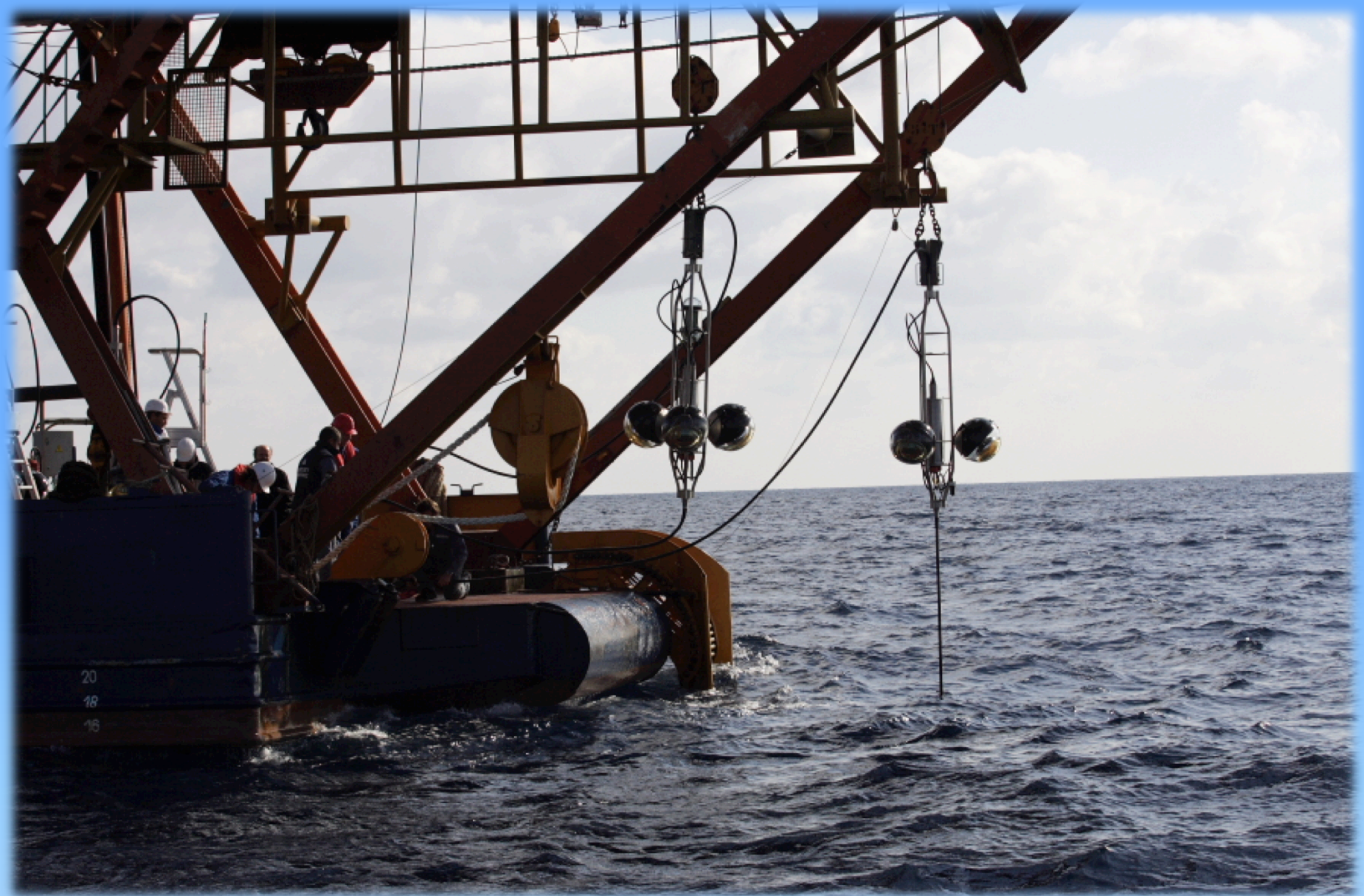








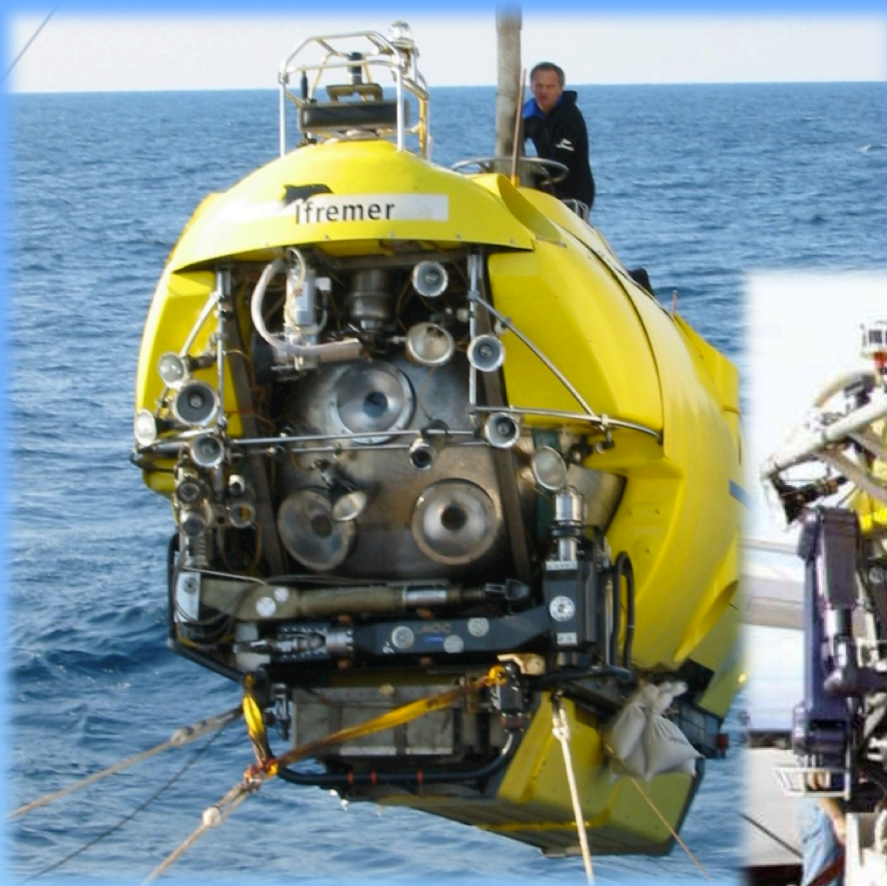








SUBMARINOS



Nautilo (tripulado)

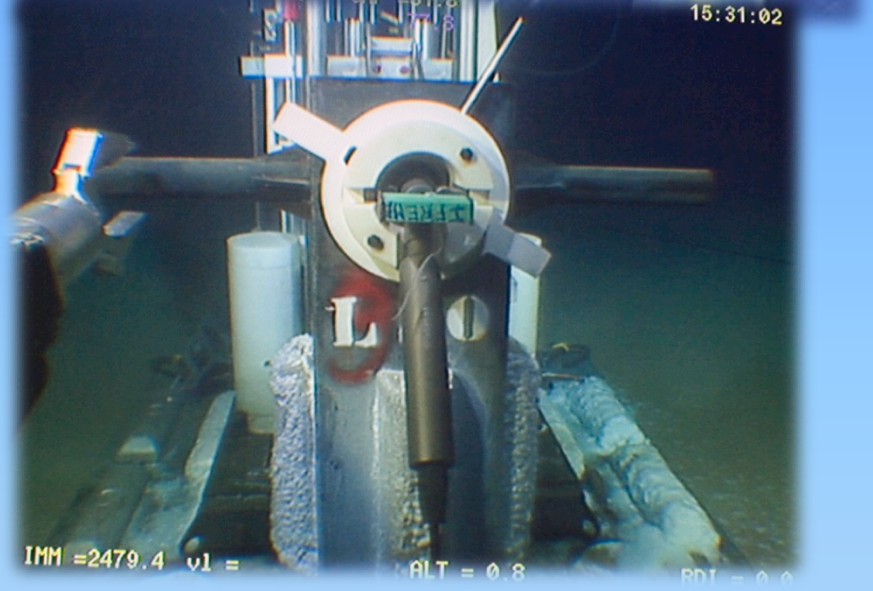
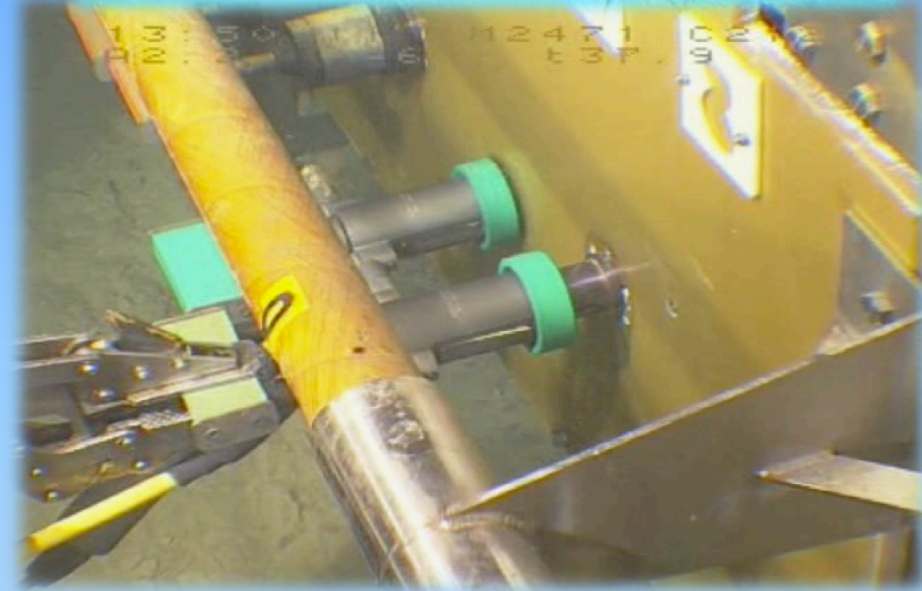
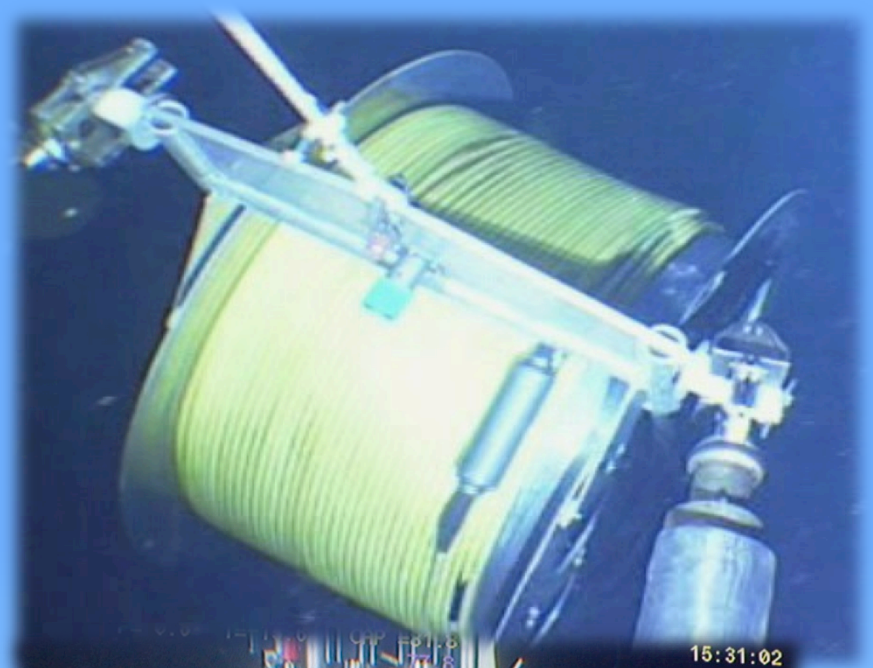
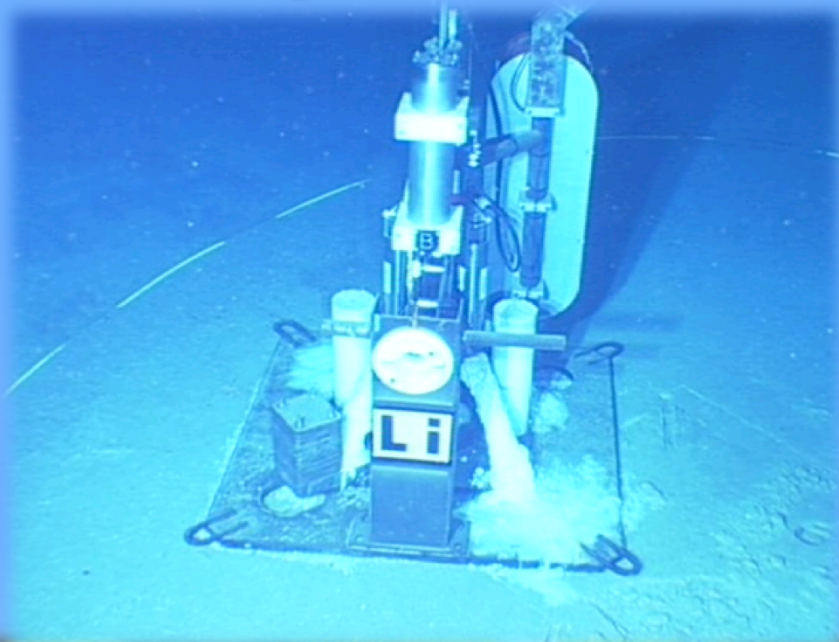
Victor (operado remotamente)



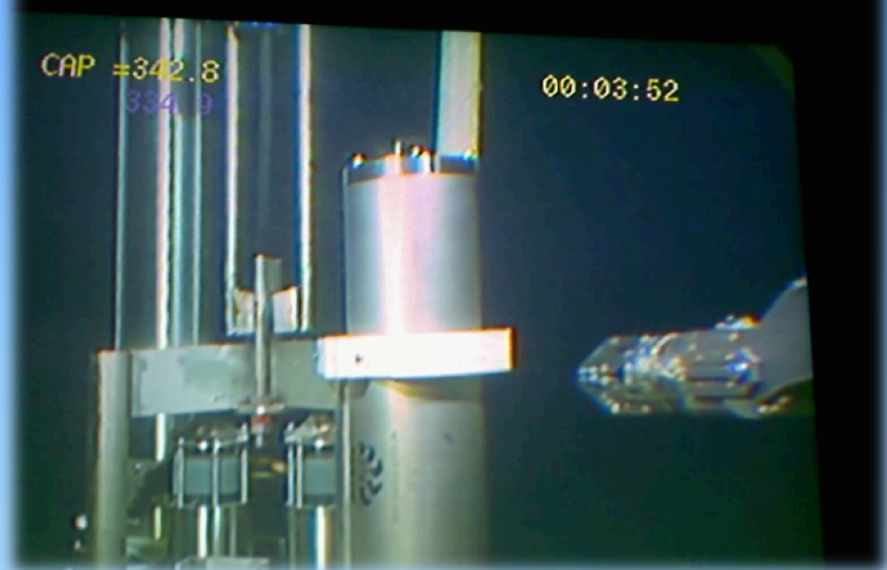
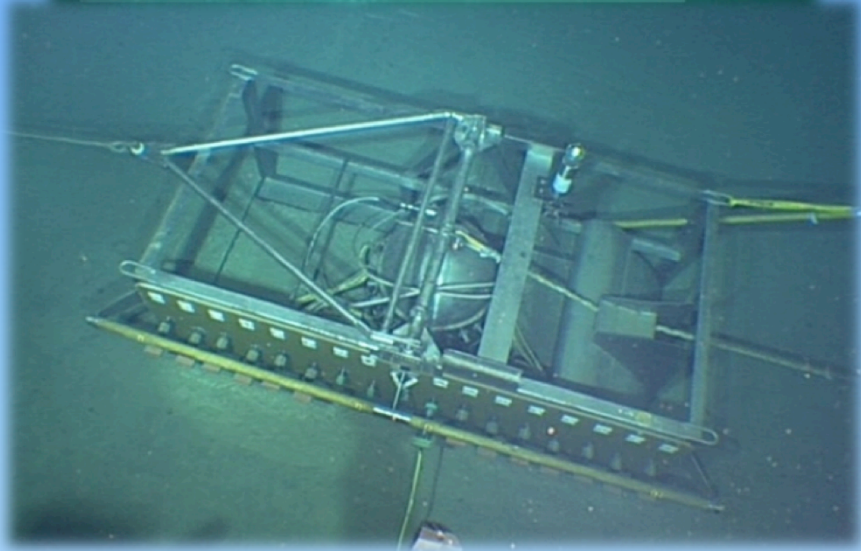
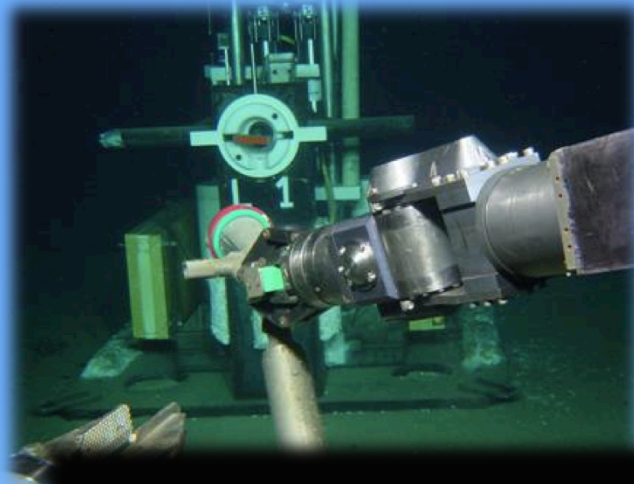
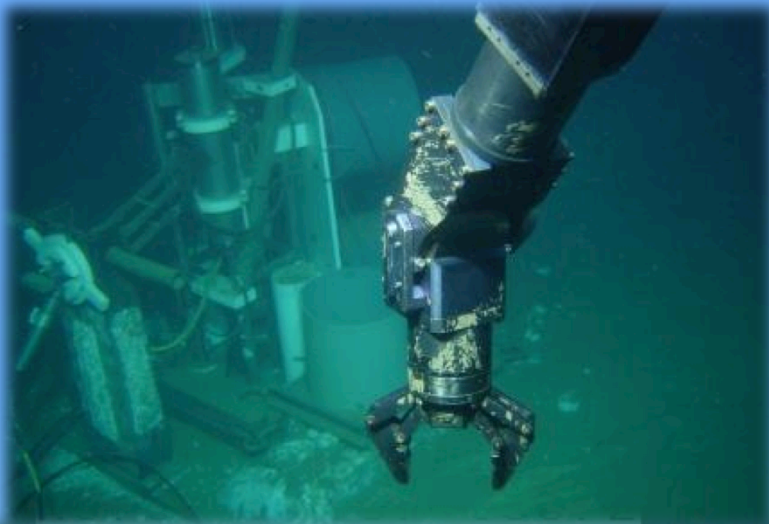
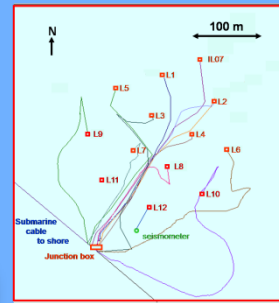




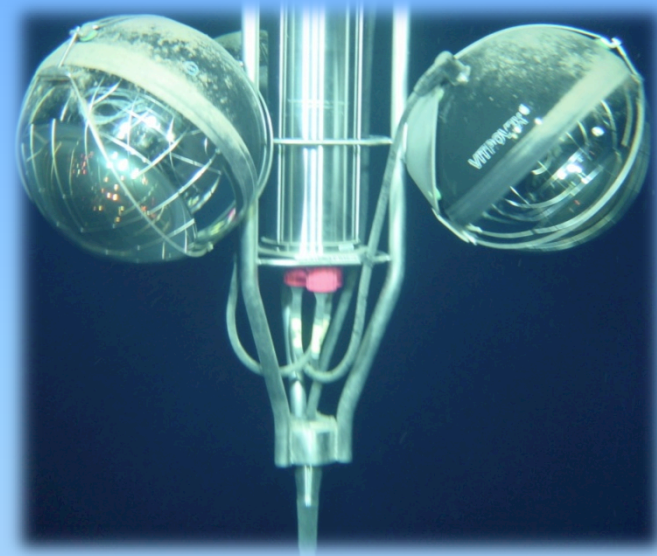
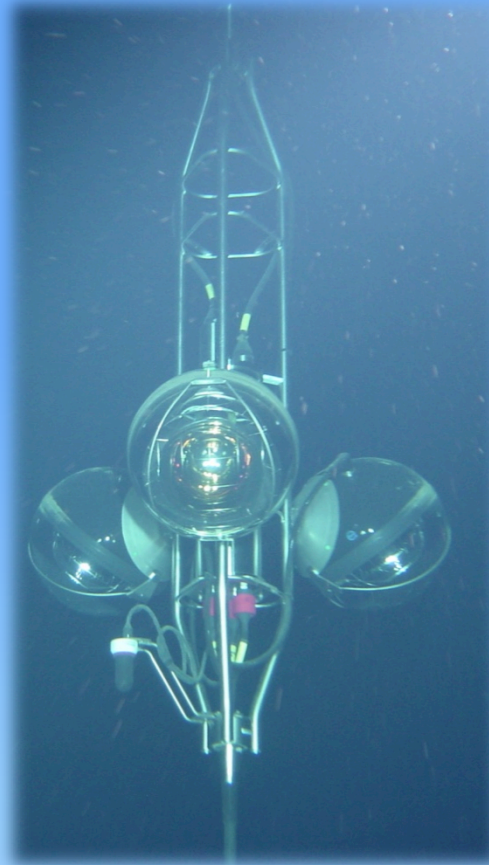
Operaciones marinas



IMÁGENES DESDE EL FONDO MARINO

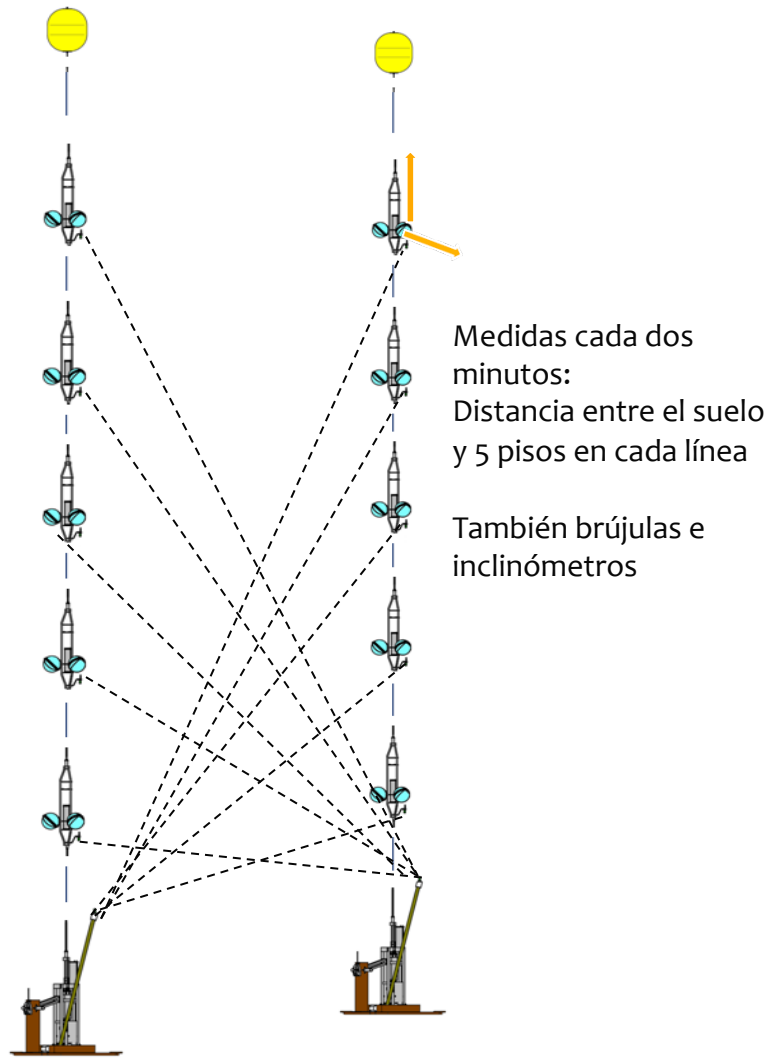


IMÁGENES DESDE EL FONDO MARINO



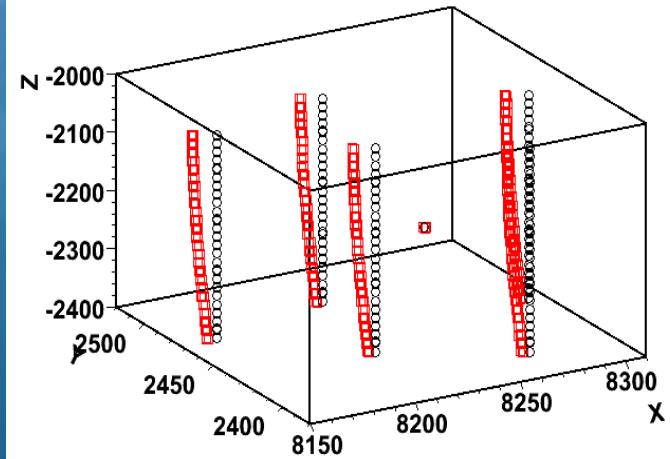


Posicionamiento acústico

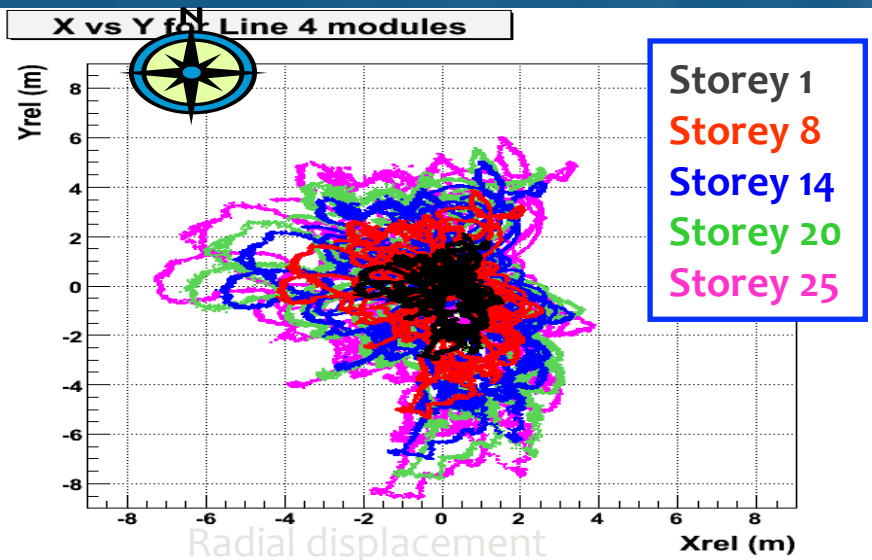


Precisión ~ varios cms

Geometry

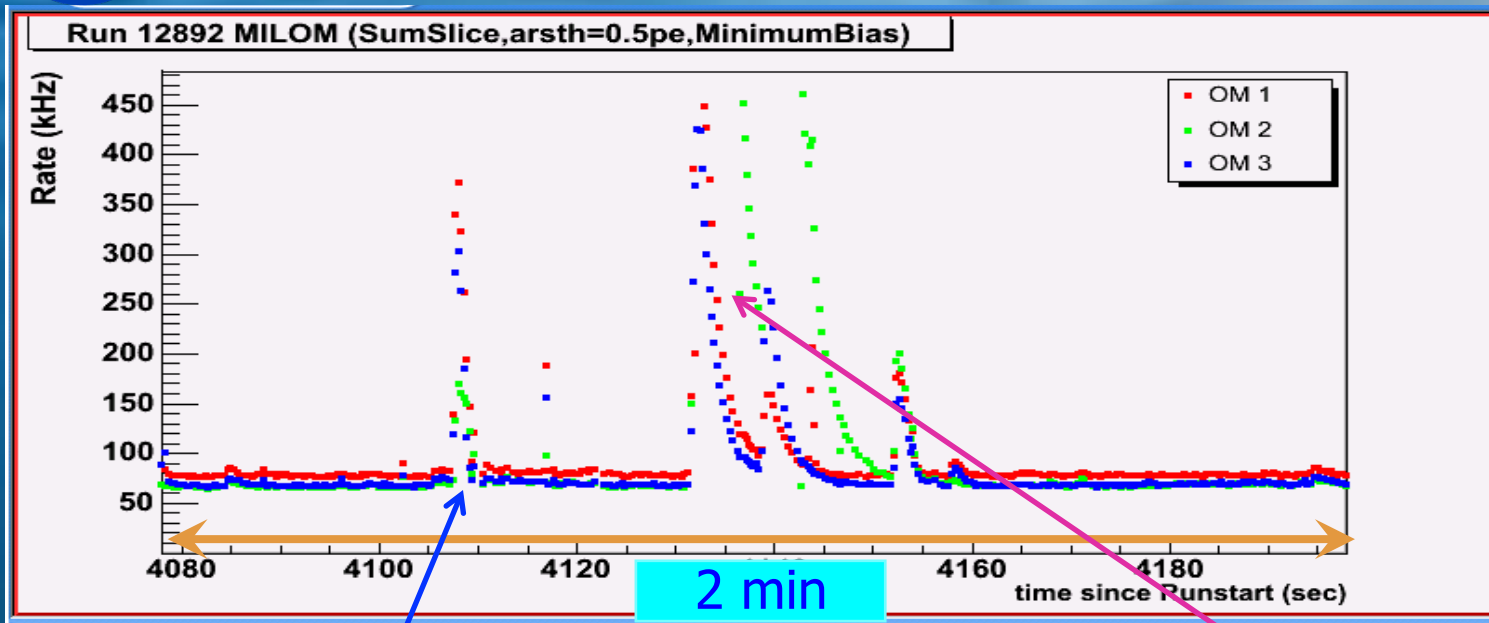


X vs Y for Line 4 modules





Contaminación óptica

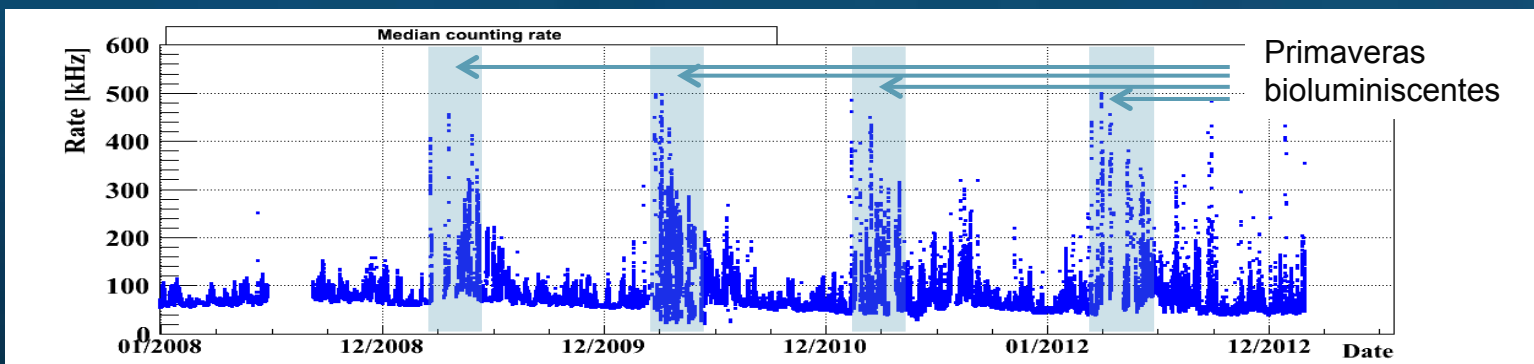
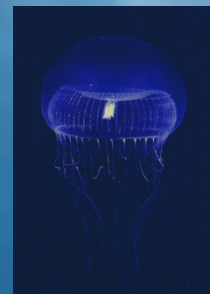


Fondo continuo (baseline):
Radiactividad en el mar (^{40}K)
+ bioluminescencia de bacterias



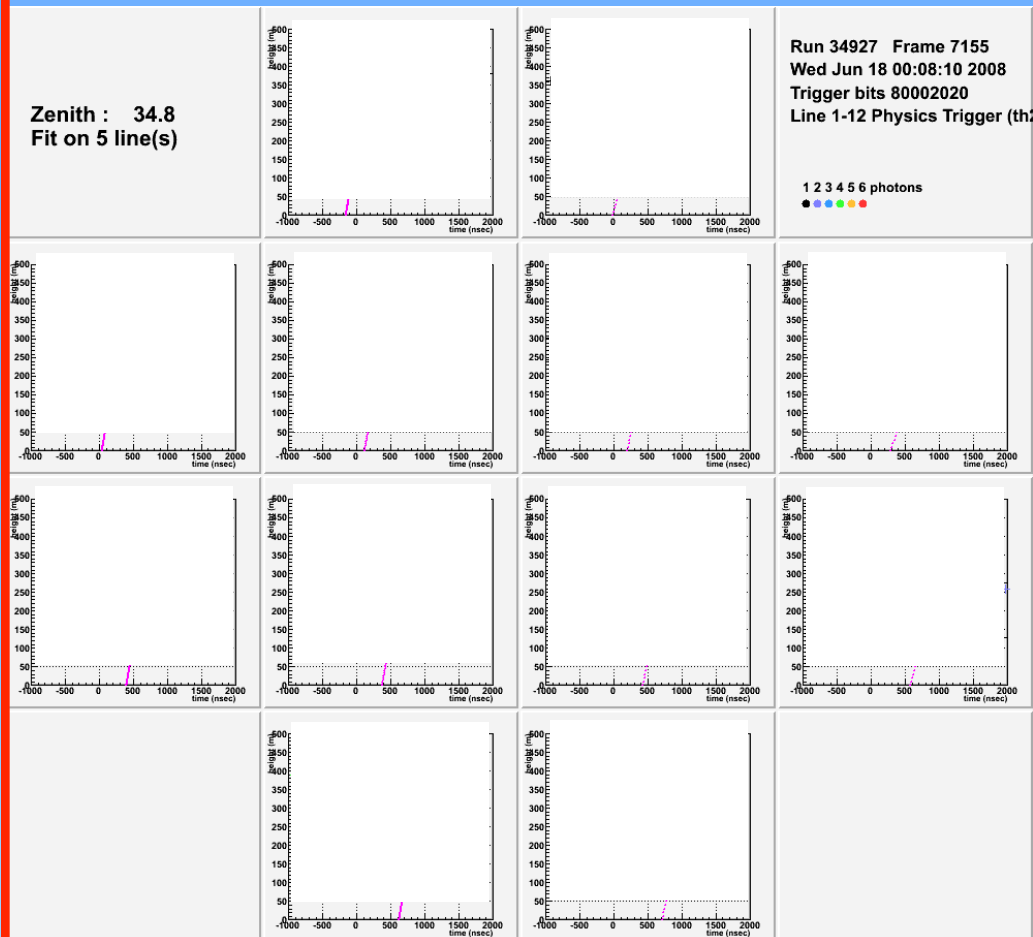
^{40}K

Ráfagas:
Bioluminescencia de organismos macroscópicos

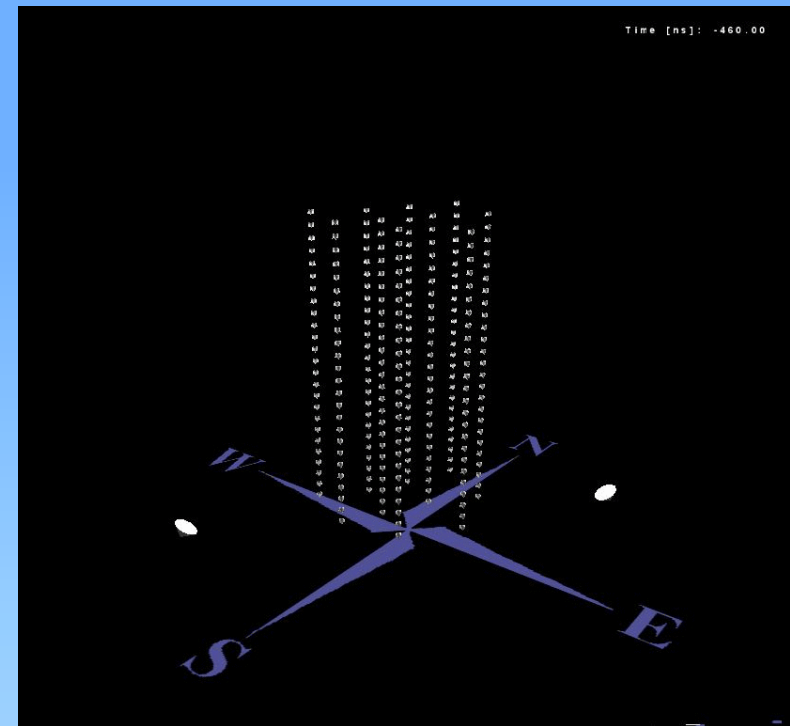


Ejemplo de neutrino detectado

Altura PMT Señal en cada una de las 12 líneas del detector



Ejemplo de un neutrino ascendente: El muon producido cruza el detector hacia arriba e ilumina (luz Cherenkov) varias líneas.



Tiempo del hit

Ejemplo de muon atmosférico

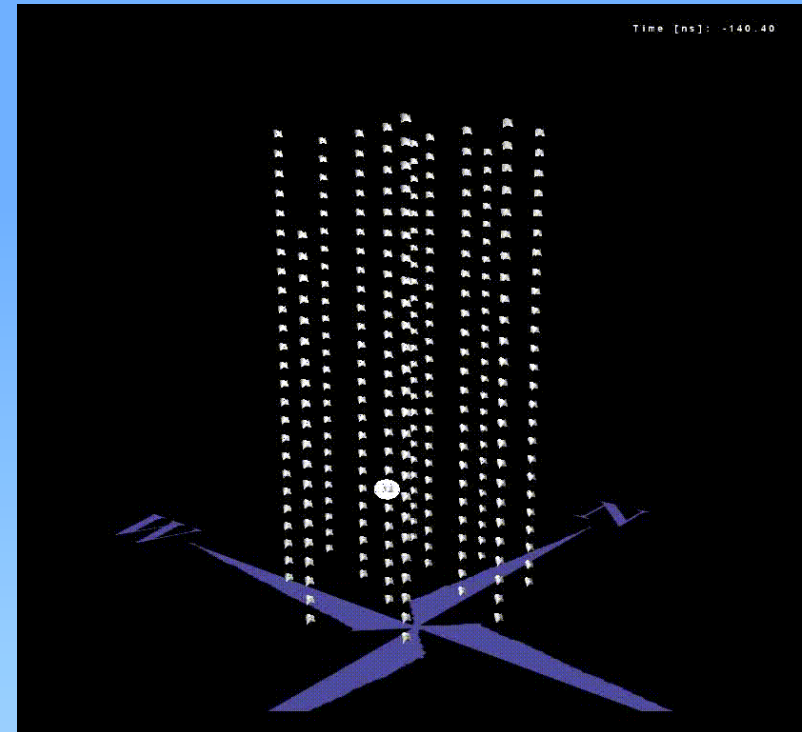
Señal en cada una de las 12
líneas del detector

Altura
PMT

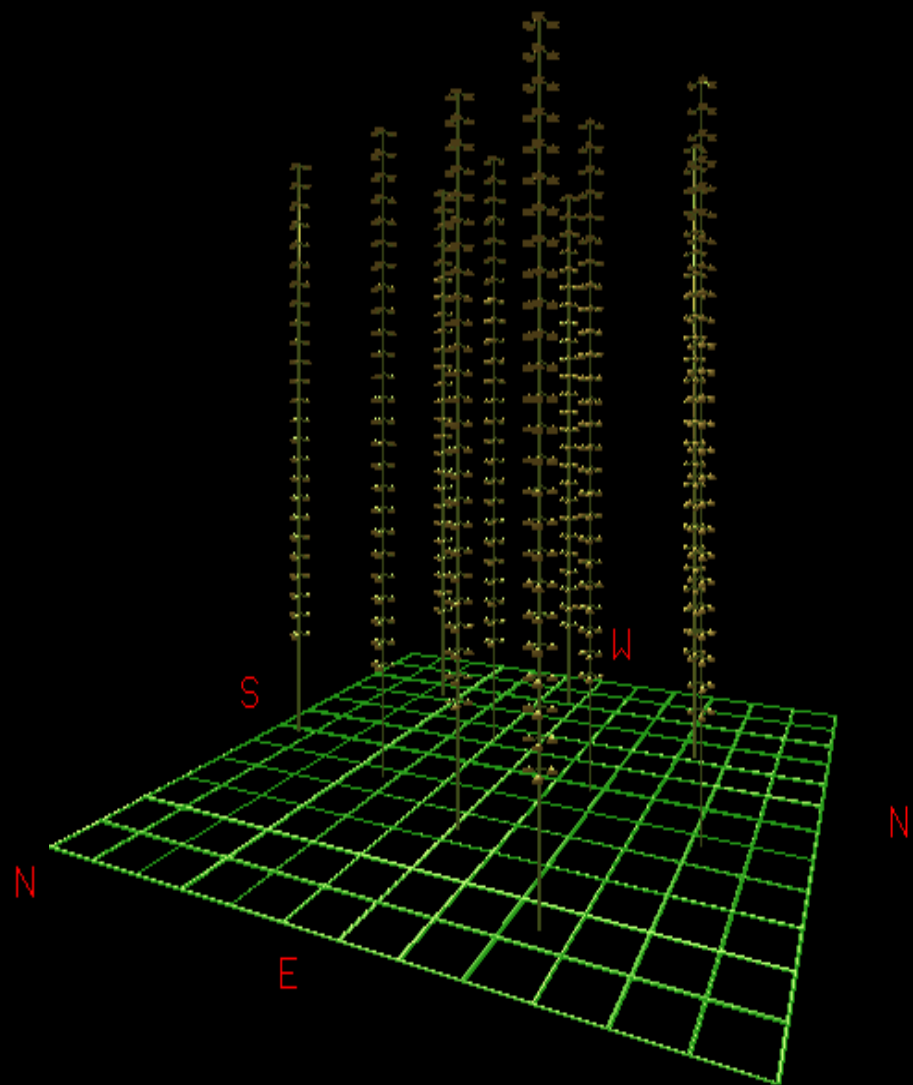
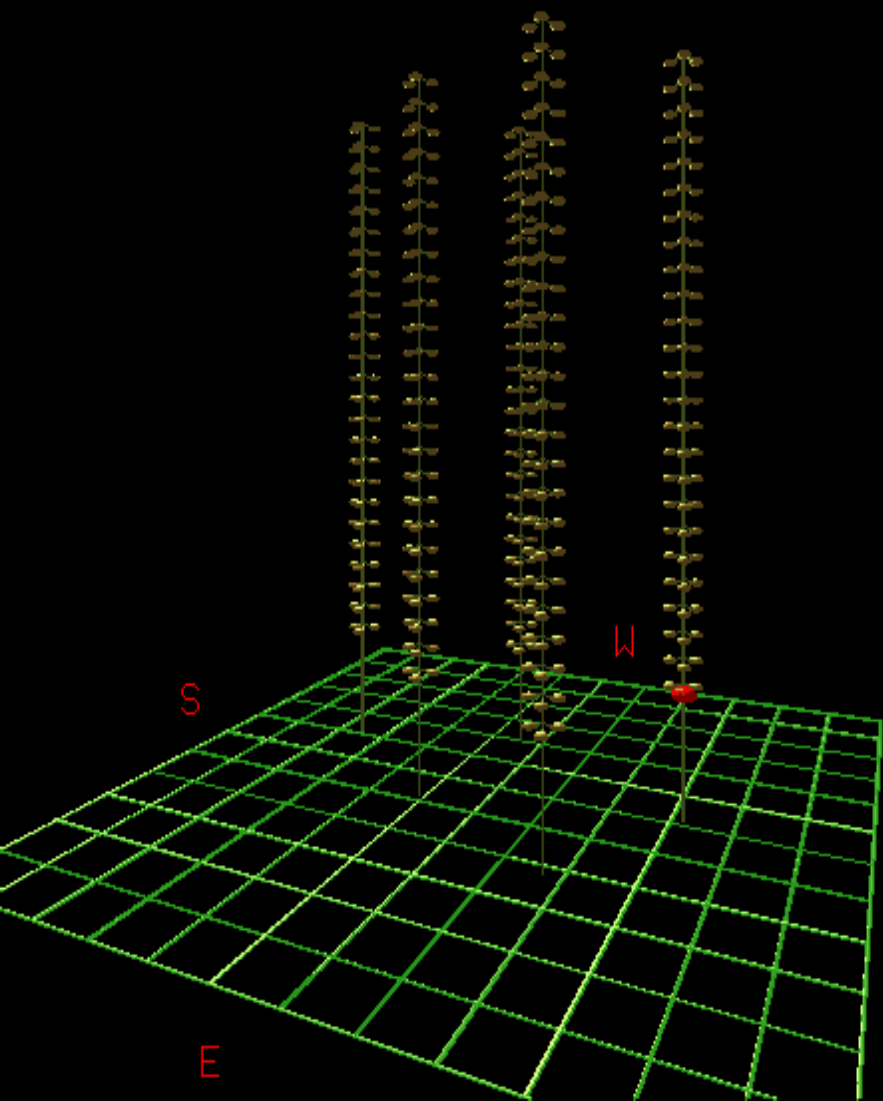
Zenith : 144.3
Fit on 11 line(s)



*Ejemplo de muon descendente:
El muon cruza el detector hacia
abajo e ilumina (luz Cherenkov)
todas las líneas.*

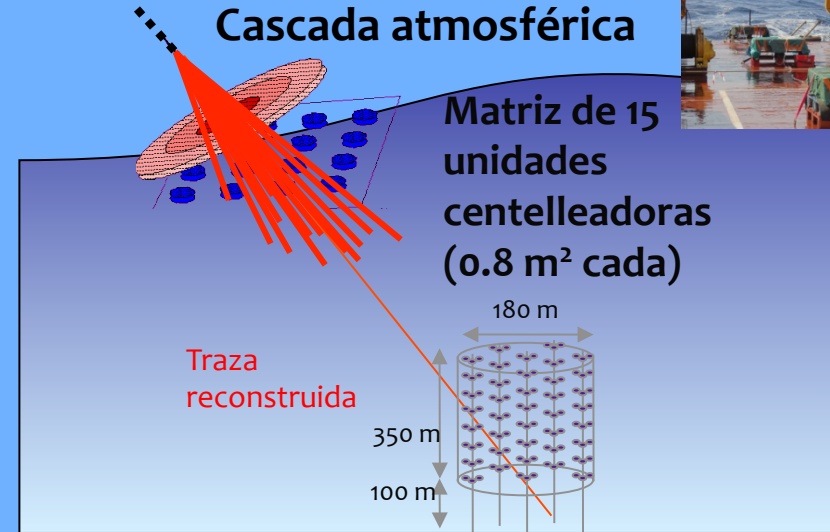
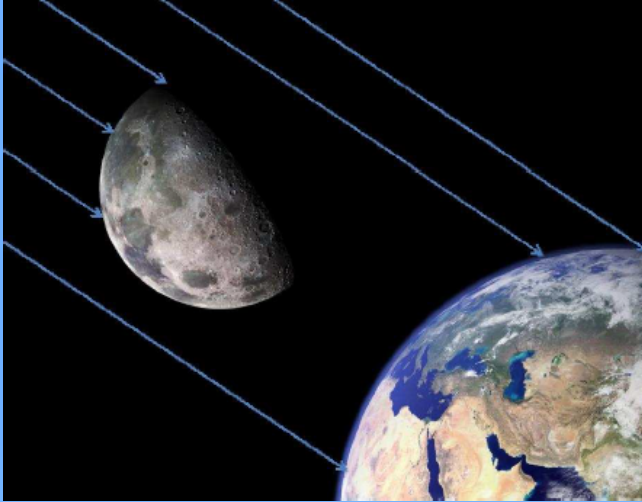


Tiempo del hit

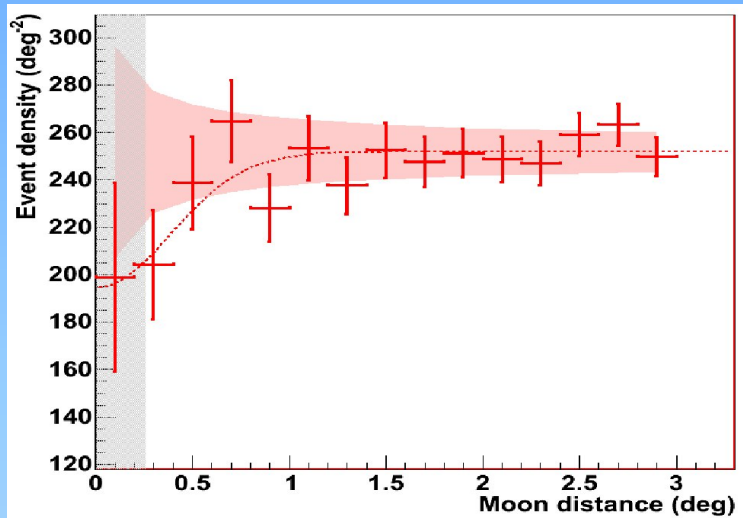


MEDIDA DE LA POSICIÓN

(La sombra de la luna)

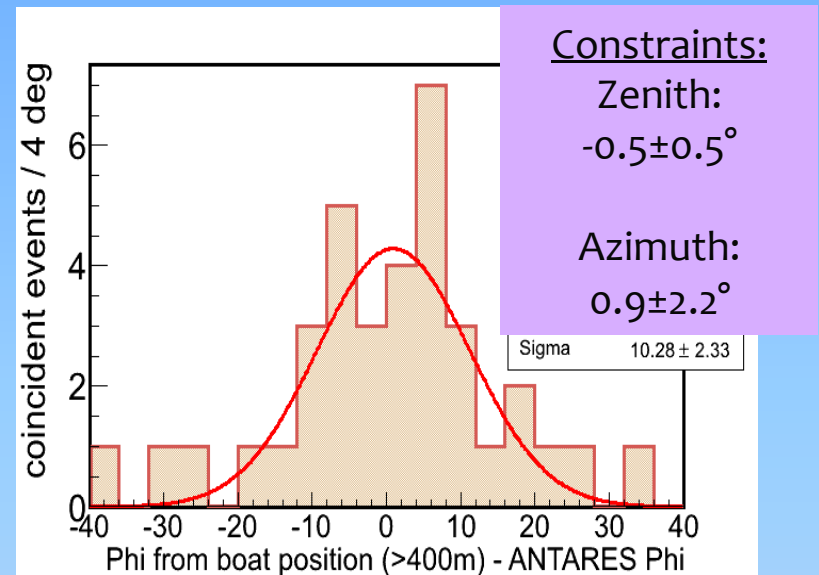


Results from 1st campaign: 17-23 Oct 11



2.7 sigma significance (expected 2.1 ± 0.8)

Around 4 σ expected at end of data taking



2nd campaign (2012) being analyzed

BÚSQUEDA DE NEUTRINOS CÓSMICOS

ANTARES puede “observar” gran parte del cielo

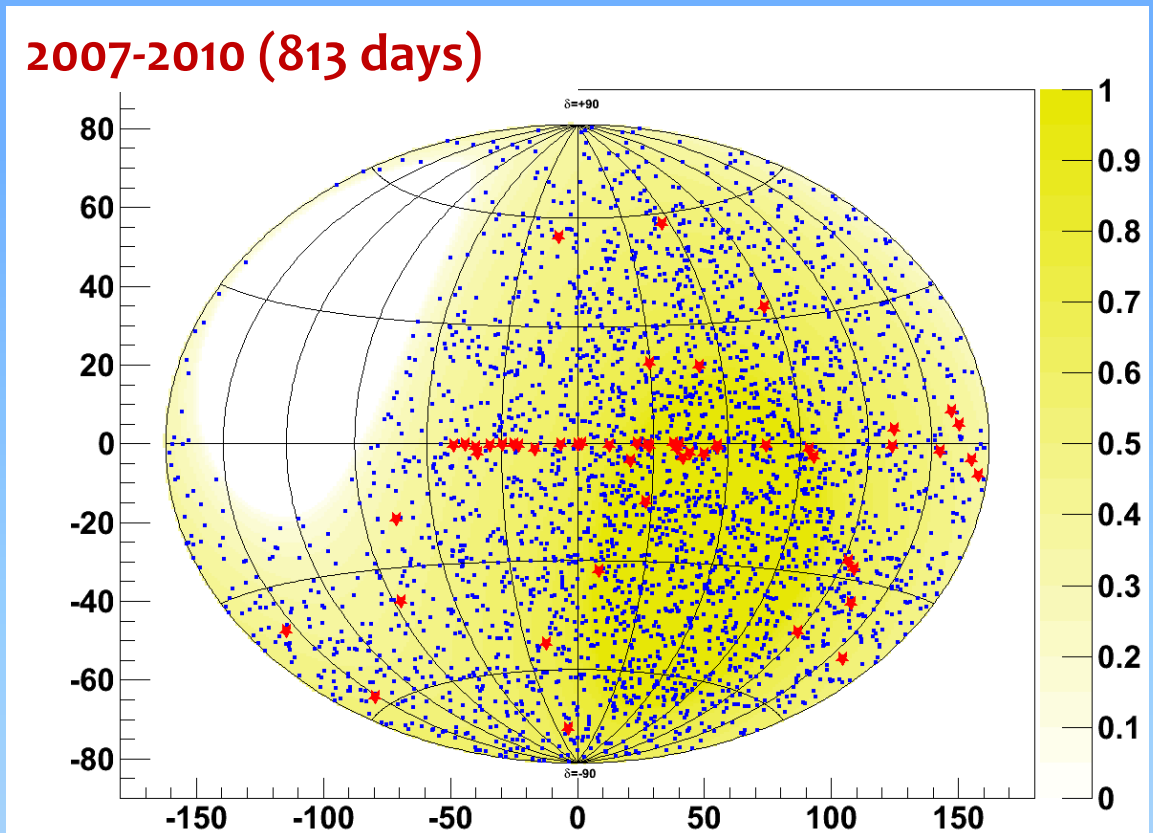
Los neutrinos que vemos
¿son cósmicos o atmosféricos?

- Sucesos seleccionados (3058)
- ★ Posibles candidatos

Para ello, buscamos un
exceso de neutrinos:

¿Dónde?

- Globalmente
- En dirección de
fuentes interesantes

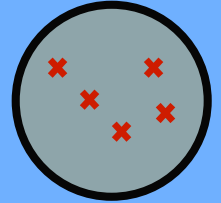


BÚSQUEDA DE NEUTRINOS CÓSMICOS

¿Cómo saber si se trata de neutrinos cósmicos?

Con los datos obtenidos calculamos un “estadístico” Q

¿Cuál es la probabilidad de obtener ese valor?



Hipótesis: todos los neutrinos son atmosféricos

si el resultado es:



Probablemente todos
los sucesos son
neutrinos atmosféricos

Estadístico Q

BÚSQUEDA DE NEUTRINOS CÓSMICOS

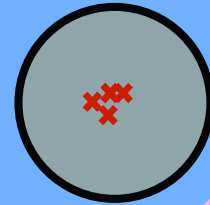
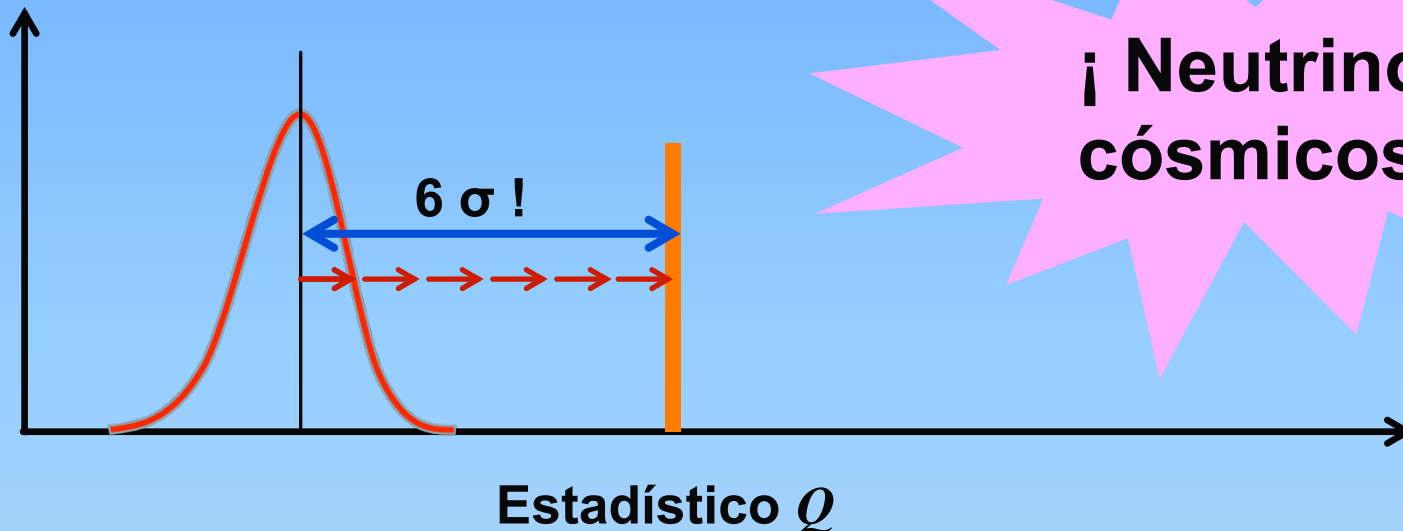
¿Cómo saber si se trata de neutrinos cósmicos?

Con los datos obtenidos calculamos un “estadístico” Q

¿Cuál es la probabilidad de obtener ese valor?

Pero si hay neutrinos cósmicos

y el resultado es:



**¡ Neutrinos
cósmicos !**

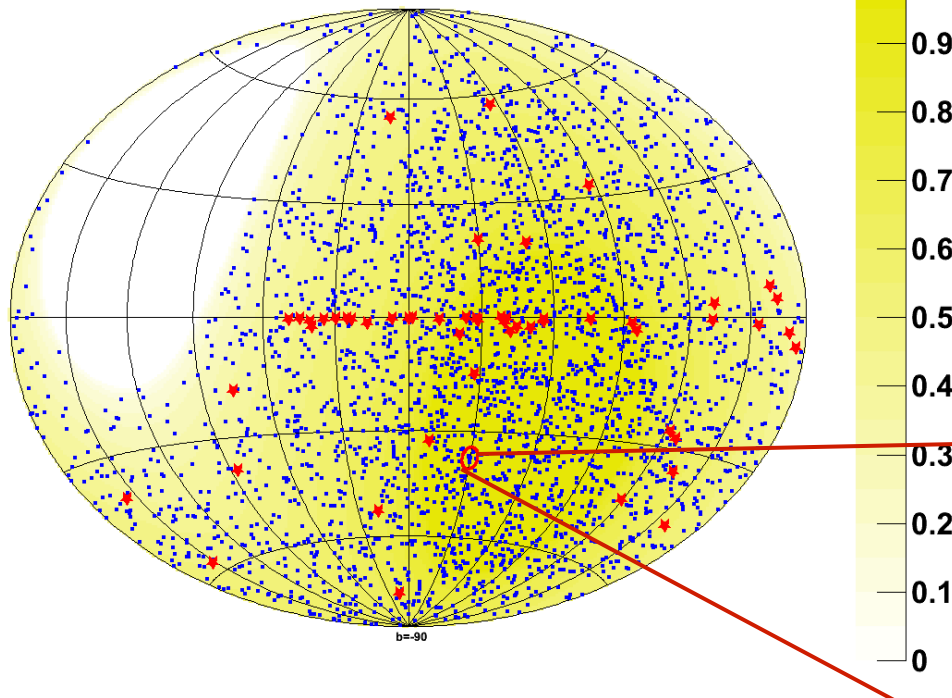
BÚSQUEDA DE NEUTRINOS CÓSMICOS

Mapa del cielo en coordenadas galácticas

El color de fondo indica la **visibilidad**

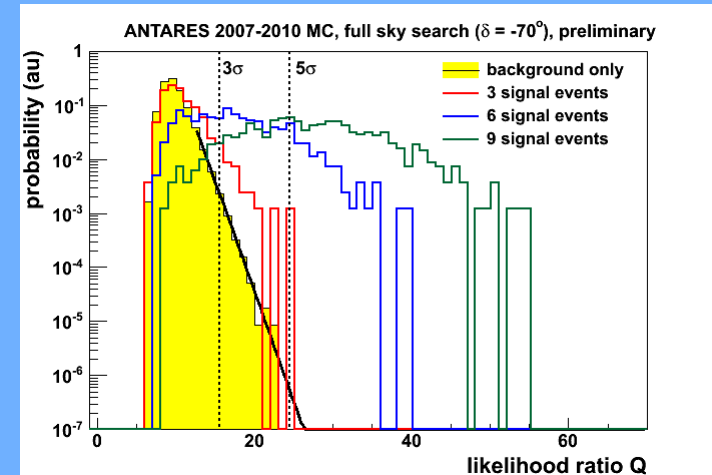
- Sucesos seleccionados (3058)
- ★ Posibles candidatos

2007-2010 (813 days)



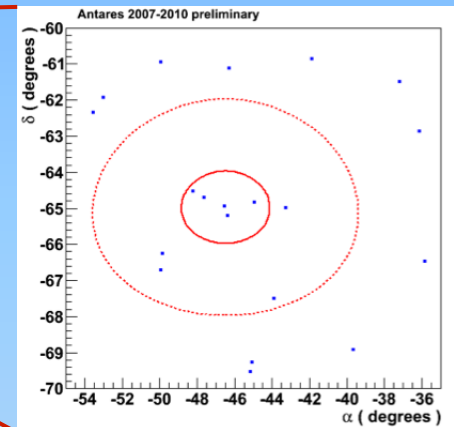
Cluster más significativo en:
 $RA = -46.5^\circ$,
 $\delta = -65.0^\circ$

$N_{\text{sig}} = 5$ $Q = 13.02$
 Significance = 2.2σ



$$L_{s+b} = \sum_i \ln [\mu_s \mathcal{F}(\alpha_s, \delta_s) + \mathcal{B}(\delta_i)]$$

$$Q = L_{s+b}^{\text{max}} - L_b$$

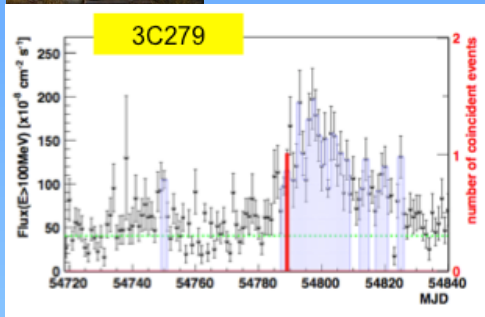


BÚSQUEDAS EN COINCIDENCIA

(Programa Multi-messenger)

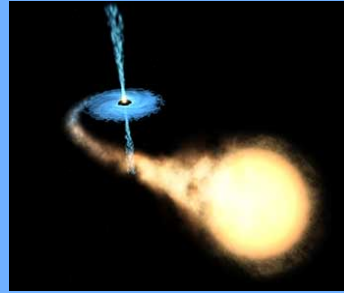
GeV-TeV γ -rays

GRBs, microquasars, flaring AGNs
Fermi / HESS...



UHECR (Auger)

Rayos cósmicos
de muy alta
energía



Gravitational Waves
Virgo / Ligo

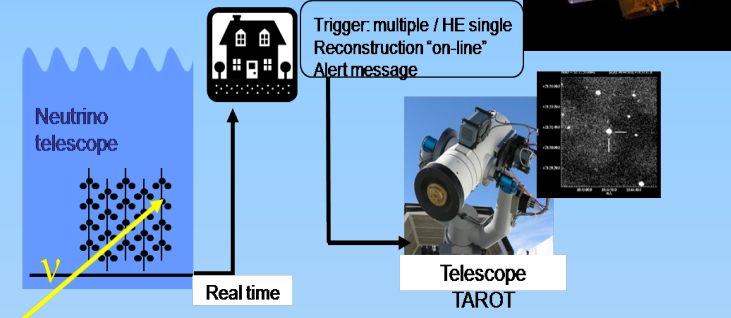


Se buscan ondas
gravitacionales en
coincidencia con neutrinos
de alta energía

HE neutrinos

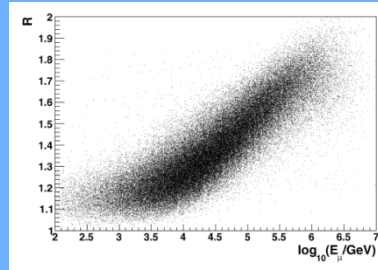
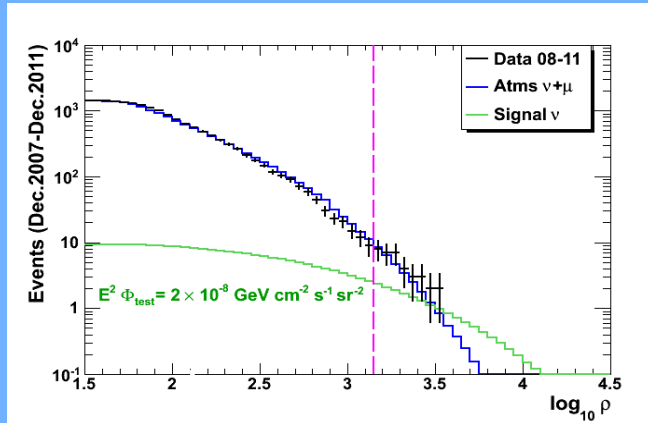
Optic / X-ray
TAROT, ROTSE / Swift, ZADKO

HEN detectados en
ANTARES disparan
las alertas en los
telescopios ópticos
en menos de 15 s

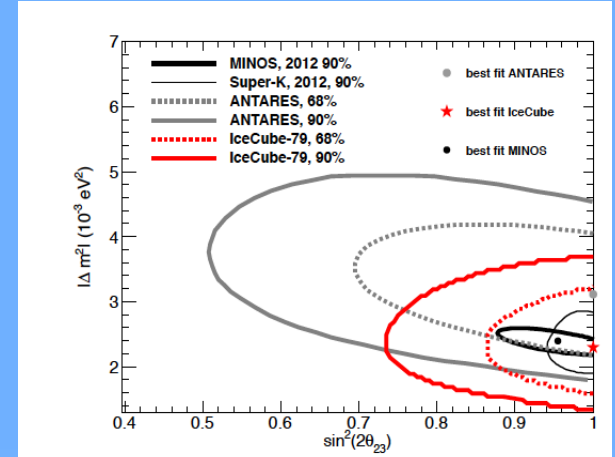


OTROS ANÁLISIS Y ESTUDIOS

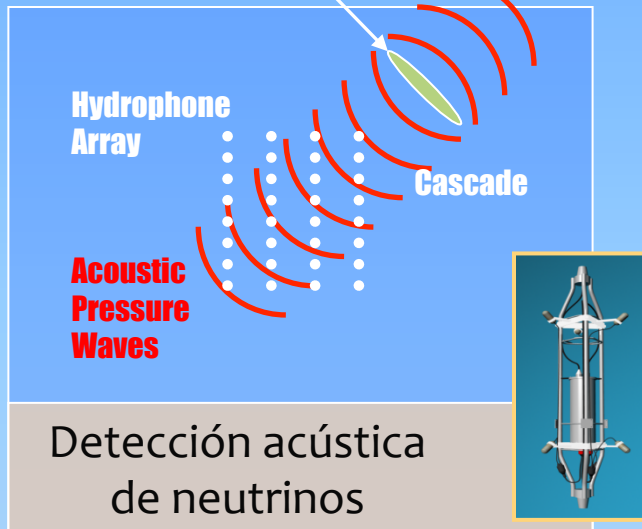
Medida de energías (espectro de neutrinos difusos)



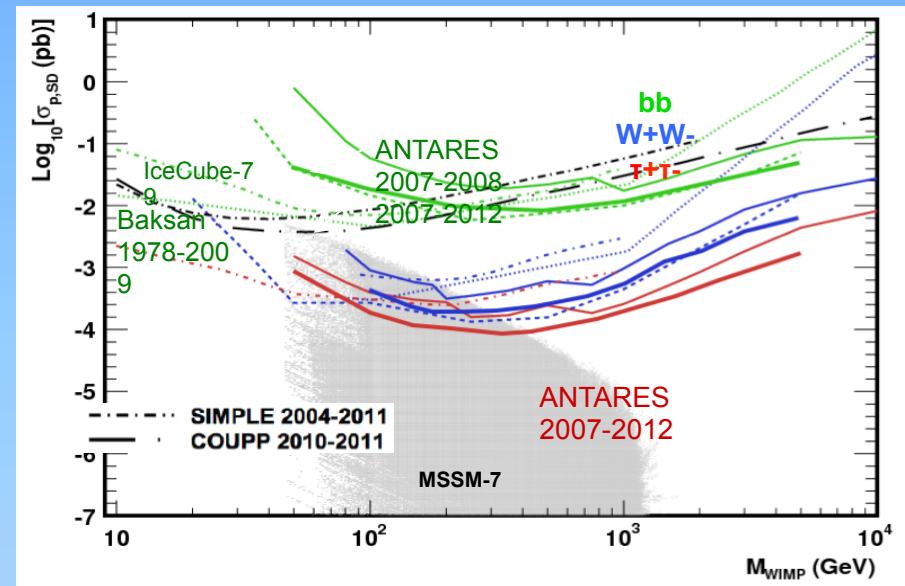
Oscilaciones de neutrinos



neutrino

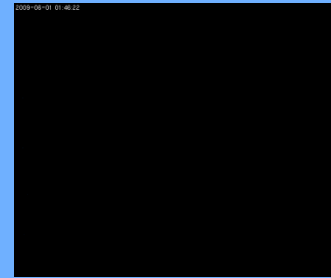


Búsqueda indirecta de materia oscura



GEOLOGÍA Y CIENCIAS MARINAS

¿La webcam más profunda del mundo?



Biología marina y ciencias del mar

Hang on, that's not a neutrino

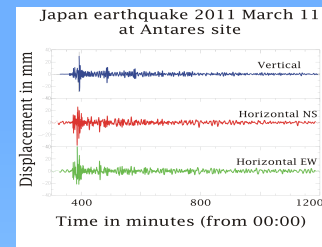
Dec 1st 2010, 16:10 by J.P.

The Economist

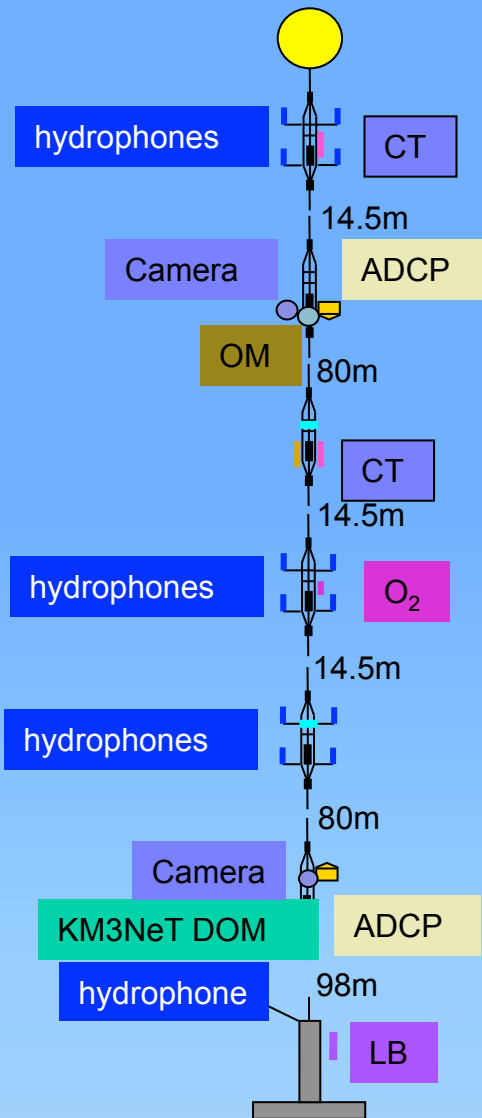


PHYSICISTS are often accused by the public and other scientists of spending inordinate sums on fancy kit that does little apart from merely satisfying human curiosity. Besides stressing that there is nothing mere about knowledge, the boffins will typically respond by trotting out a long list of blue-sky projects that yielded serendipitous results, from microwave ovens to the internet. They can also offer plenty of examples of how their own research has aided colleagues in other fields, from climate science to, somewhat more improbably, marine biology.

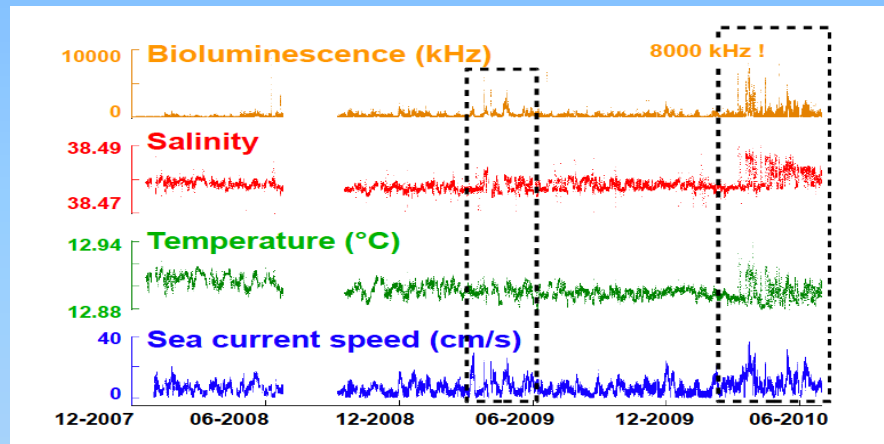
Sismografía



ANTARES = Observatorio Multi-disciplinar

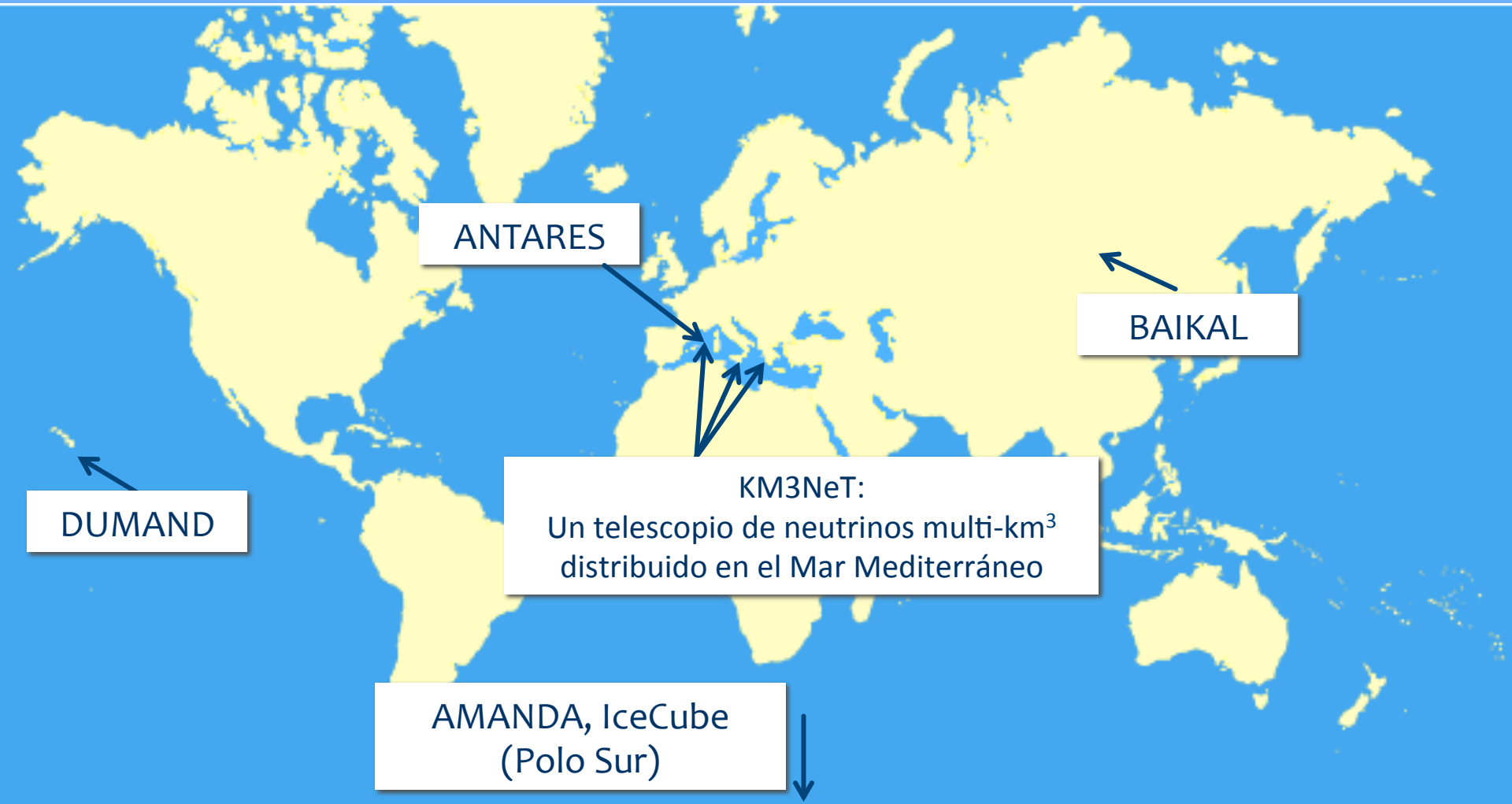


Línea de instrumentación

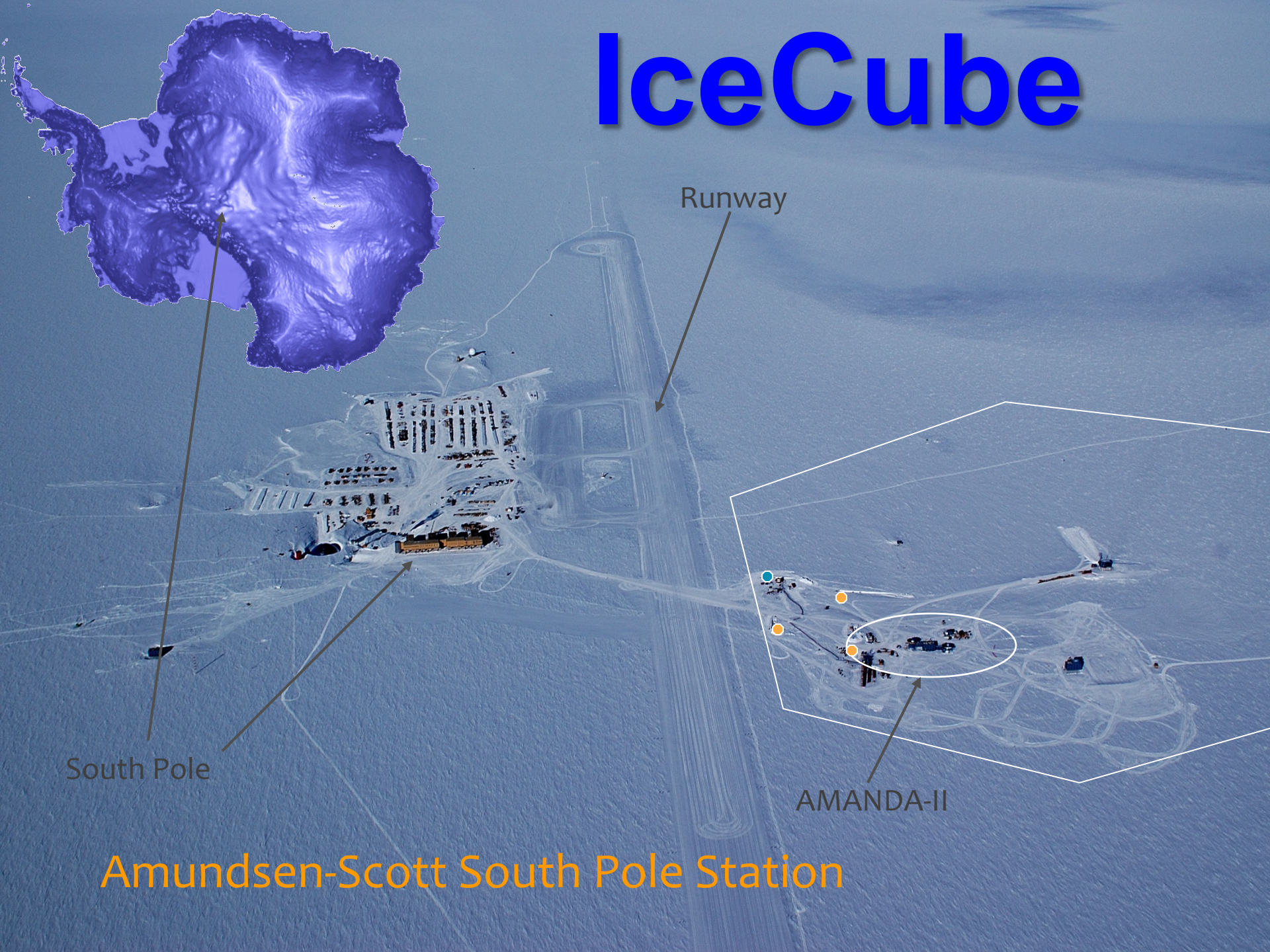


OTROS TELESCOPIOS DE NEUTRINOS

MAPA MUNDIAL DE TELESCOPIOS DE NEUTRINOS



IceCube



Runway

South Pole

AMANDA-II

Amundsen-Scott South Pole Station

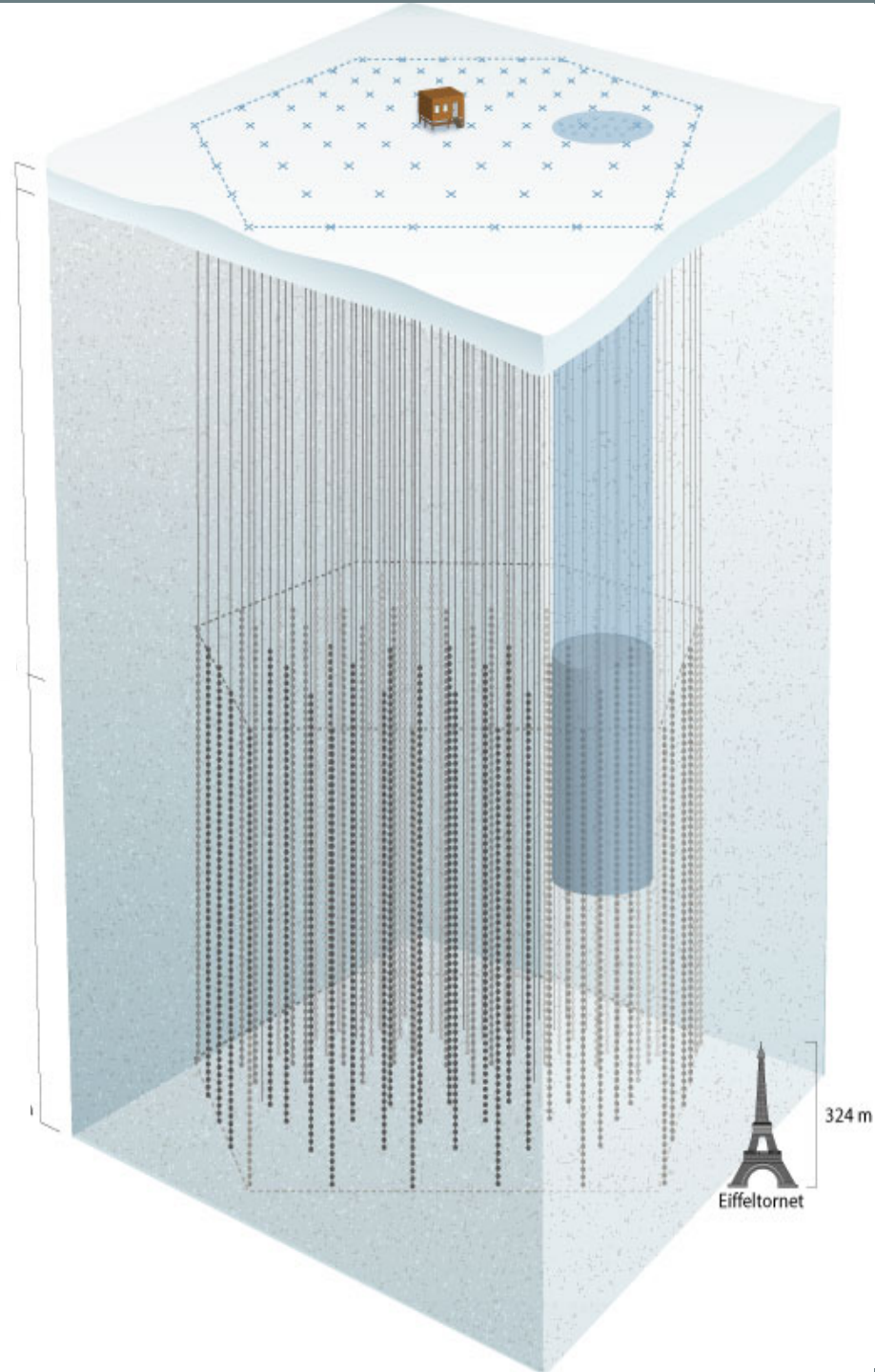


IceCube

- Volumen instrumentado: $\sim 1 \text{ km}^3$
- ~ 5160 fotomultiplicadores en 86 líneas
- Longitud de cada línea: $\sim 1000 \text{ m}$
- Instalado a 1450-2500 m bajo la superficie de la Antártida
- Completado en diciembre de 2010

IC86:

$\sim 5 \times 10^{10}$ muons/year
 $\sim 20,000$ neutrinos/
year



INSTALACIÓN DE UNA LÍNEA

La instalación de la líneas de IceCube se hace mediante una manguera de agua caliente que funde el hielo y hace un agujero de 2.5 kilómetros



Tiempo de instalación: 16 horas

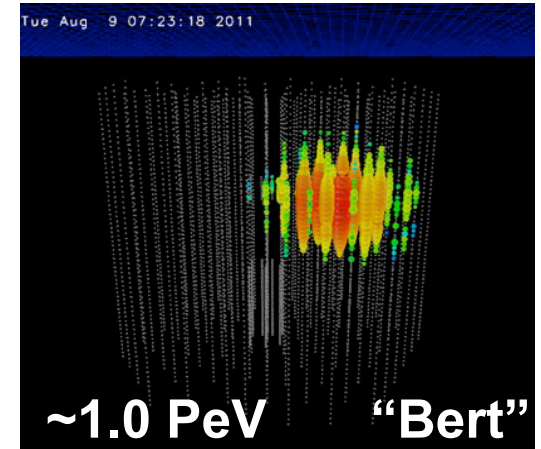
Primeros neutrinos cósmicos

Buscando sucesos extremadamente energéticos (EHE),
IceCube detecta dos sucesos de muy alta energía



- Suceso 1:

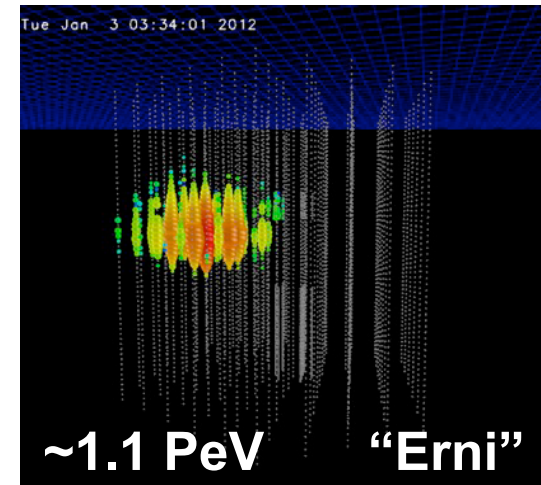
- 8 agosto, 2011
- Energía: 7.0×10^4 pe.
(1.04 ± 0.16 PeV)



<http://www.youtube.com/watch?v=8AAEkOKLpaY>

- Suceso 2:

- 3 enero, 2012
- Energía: 9.6×10^4 pe.
(1.14 ± 0.17 PeV)



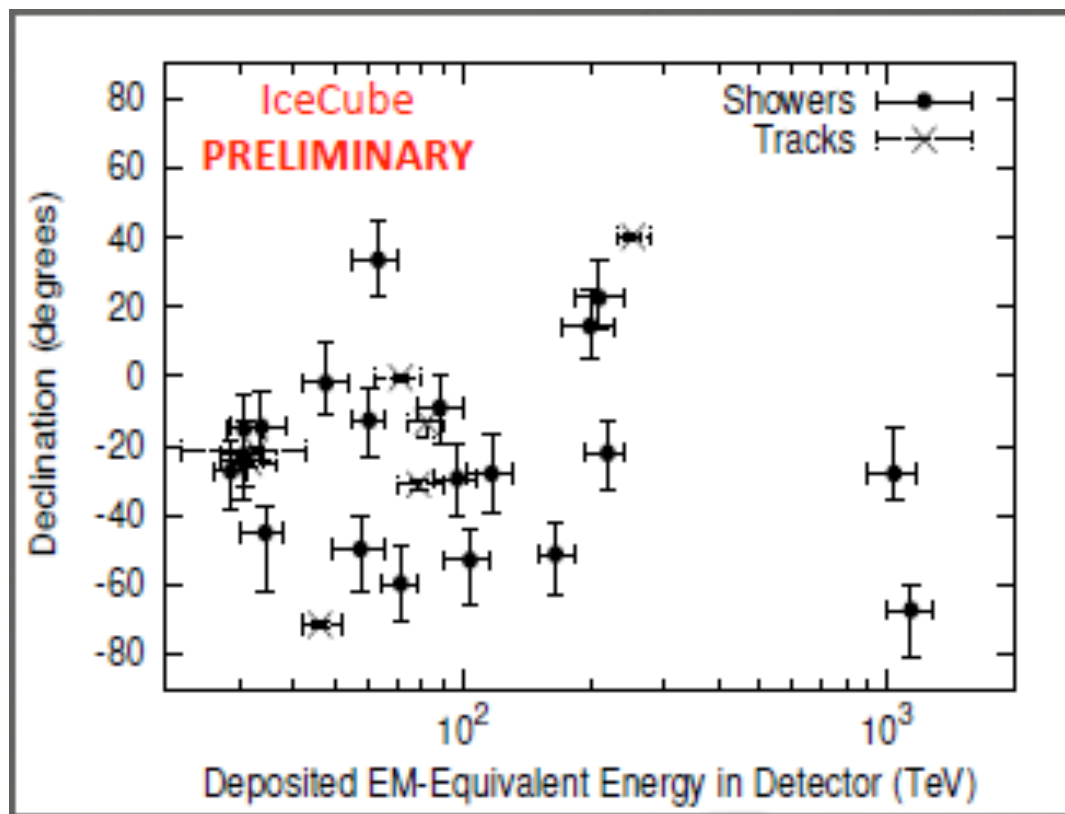
<http://www.youtube.com/watch?v=10Uv-gIXJrc>

Fondo atmosférico esperado 0.082 → Significancia de 2.8σ

Primeros neutrinos cósmicos

Se realiza una búsqueda más exhaustiva a energías más pequeñas durante el mismo periodo (IC79/IC86)

¡28 sucesos observados!
(26 más además de los dos sucesos de 1 PeV)

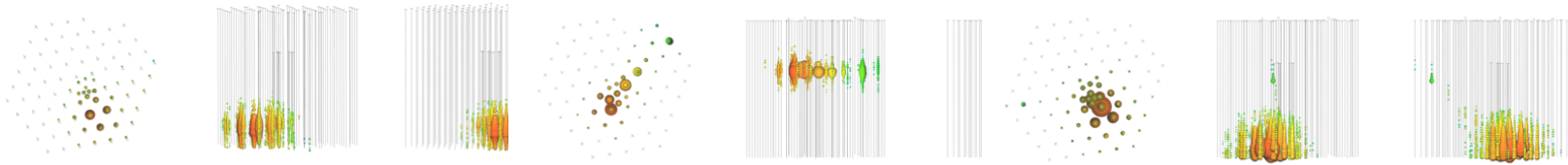


Fondo esperado: 12.1 ± 3.4 Significancia: 4.1σ !

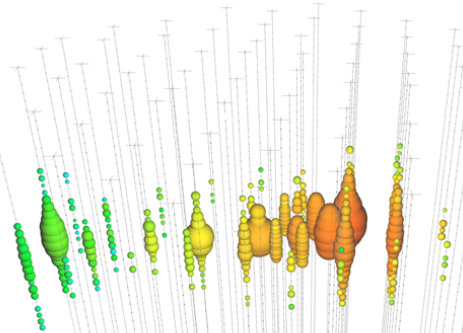
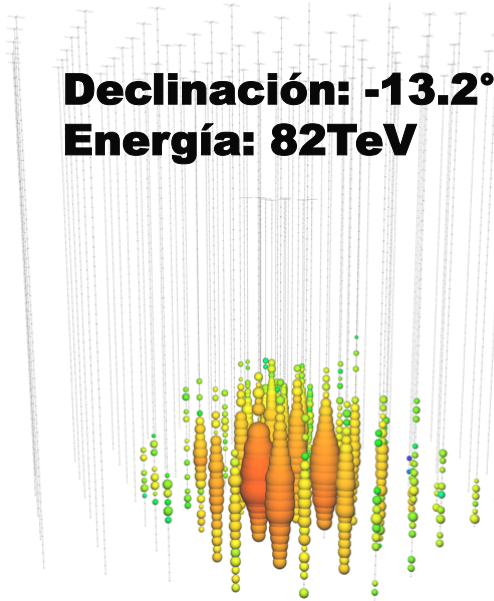


Primeros neutrinos cósmicos

Algunos ejemplos

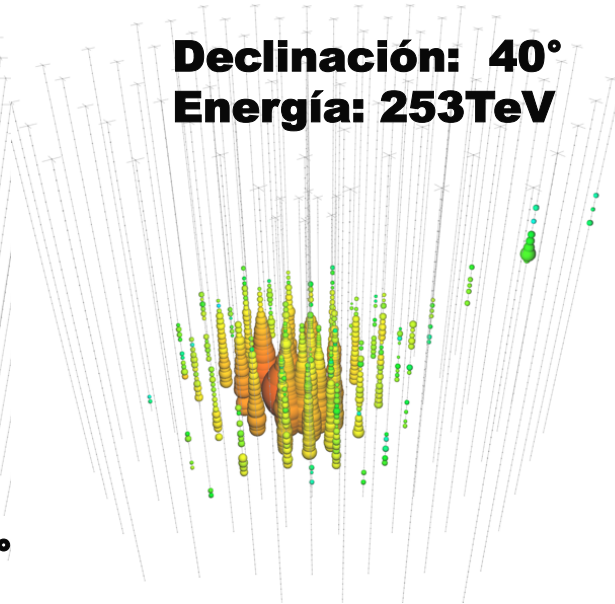


Declinación: -13.2°
Energía: 82TeV



Declinación: -0.4°
Energía: 71TeV

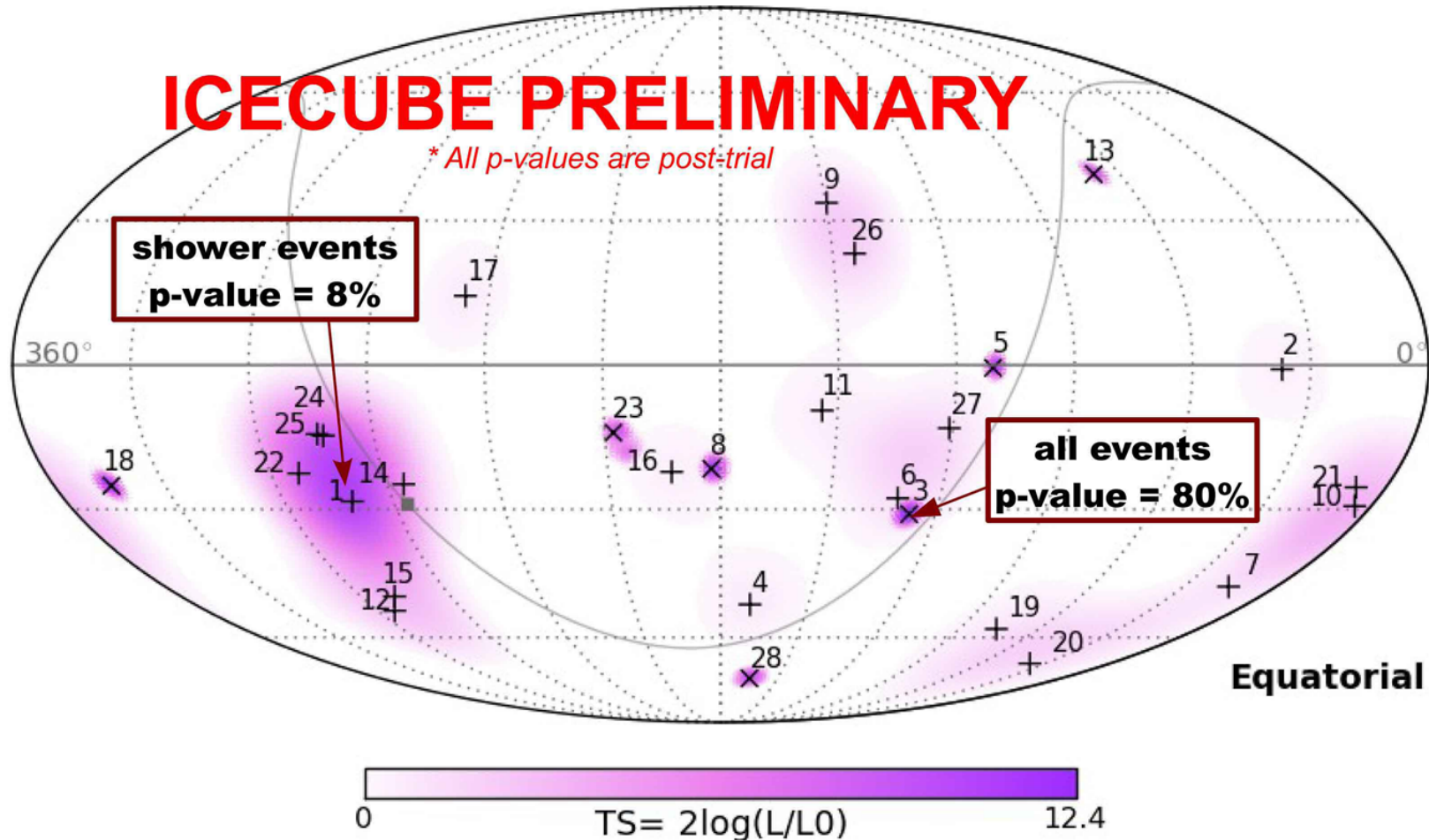
Declinación: 40°
Energía: 253TeV



IceCube Preliminary

Primeros neutrinos cósmicos

Primer mapa del cielo en neutrinos de alta energía



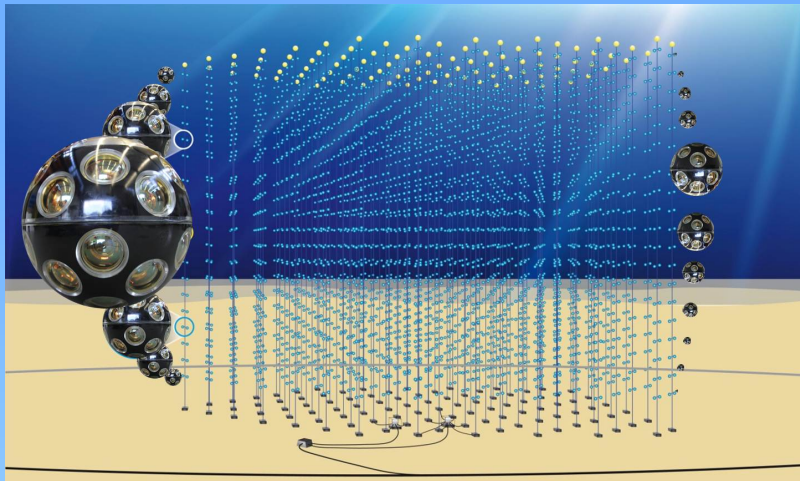
Todavía no hay una acumulación significativa de sucesos

KM3NeT

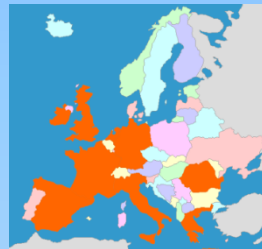


Proyecto para la construcción de un telescopio de neutrinos distribuido de varios kilómetros cúbicos en el mar Mediterráneo.

Contribuciones paralelas para proyectos de biología marina, geofísica, oceanografía, etc.



- 30 Institutos de Física de Partículas y Astro-partículas
- 7 Institutos de Ciencias y tecnologías marinas
- 10 países europeos



2500 m
Toulon
PACA
France
ANTARES

3500 m
Capo Passero
Sicily
Italy
NEMO

4500-5200 m
Pylos
Peloponnese
Greece
NESTOR

KM3NeT

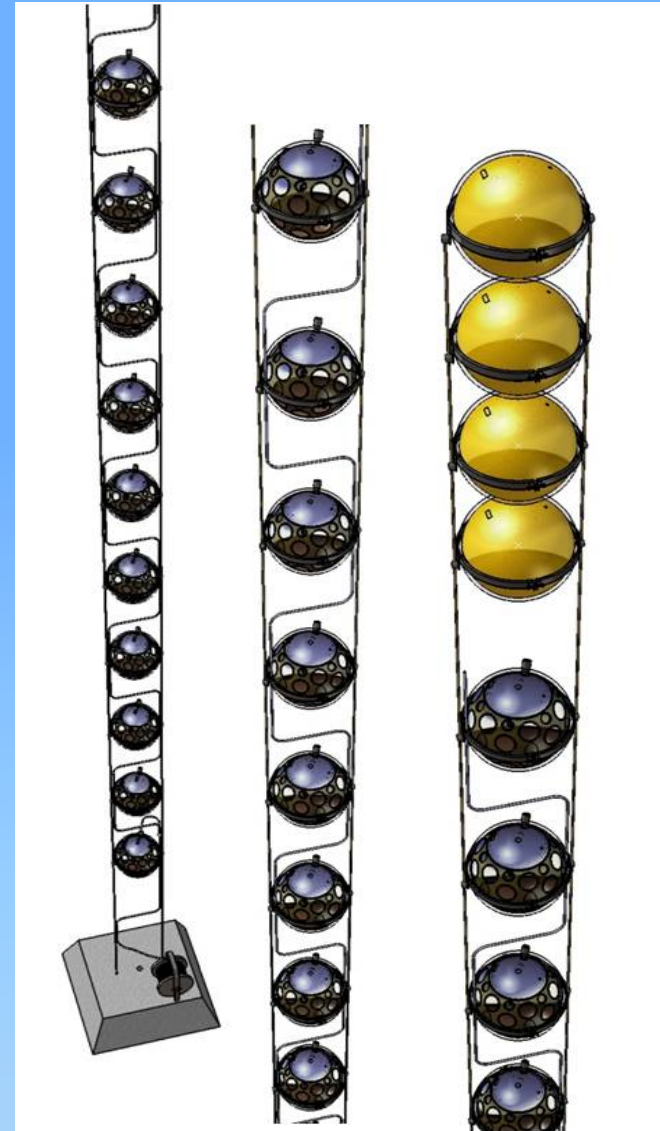
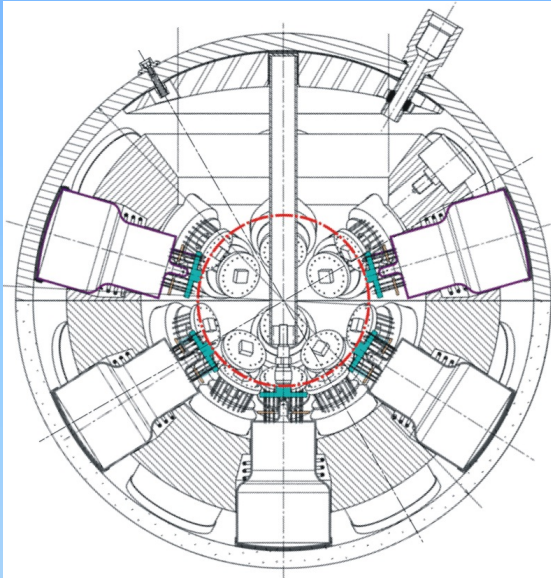


Multi-PMT OM:

- Fotomultiplicadores de 3" (31 en cada módulo)
- Esferas de 17 "
- Mayor superficie de detección

Líneas de detección:

- Dos cuerdas de dyneema flexibles
- 18 pisos separados 36 m
- Primer piso a 100 m del fondo marino
- Cable electro-óptico



KM3NeT



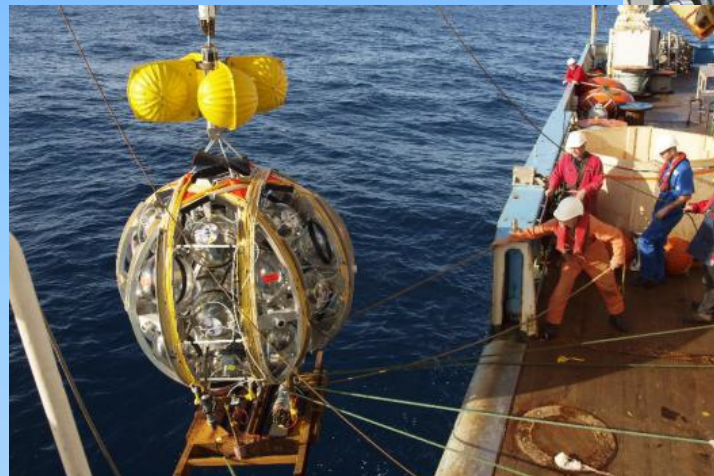
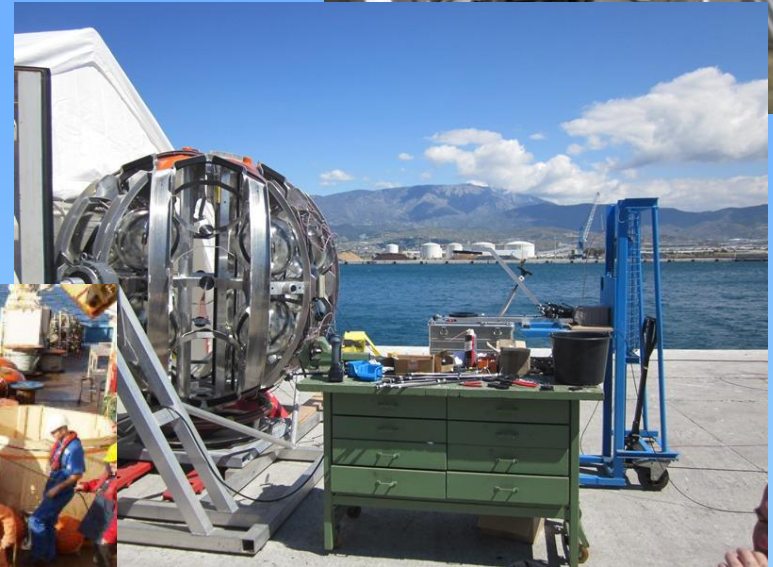
Nueva estrategia de despliegue:

- Estructuras compactas auto-desplegables
- Primeras pruebas realizados con éxito.
- Posibilidad de instalar varias líneas simultáneamente.



Status:

- Primera fase (2015): primeros prototipos y construcción
- Objetivo final: 6 bloques de 115 líneas



Conclusiones

ANTARES:

- Mayor telescopio de neutrinos del Hemisferio Norte.
- Funcionando desde 2008 de acuerdo a las especificaciones.
- Es posible un telescopio de neutrinos en el fondo del mar → KM3NeT.
- Primer laboratorio multidisciplinar submarino (2500 m)

IceCube:

- 28 sucesos con $E > 50 \text{ TeV}$ en dos años (2010/2011) de toma de datos.
- Inconsistente con un fondo atmosférico ($4,1 \sigma$)

KM3NeT:

- Futuro telescopio de neutrinos de varios km^3 en el Mediterráneo
- Comenzada la primera fase de construcción

Gracias por su atención