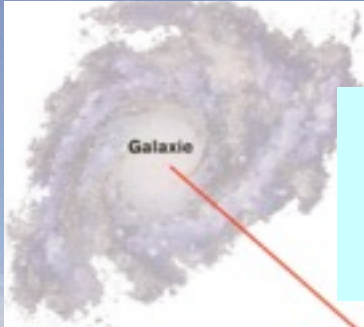


Studiare i Raggi Cosmici: un altro modo per osservare il cielo

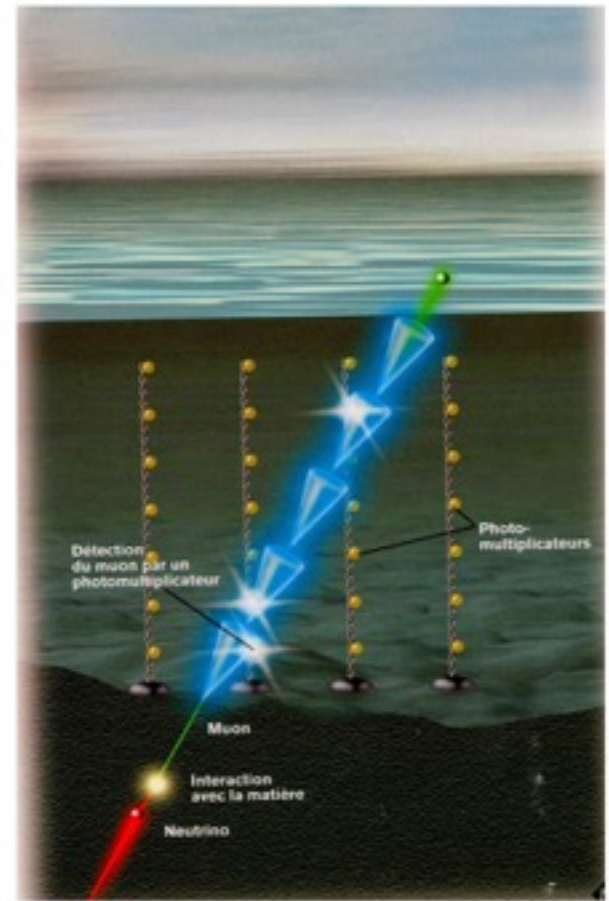


Antonio Capone
Università di Roma "Sapienza"
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Roma

- I Raggi Cosmici: messaggeri da un Universo lontano
- Cosa conosciamo, cosa stiamo studiando
- Apparati sperimentali per "osservare" le regioni più attive ed energetiche dell'Universo
- Sinergia fra settori scientifici
- Curiosità

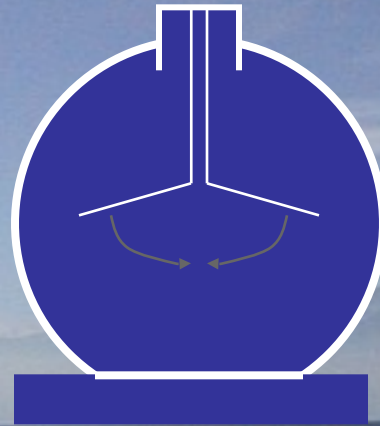


Copyright Science&Vie Juillet 1999



Prima evidenza dell'esistenza dei Raggi Cosmici

Il Primo rivelatore utilizzato per mettere in evidenza l'esistenza dei raggi cosmici , è stato l'elettroscopio usato da Victor Hess:



egli notò che, a differenza di quanto atteso, le foglioline d'oro del suo strumento si riavvicinavano molto più rapidamente quando era ad una grande quota rispetto a quanto succedeva quando era a Terra

- la scarica dell'elettroscopio indica che il gas interno all'ampolla è ionizzato
- la ionizzazione è provocata da particelle cariche che attraversano l'ampolla
- se il livello di ionizzazione cresce con la quota, i raggi cosmici (che non si chiamavano ancora così) devono necessariamente venire da sopra l'atmosfera.



Hess bei Ballonlandung (1912).

Fig. 2. Victor Hess (in the middle) and his crew in the balloon gondola after the landing in Peskow.

Perché studiamo ancora oggi i Raggi Cosmici ??

- I Raggi Cosmici hanno offerto la possibilità di studiare molte delle proprietà delle particelle allora note, di scoprirne altre, di avviare lo studio della **Fisica delle particelle elementari**.
- La costruzione di **Acceleratori** di particelle ha permesso di creare in laboratorio le migliori condizioni per lo studio delle **proprietà & interazioni** delle particelle elementari.
- Oggi il **Modello “Standard”** delle particelle e delle loro interazioni è in grado di descrivere minuziosamente tale parte della materia di cui è composto l’Universo: che però è solo il 5% dell’Universo !!!!! Gran parte dell’Universo sfugge alla nostra conoscenza: **Materia Oscura, Energia Oscura, ...**
- Lo **studio dei Raggi Cosmici** continua ancora oggi e può fornire risposte a quesiti ancora aperti:
 - **l’asimmetria materia-antimateria** è presente ovunque ?
 - **le energie elevatissime osservate** come/dove sono raggiunte ?
 - i Raggi Cosmici possono permetterci di individuare le loro “sorgenti” ?? → **astronomia** ?
 - Quali particelle sono più adeguate per tale astronomia ??

Cosa sappiamo oggi dei Raggi Cosmici ??

- ~ 1000 particelle/(s·m²)
- nuclei ionizzati: **90% protoni, 9% particelle α , nuclei più pesanti**
- quale e l'origine dei raggi cosmici ?
 - **nel sistema solare ?** una piccola quantità associata a fenomeni violenti nel Sole e caratterizzata da grande variabilità temporale
 - **nella galassia: la maggior parte.** Si nota anche una anticorrelazione con intense attività solari
 - **extragalattica: la parte più energetica dello spettro**

Come possiamo studiare i Raggi Cosmici ??

Misure dirette della radiazione cosmica primaria (prima che entri/interagisca con l'atmosfera)

nello spazio (satelliti)

nell'alta atmosfera (palloni)

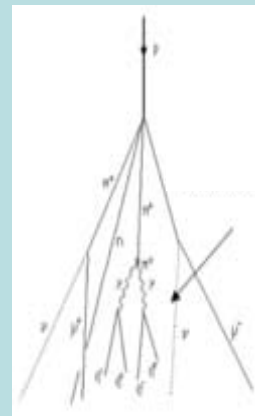
Misure indirette "a Terra" (dopo che i R. C. hanno interagito con l'atmosfera)

studio degli "sciami" di particelle originate dalla loro interazione

studio della luce (Cherenkov) da essi prodotta in aria

rivelatori a Terra

laboratori sotterranei

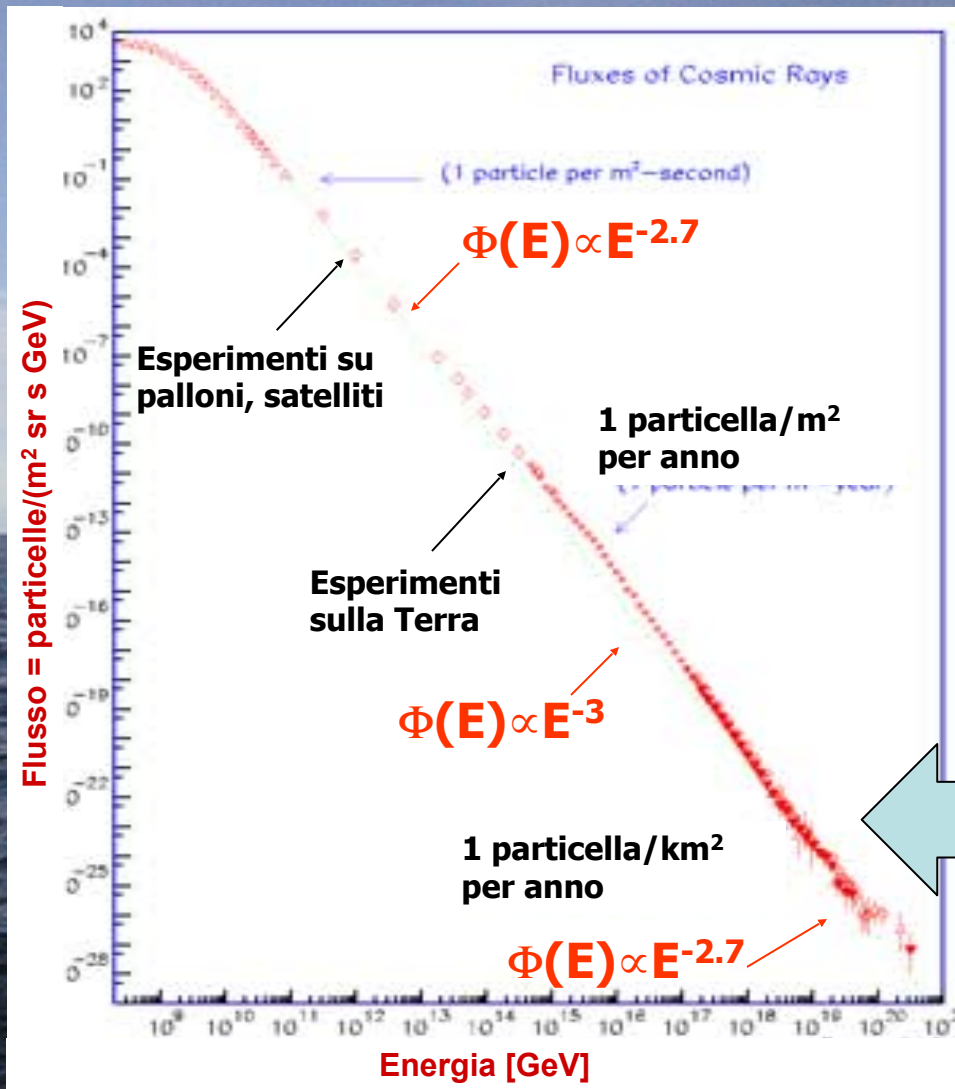


- Raggi cosmici primari, originati nell'Universo, nella nostra Galassia ma anche al di fuori di essa, interagiscono continuamente nell'alta atmosfera dando luogo a "sciami" di particelle.
- Alcune particelle più "penetranti" (muoni, neutrini) possono arrivare al suolo ed anche attraversare strati di materia.
- Solo i neutrini, scarsamente interagenti, possono attraversare la Terra !



Cosa altro sappiamo dei Raggi Cosmici

Distribuzione in energia dei R. C.

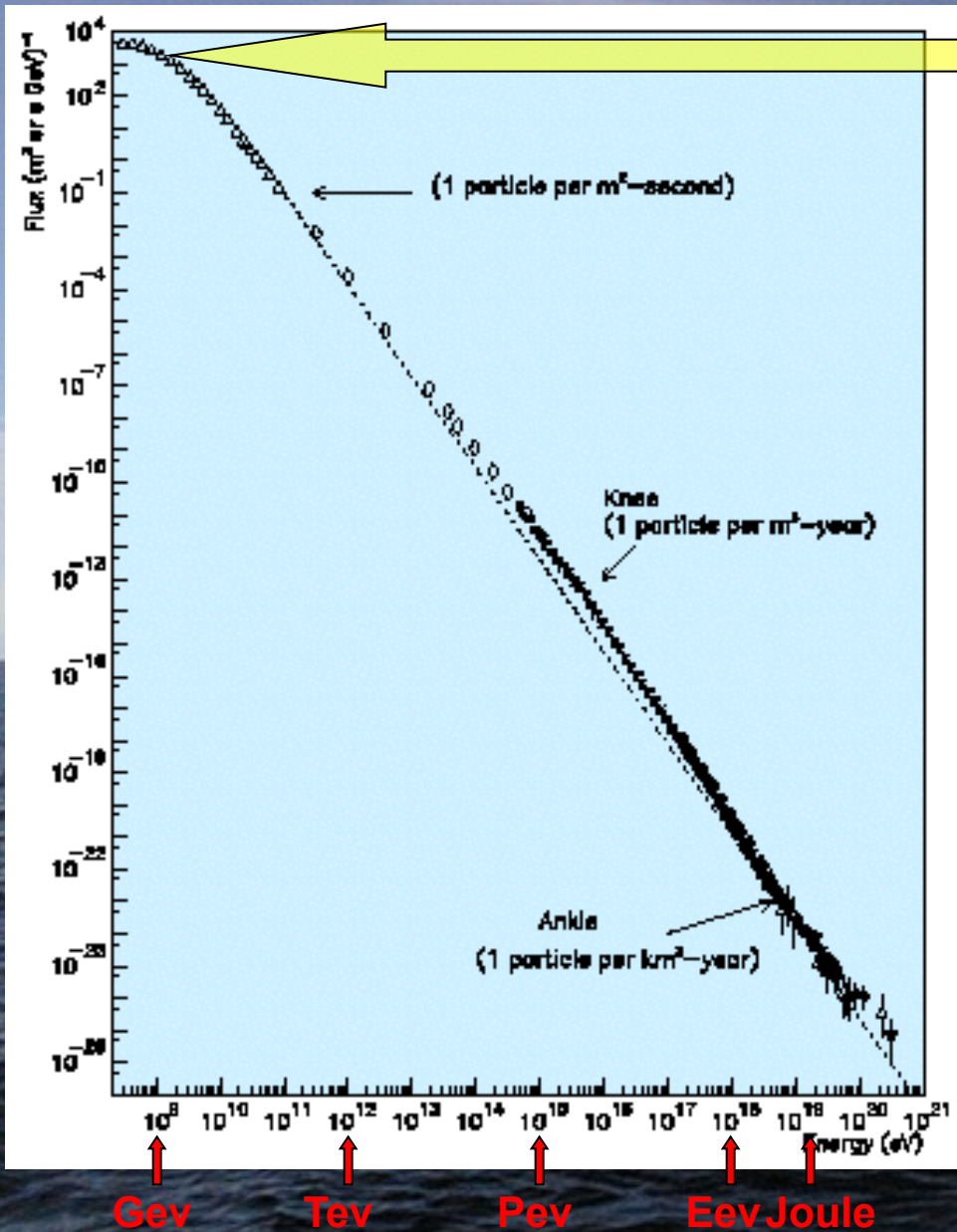


- Rivelate particelle elementari, protoni, con energia maggiore di 10²¹eV (come quella di una palla da tennis lanciata in prima battuta da un campione di tennis ~150km/h)

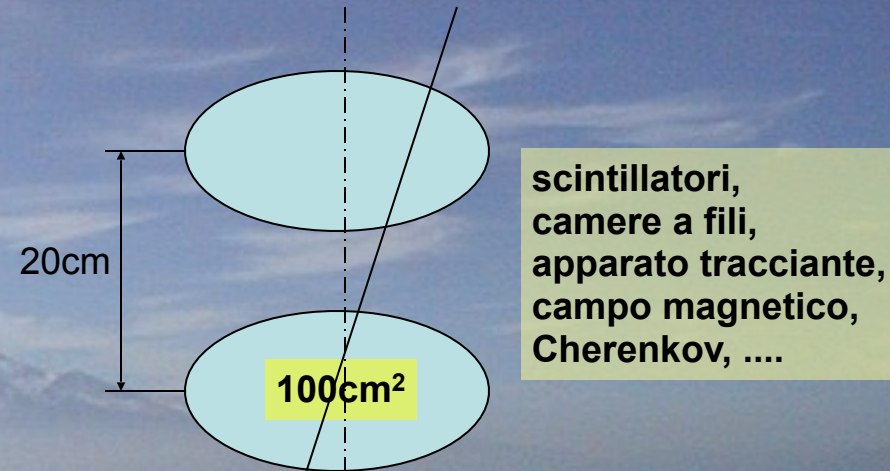
- Molte domande senza risposta:
 - Da dove vengono ? Dalla nostra Galassia ?
 - Quale meccanismo è capace di accelerarle ?
 - ...

Per rivelare i raggi cosmici di energia così elevata è necessario un rivelatore di grandi superficie: più di 1 km²

Rivelazione di raggi cosmici primari con $E \leq 10 \text{ GeV}$



~ 10 particelle/s



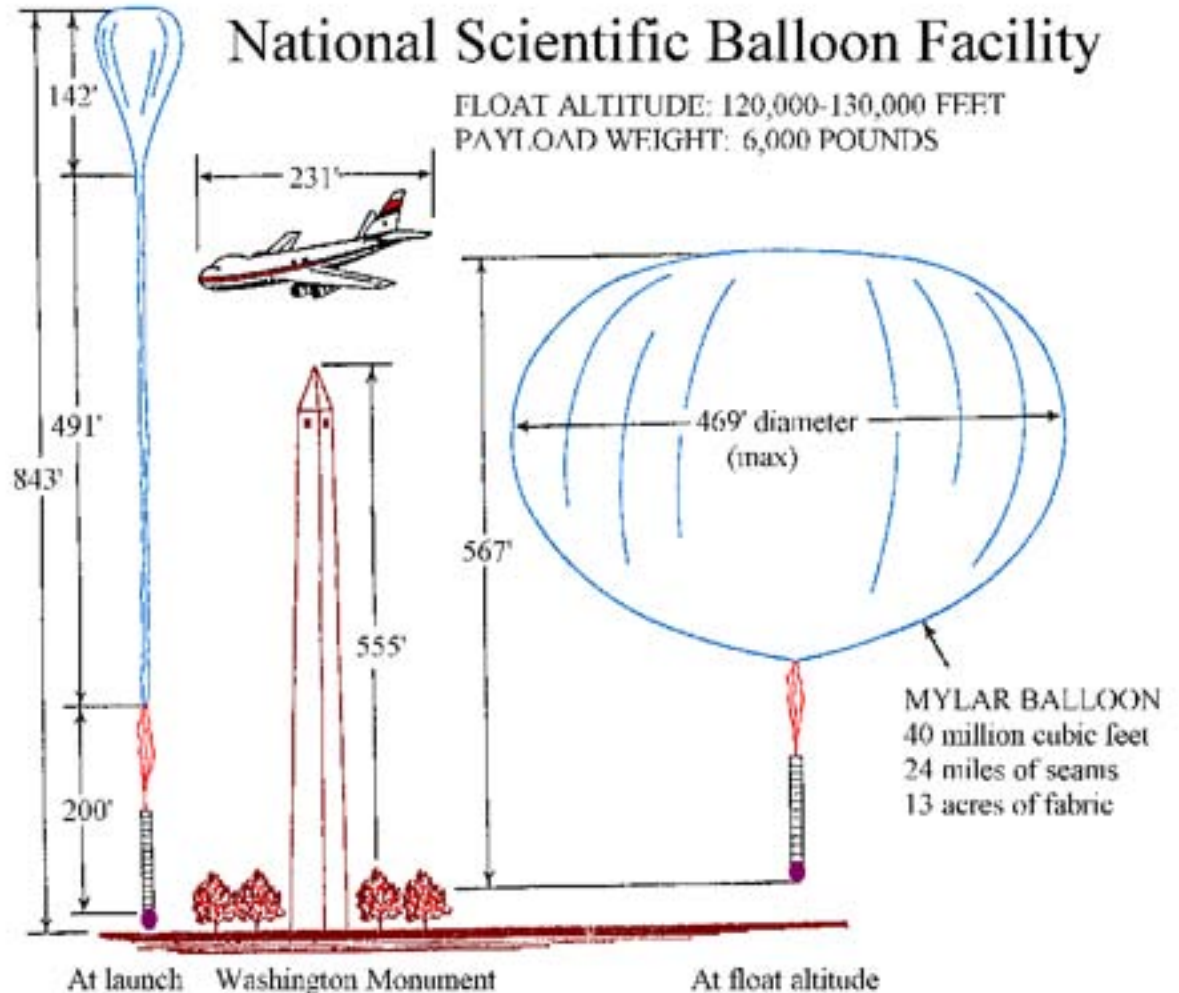
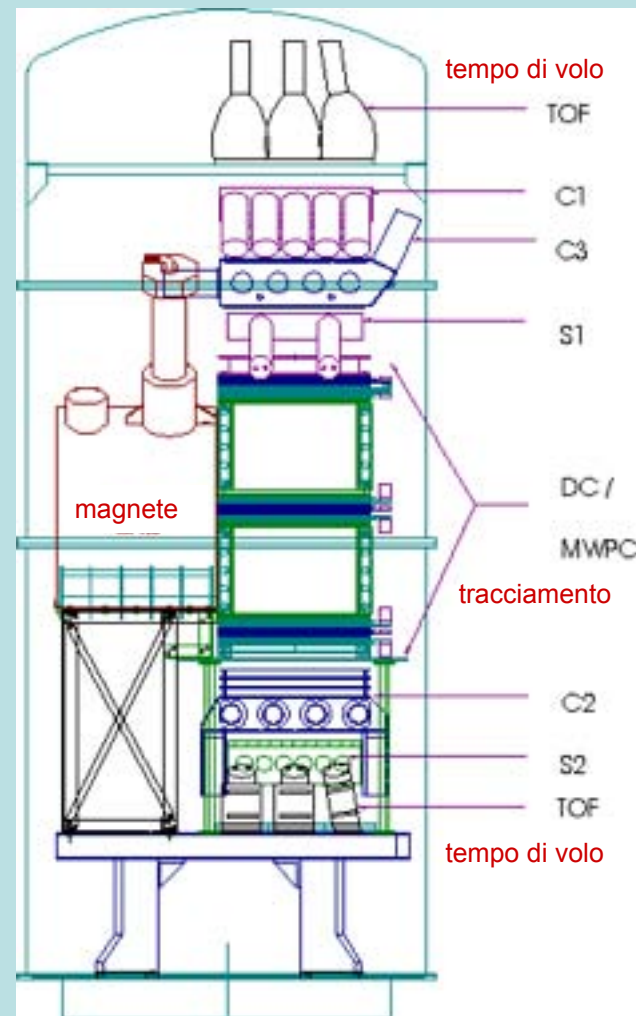
Un piccolo apparato trasportato da palloni (qualche decina/centinaio di ore di volo \rightarrow più di 10^6 eventi) può raccogliere una discreta statistica nella regione di energia fino a $\sim 10 \text{ GeV}$:

- composizione dei raggi cosmici (protoni, nuclei pesanti, ...)
- spettro in energia
- materia/antimateria (identificazione di positroni, antiprotoni, anti-elio, ...)

Le prime misure di Raggi Cosmici primari

IMAX : Isotope Matter Antimatter Experiment

- composizione dei raggi cosmici (protoni, nuclei pesanti, ...)
- spettro in energia
- materia/antimateria (identificazione di positroni, antiprotoni, anti-elio, ...)



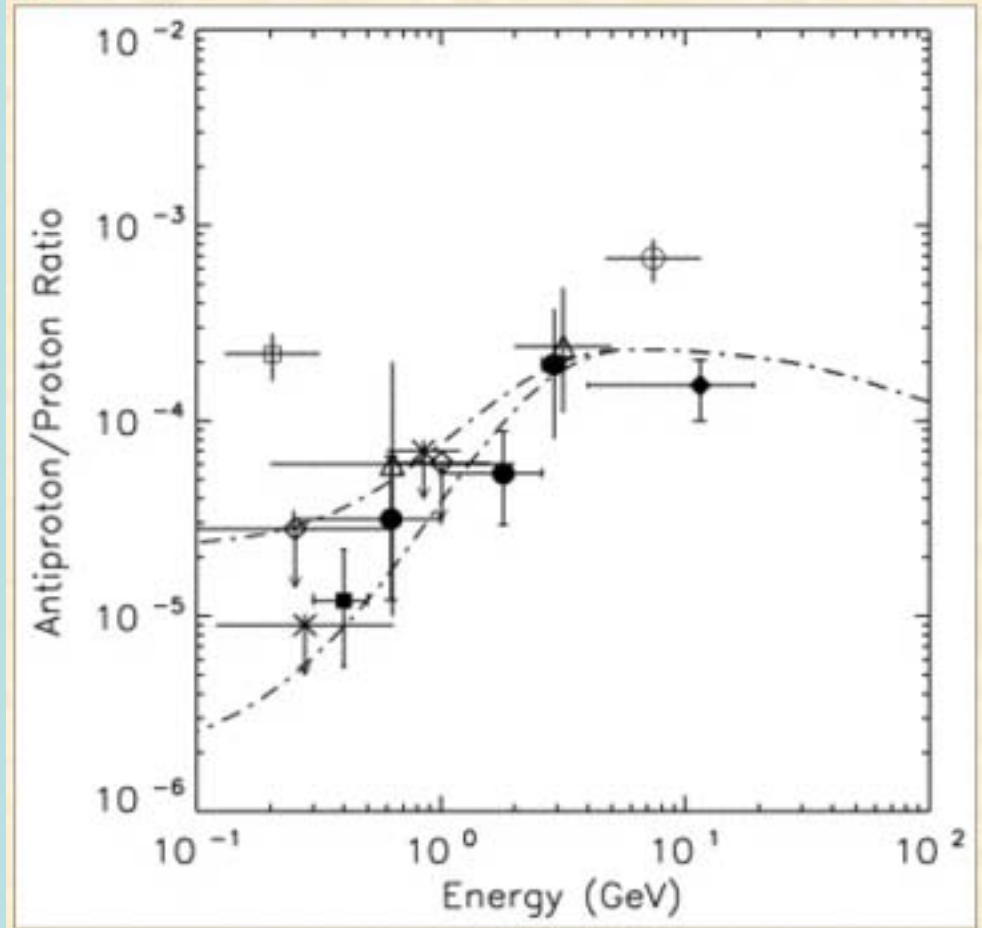
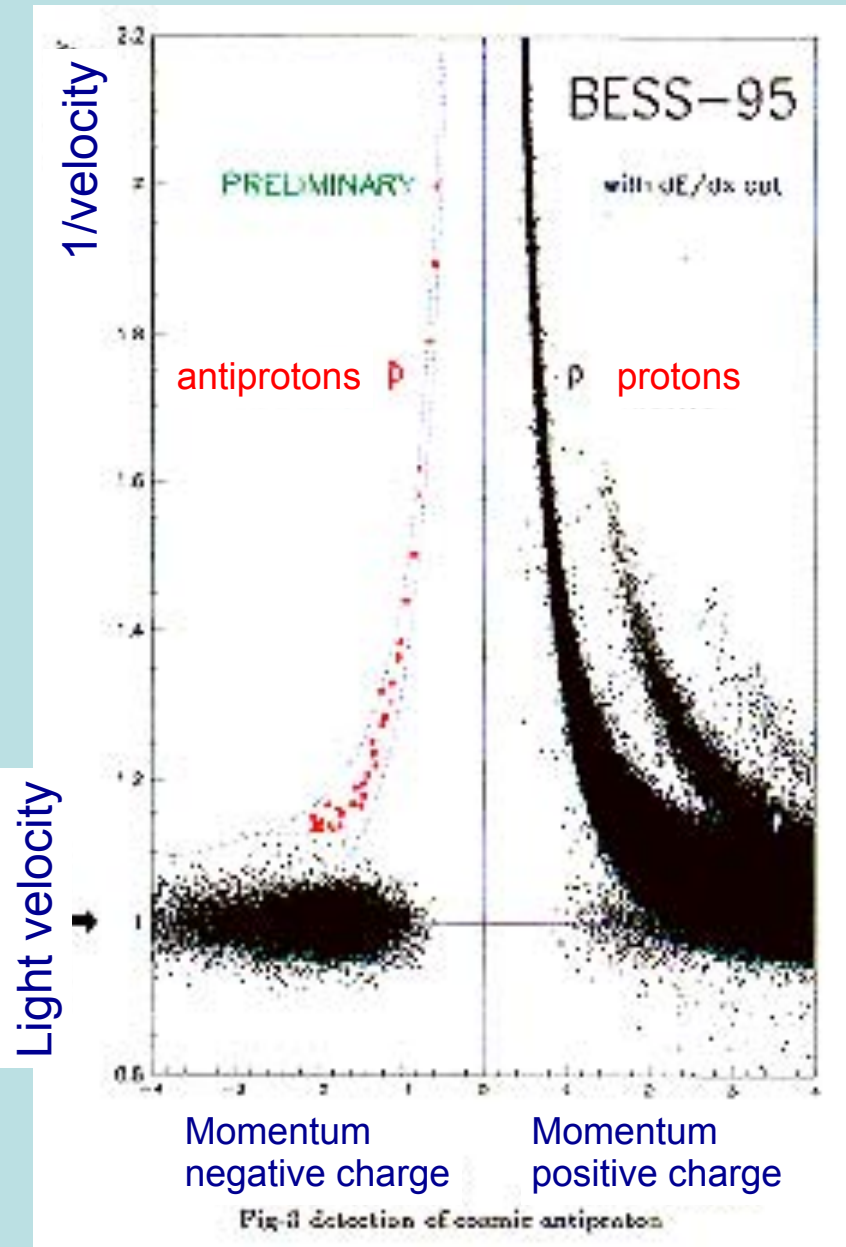
IMAX - La fase di lancio

FLIGHT

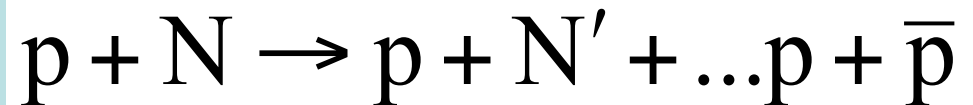
16-17 July 16-17, 1992, Lynn Lake, Manitoba, Canada. Float was reached about 7 hours after launch. The instrument took data throughout ascent, recording about 1.4×10^6 events. These data will be used to determine altitude-dependent particle spectra. At the end of the float period, the magnet was ramped down and data was taken with the magnet off in order to check the alignment of the tracking chambers. Landing was near Peace River, Alberta, Canada, with the instrument being recovered in excellent condition. All payload and detector systems appear to have performed well throughout the flight. Over 3.4×10^6 events were recorded during the float period.



Composizione dei raggi cosmici primari: antimateria ?



evidenza di un flusso di antiprotoni nei R.C. primari ma ... compatibile con quelli aspettati dalle interazioni



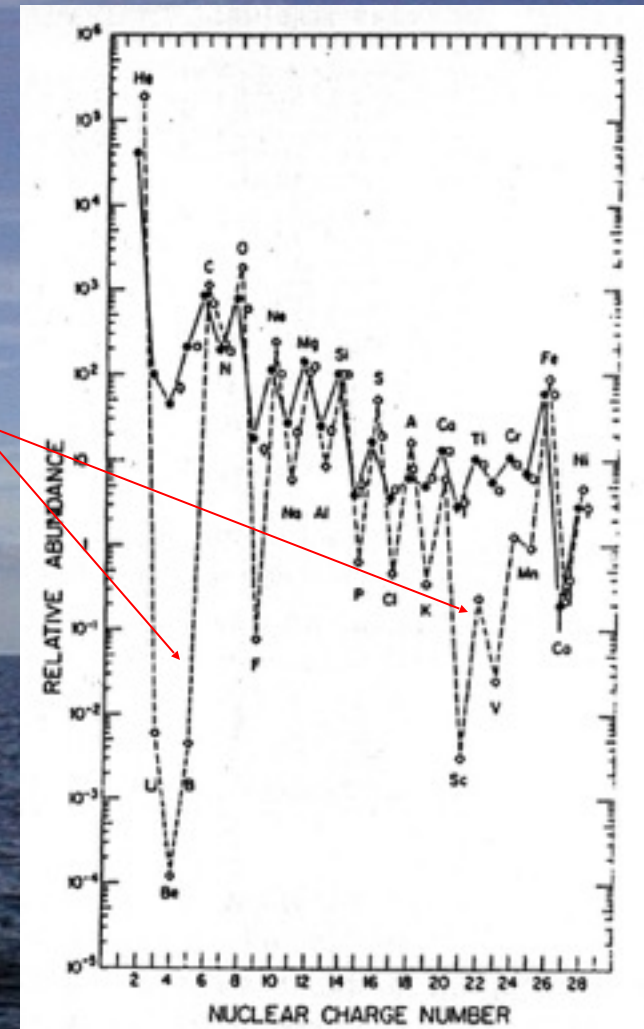
Composizione dei raggi cosmici primari

Nei raggi cosmici elementi pesanti ($Z>1$) sono in percentuale relativa maggiore, rispetto ai protoni, di quanto lo siano nel sistema solare:

- nei raggi cosmici (rispetto alla materia presente nei corpi del sistema solare) la percentuale di protoni è ridotta dalla maggiore difficoltà di ionizzazione (dell'H rispetto a nuclei più pesanti)

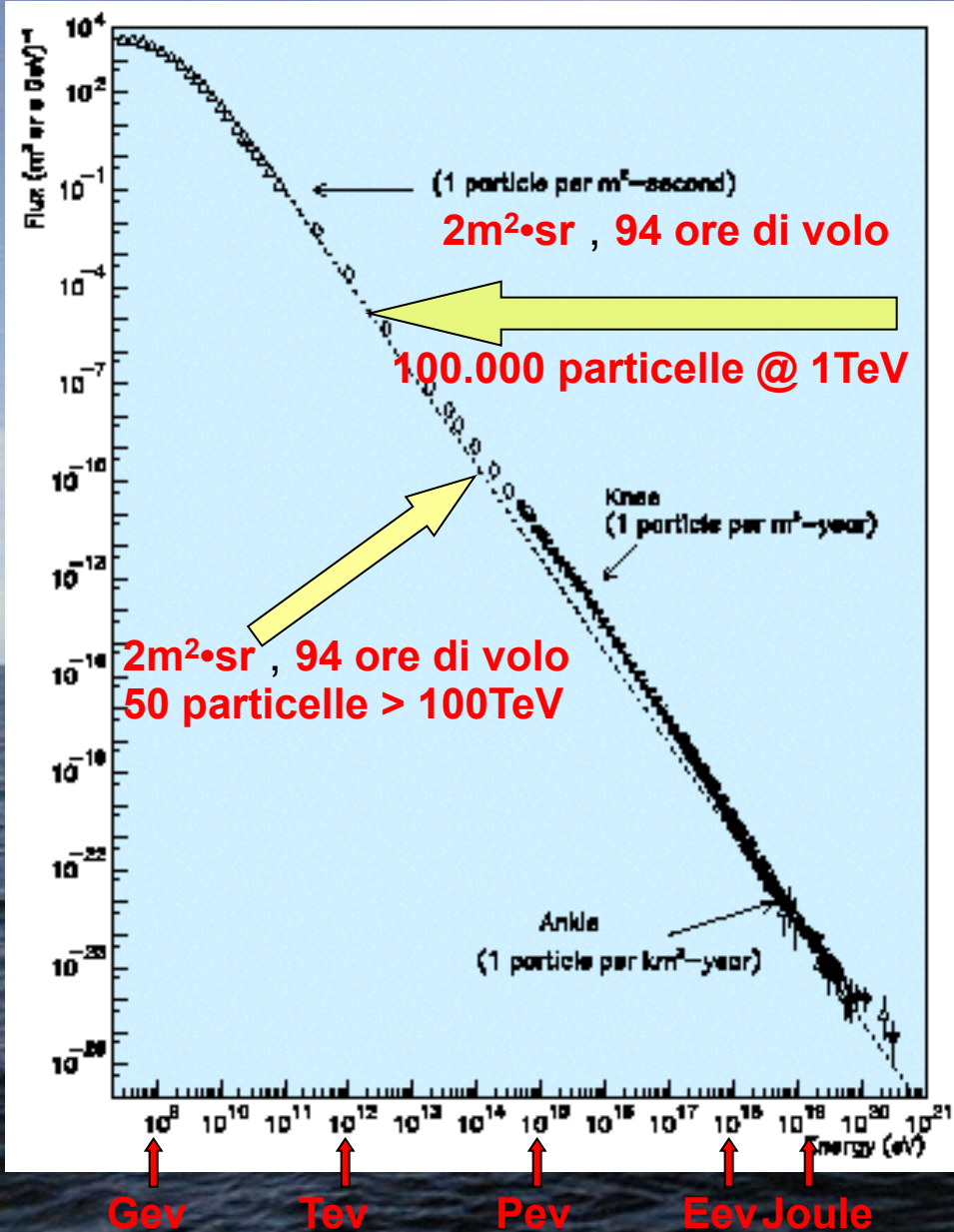
- gli elementi: **Li, Be, B, Ti, V, Cr, Mn** sono molto più abbondanti rispetto alla materia del sistema solare. Tali elementi sarebbero praticamente assenti nella fase finale del processo di nucleosintesi stellare. Nei raggi cosmici sono presenti in quanto risultati delle reazioni nucleari dell'ossigeno (Li, Be, B) e del ferro contenuti nei raggi cosmici (Ti, V, Cr, Mn) e la materia interstellare (ISM). Ciò comporta una ipotesi sul tempo di permanenza dei raggi cosmici nella galassia:

- per spiegare la presenza di tali nuclei i raggi cosmici devono attraversare una quantità di materia pari a $X = 10\text{g/cm}^2$
- la densità nel disco della galassia è pari a $\rho_p \sim 1 \text{ protone/cm}^3$
- lo spessore del materiale attraversato corrisponde quindi a $X / (m_p \cdot \rho_p) = 3 \cdot 10^{24} \text{ cm} = 1000\text{kpc}$
- i raggi cosmici rimangono "intrappolati" nella galassia per ≥ 10 milioni di anni



Abbondanza degli elementi che compongono i raggi cosmici dall'He al Ni, espressa relativa al Si, confrontata all'abbondanza relativa per i pianeti del sistema solare.

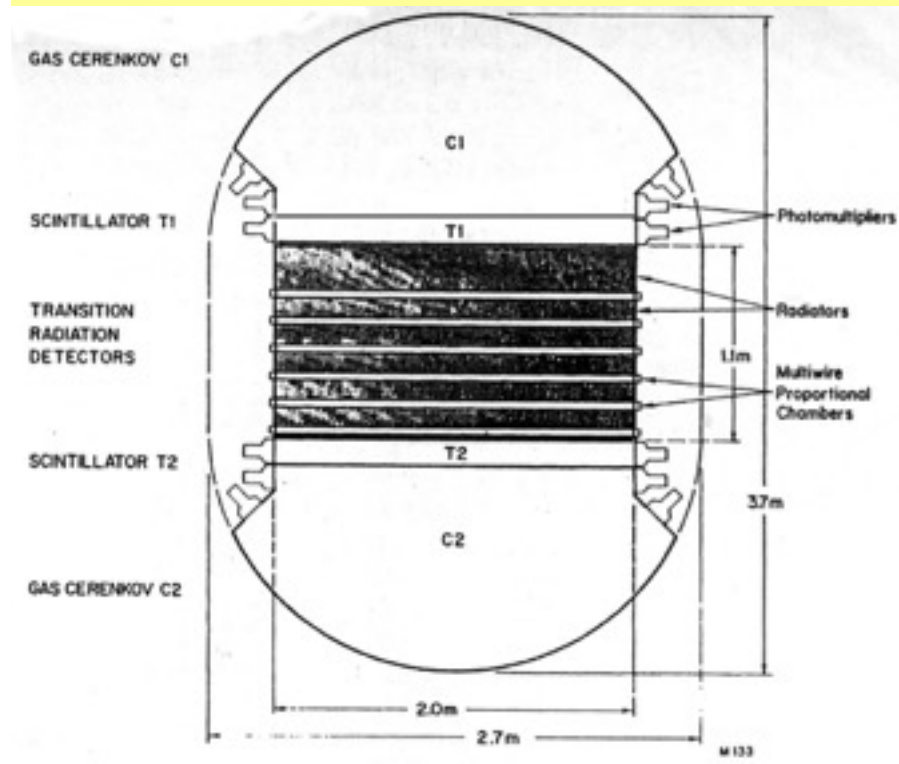
Rivelazione di raggi cosmici primari con $E \leq 1-10$ TeV



Su navette spaziali (Shuttle, satelliti, stazioni spaziali) è possibile alloggiare apparati di più grandi dimensioni e per tempi più lunghi:

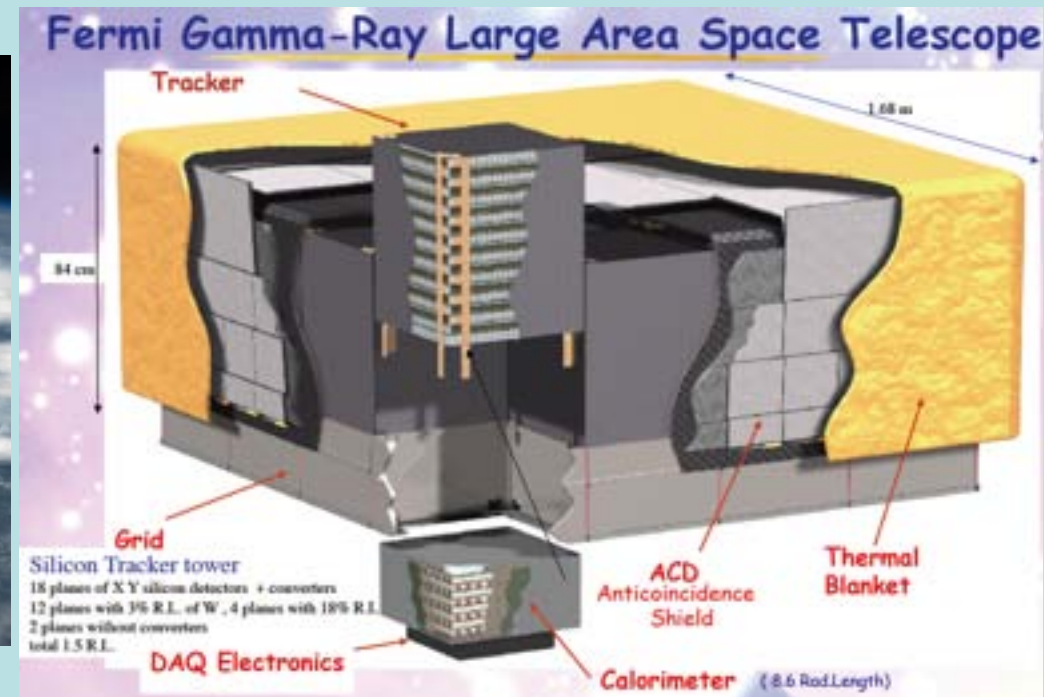
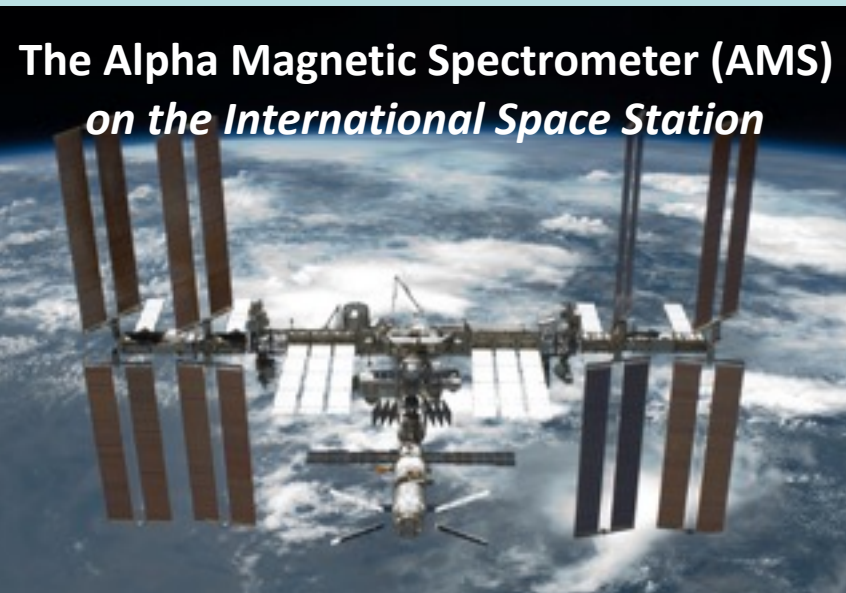
- composizione dei raggi cosmici (protoni, nuclei pesanti, ...)
- spettro
- materia/antimateria (identificazione di positroni, antiprotoni, antineutrini)

Il primo apparato per lo SpaceLab --> $2\text{m}^2 \cdot \text{sr}$

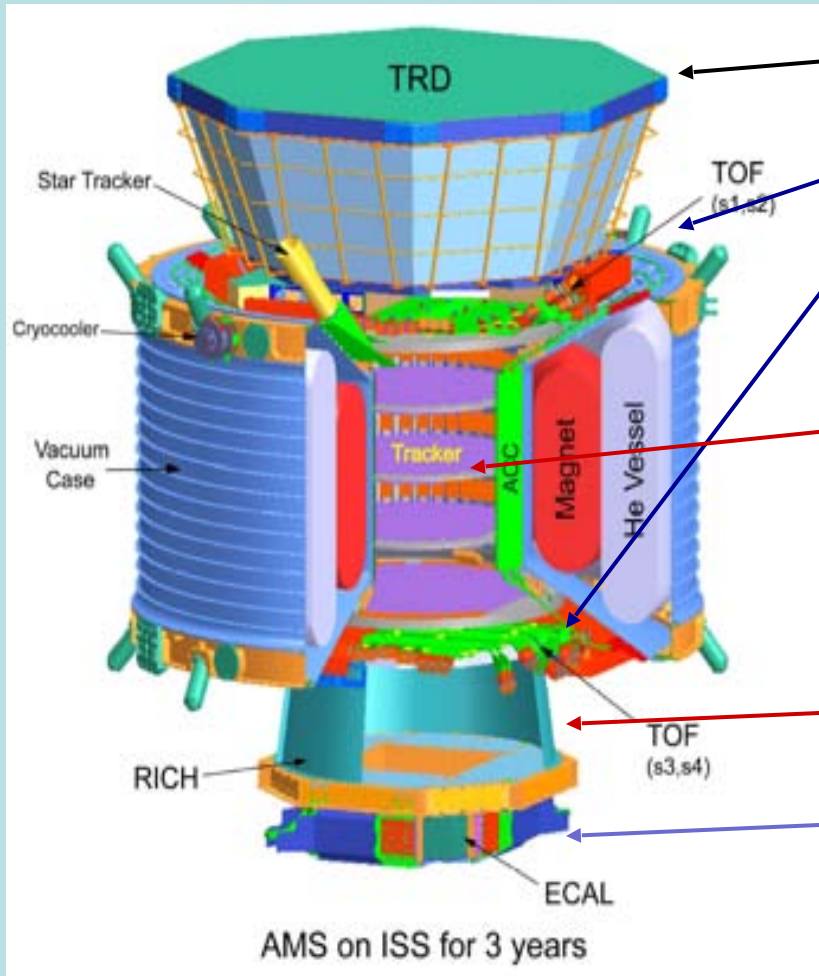


Cross sectional view of the University of Chicago Cosmic Ray Nucleus Experiment on Spacelab (Grunsfeld et al., 1988). (Reprinted with permission from *The Astrophysical Journal*.)

Recenti ed attuali esperimenti per lo studio dei R.C. primari



Attuali esperimenti per lo studio dei Raggi Cosmici primari



rivelatore a radiazione di transizione

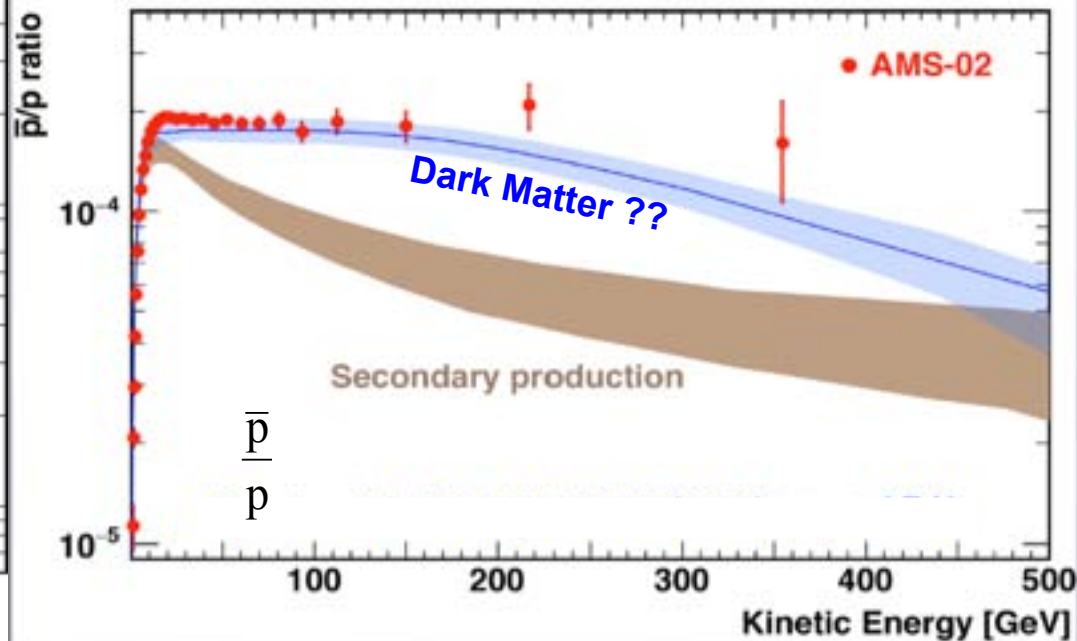
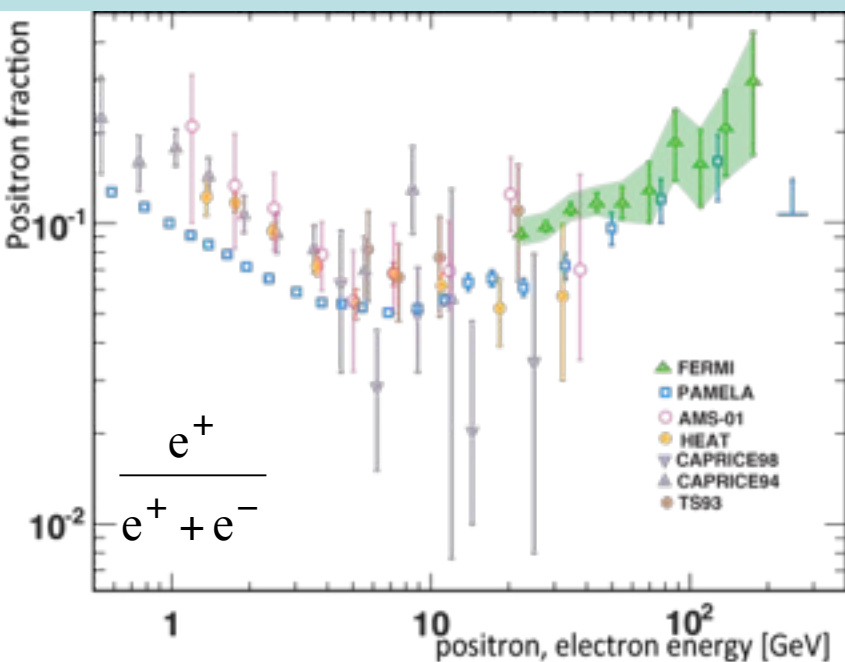
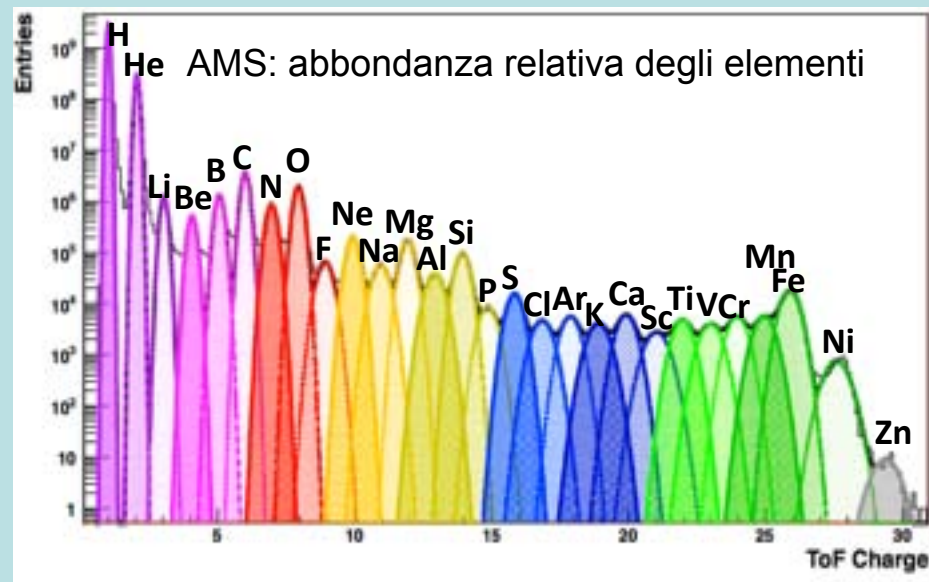
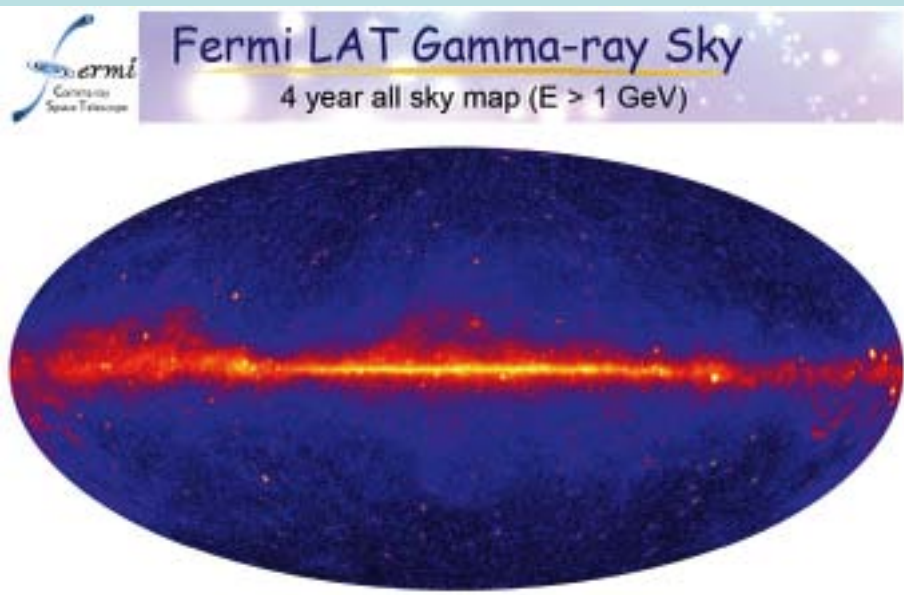
misuratore del tempo di volo

tracciatore in campo magnetico

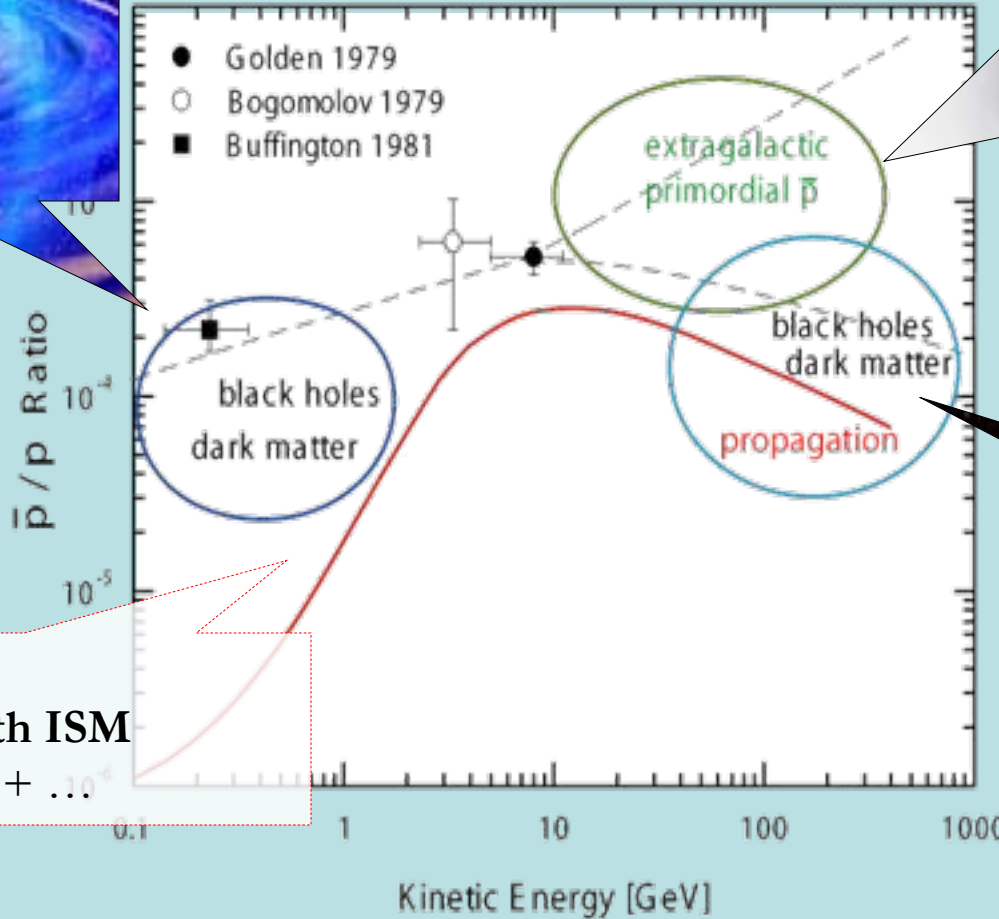
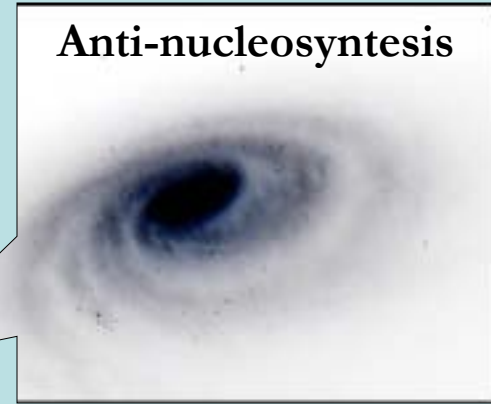
rivelatore di luce Cherenkov

calorimetro elettromagnetico

Risultati selezionati da esperimenti nello spazio



Possibili "sorgenti" di antimateria nei Raggi Cosmici



Background:
CR interaction with ISM
CR + ISM \rightarrow $p\text{-bar}$ + ...



MATERIA OSCURA ???

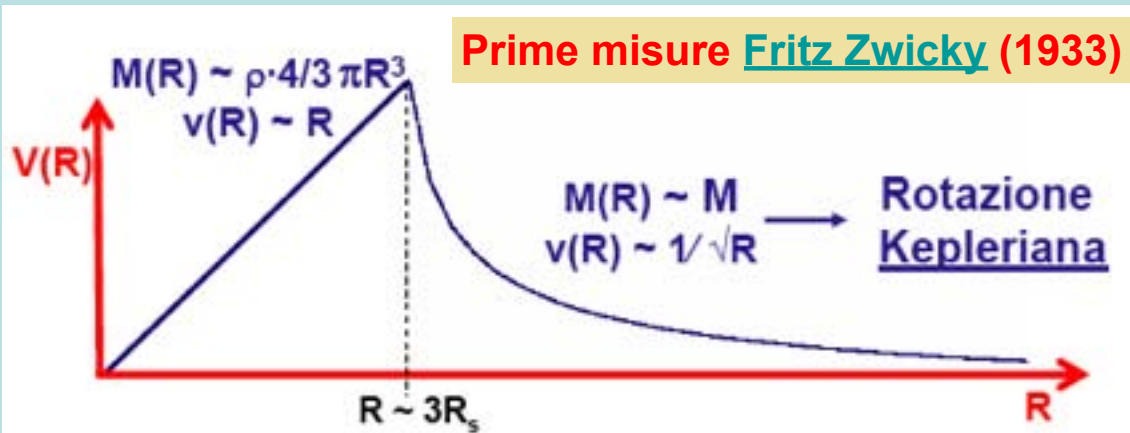
Evidenza di Materia Oscura nelle Galassie

Dalle leggi fondamentali della meccanica sappiamo che una stella di massa m in rotazione in una Galassia deve soddisfare la relazione

$$F = ma = m \frac{v^2}{R} = m \frac{G \cdot M(R)}{R^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{G \cdot M(R)}{R}}$$

acc. centripeta
acc. gravitazionale

Si misurano le velocità orbitali delle stelle in galassie a spirale (Via Lattea, M31) e si confrontano le misure con l'andamento "Kepleriano" della velocità in funzione dal centro della Galassia in questione.



Per stimare la distanza dal centro della Galassia alla quale $M(R) \sim M$, si considera l'andamento dell'intensità luminosa: dove

$$I(R) = I_0 e^{-\frac{R}{R_s}}$$

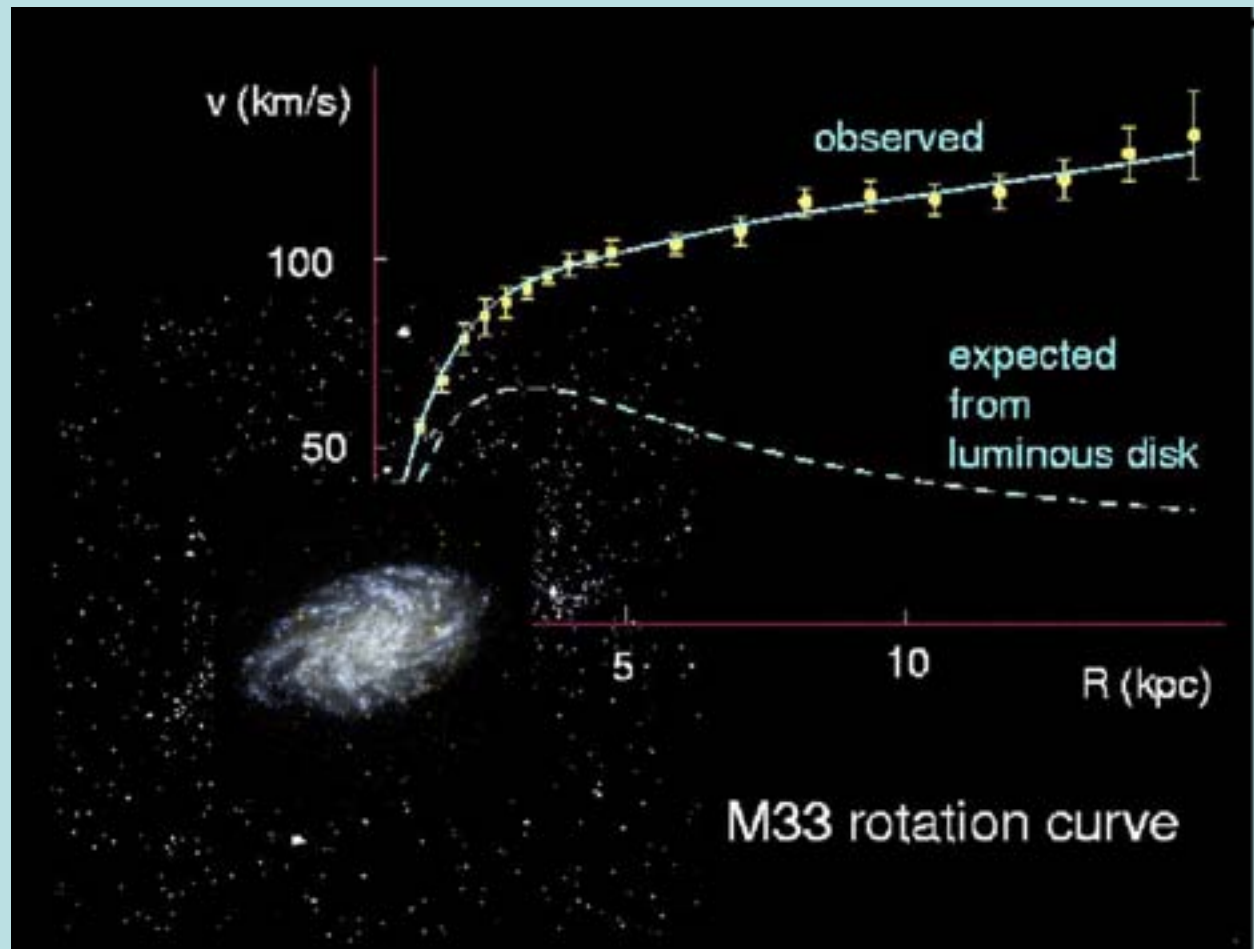
I_0 = intensità luminosa al centro della Galassia

ed R_s = raggio caratteristico (o di Schwarzschild)

per la via Lattea: $R_s = 4$ Kpc

; M31: $R_s = 6$ Kpc

Evidenza di Materia Oscura nelle Galassie

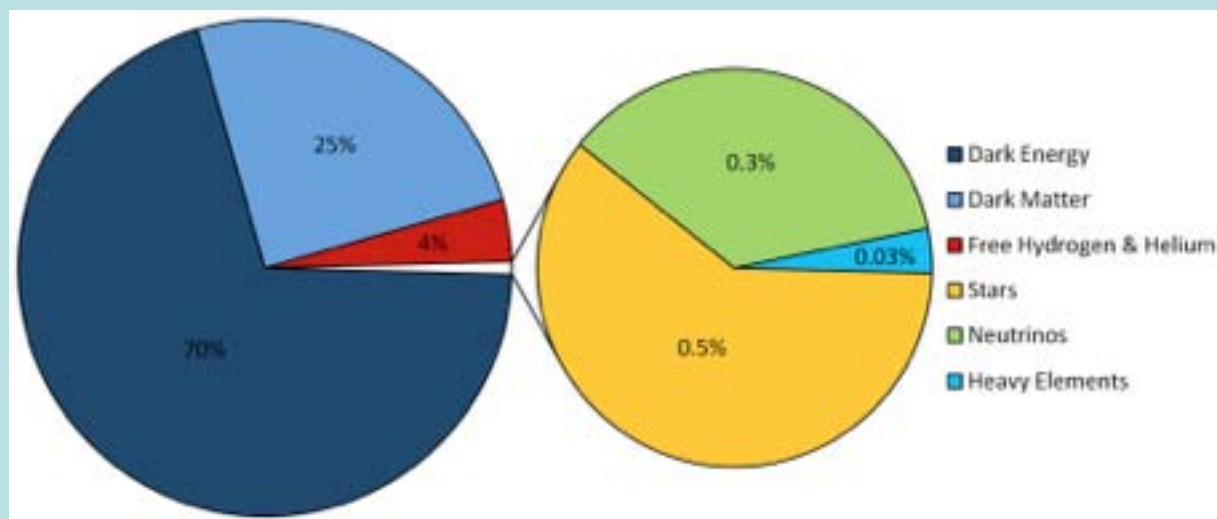


Le osservazioni evidenziano la presenza di un **alone di materia oscura** (“dark halo”). La materia oscura contenuta nell’alone contribuisce a determinare la “forza centripeta” e costituisce un “legame gravitazionale” che permette alle stelle della galassia, anche le più lontane, di conservare una velocità di rotazione di circa 250 km/s

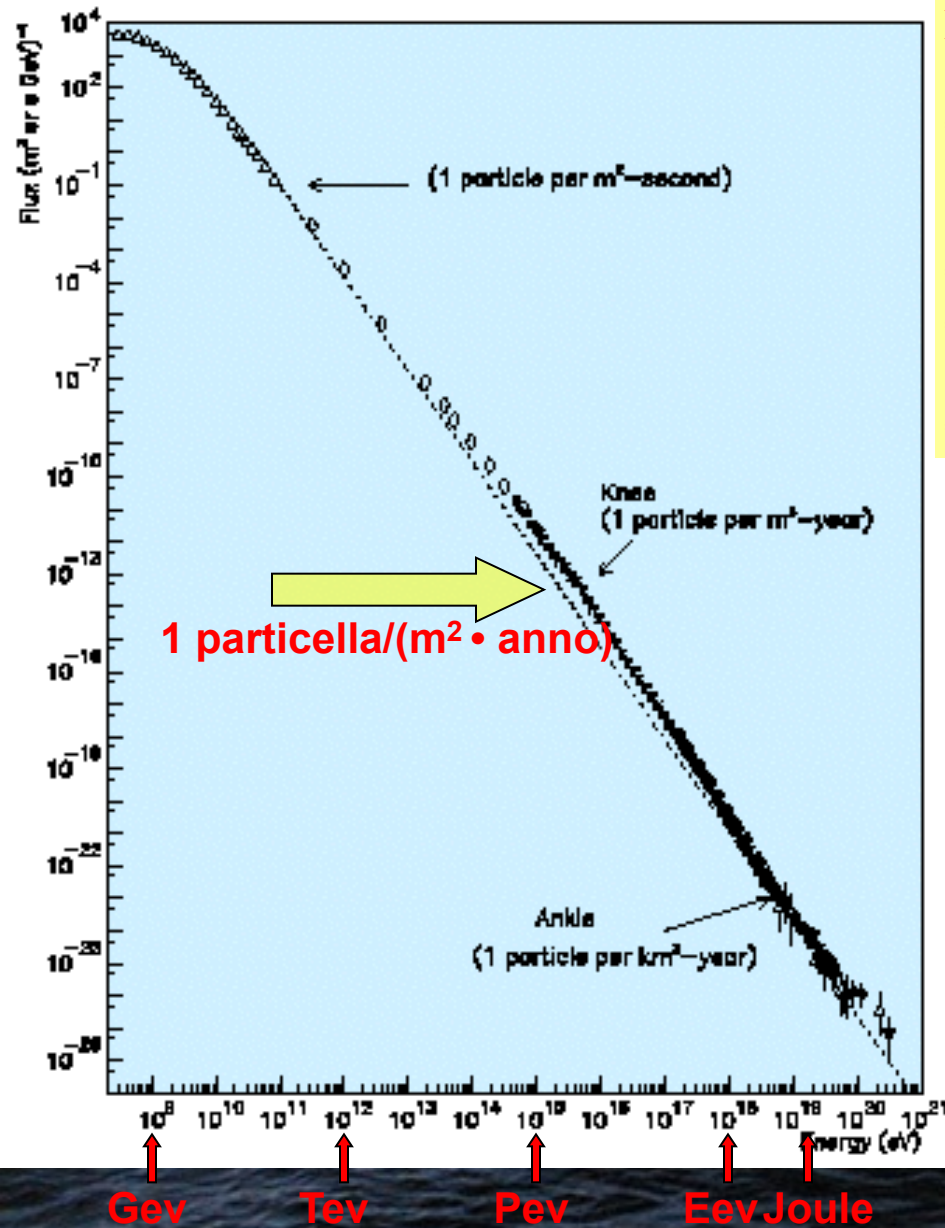
Evidenza di Materia Oscura nelle Galassie

Questioni aperte:

- quali particelle costituiscono questo alone ? Non hanno interazione e.m. o forte, hanno solo interazione gravitazionale (o anche interazione debole: neutrini ?). Sono un nuovo tipo di particelle ?
- attualmente sappiamo che **quarks e leptoni**, prodotti dopo il Big-Bang, la cui quantità è in accordo con il modello della Nucleosintesi, **rappresentano solo il 5% della densità di energia dell'Universo.**
- Si stima che la **materia oscura** può rappresentare **il 25% della densità di energia dell'Universo**
- **il restante 70% della densità di energia dell'Universo** esisterebbe sotto forma di **“dark energy”**
- non si conosce attualmente la natura di **dark matter** e/o **dark energy**, tanti programmi sperimentali, agli acceleratori e non, cercano di acquisire informazioni sulla loro natura.

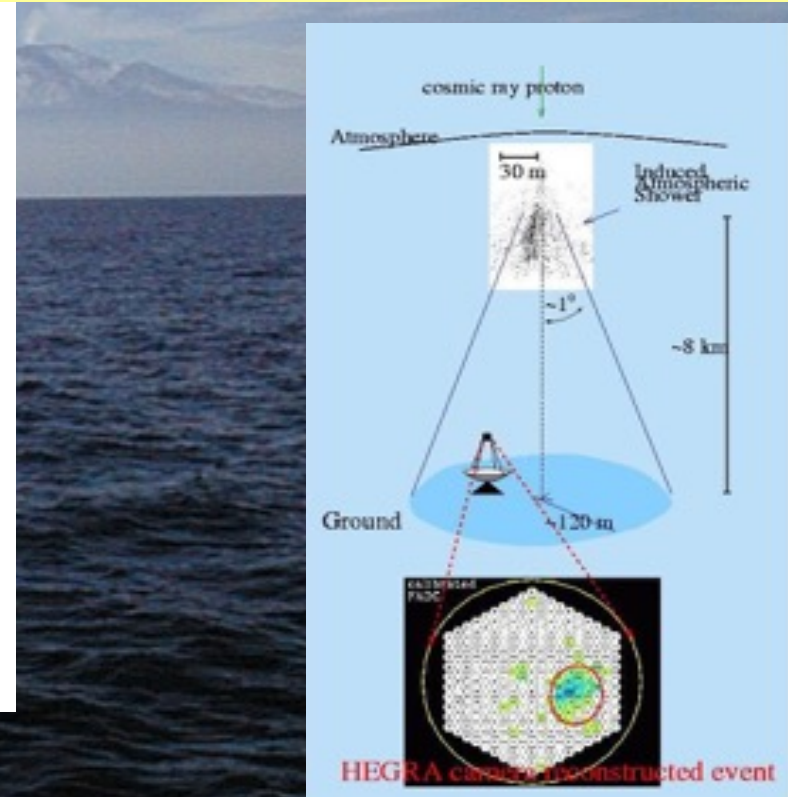


Rivelazione di raggi cosmici di altissima energia ($E \leq 100\text{TeV}$)



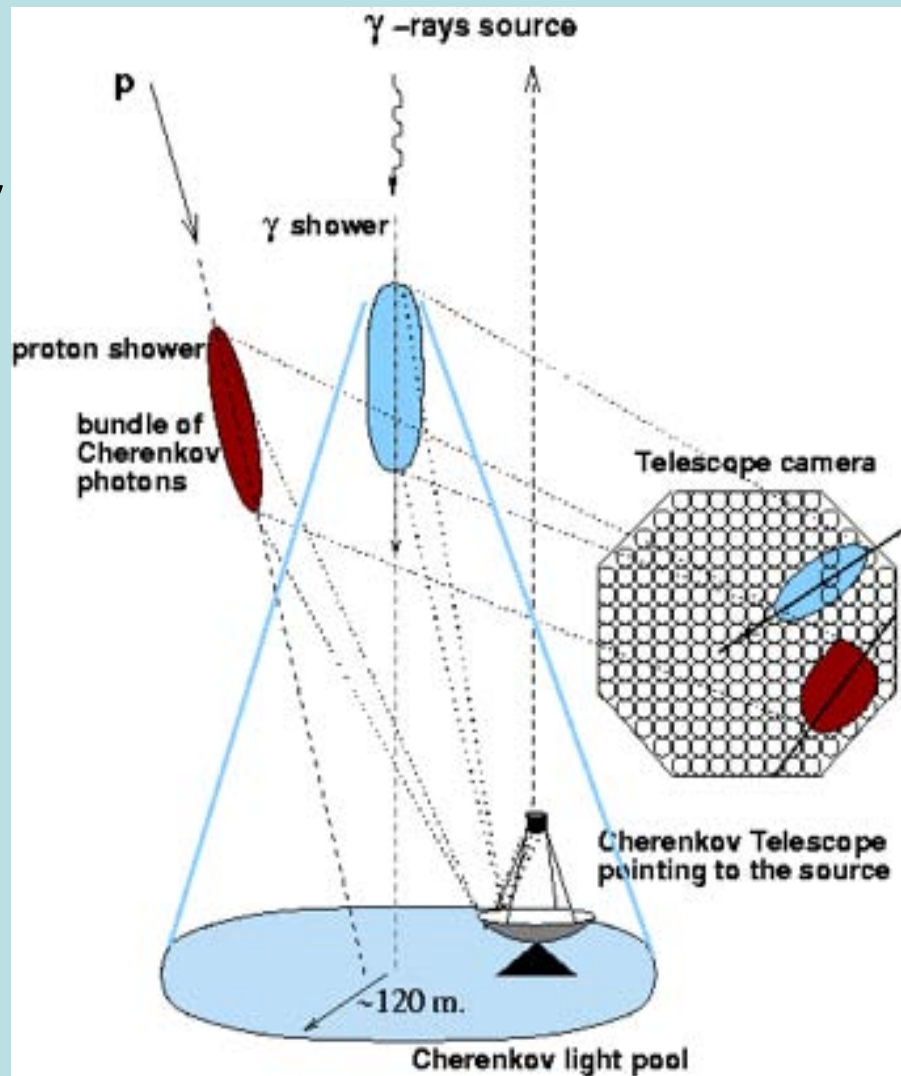
Lo studio di raggi cosmici con $10 \text{ GeV} \leq E \leq 100\text{TeV}$ richiede:

- ⇒ Apparatı con grandi superfici di rivelazione (apparatı a scintillatore, telescopi Cherenkov Imaging, apparatı traccianti, ...)
- ⇒ sulla superficie terrestre
- ⇒ si studiano i “risultati” delle interazioni dei raggi cosmici primari con l’atmosfera
- ⇒ si risale poi a E, direzione, natura dei “primari”



La rivelazione “IACT”: Imaging Atmospheric Cherenkov Technique

- La radiazione Cherenkov è causata dalla propagazione in atmosfera di particelle secondarie con velocità $v > c/n$.
- Brevi impulsi luminosi (5-20 ns).
- I fotoni Cherenkov sono raccolti a Terra da grandi specchi che li riflettono nel rivelatore (camera) per fotoni molto sensibili (Fotomoltiplicatori veloci).
- Lo forma dello sciame è ben rappresentata dalla immagine nella “camera” del Telescopio Cherenkov .



Imaging
Atmospheric
Cherenkov
Technique

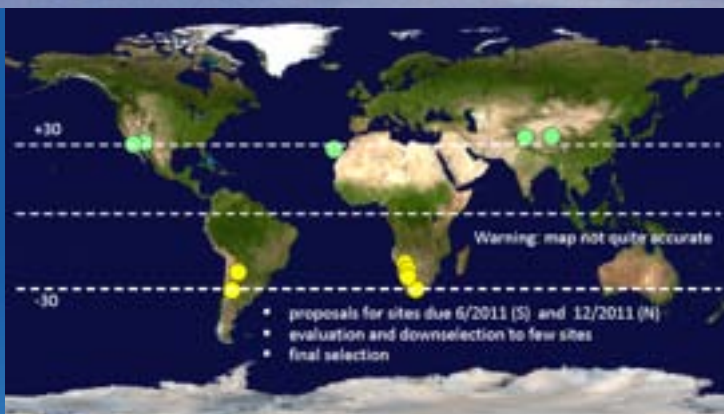
10km



~50km²

- (Multiple) Images of showers
- Gamma rays form consistent pattern
- Excellent gamma-hadron separation (~100%)
- Showers located to ~0.1° at threshold
- Point source location to ~ 20"

Il futuro rivelatore Cherenkov Telescope Array: CTA (schema di funzionamento)

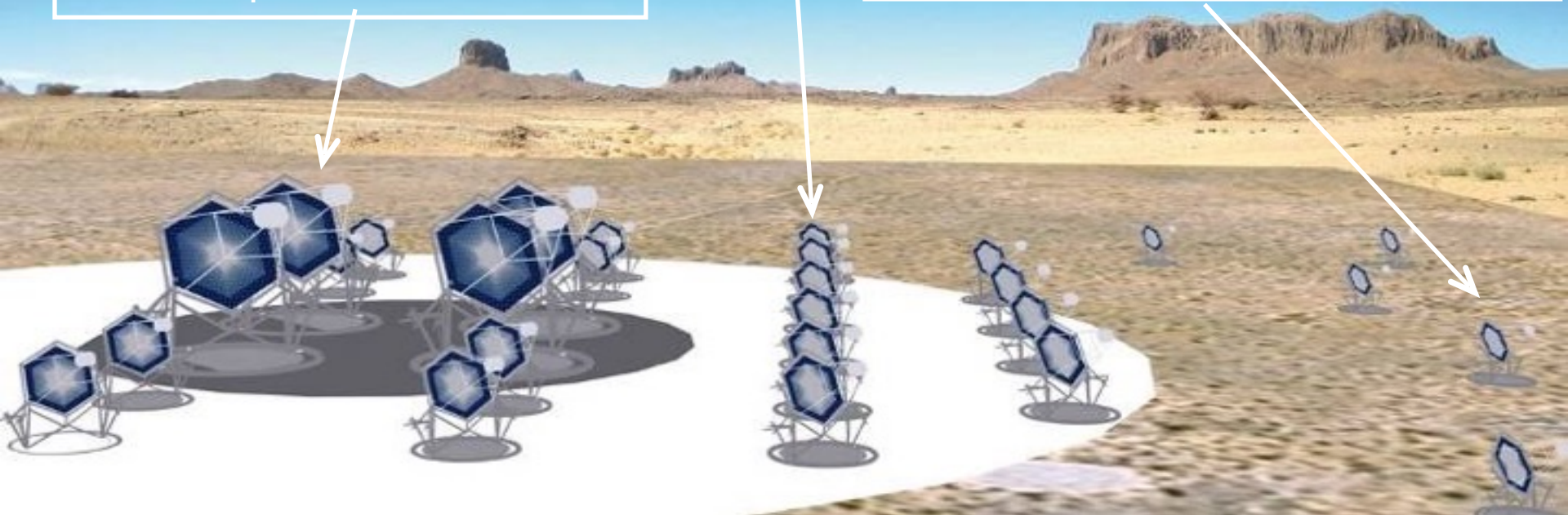


2 apparati: emisferi Nord e Sud
→ Uno sguardo su tutto l'universo

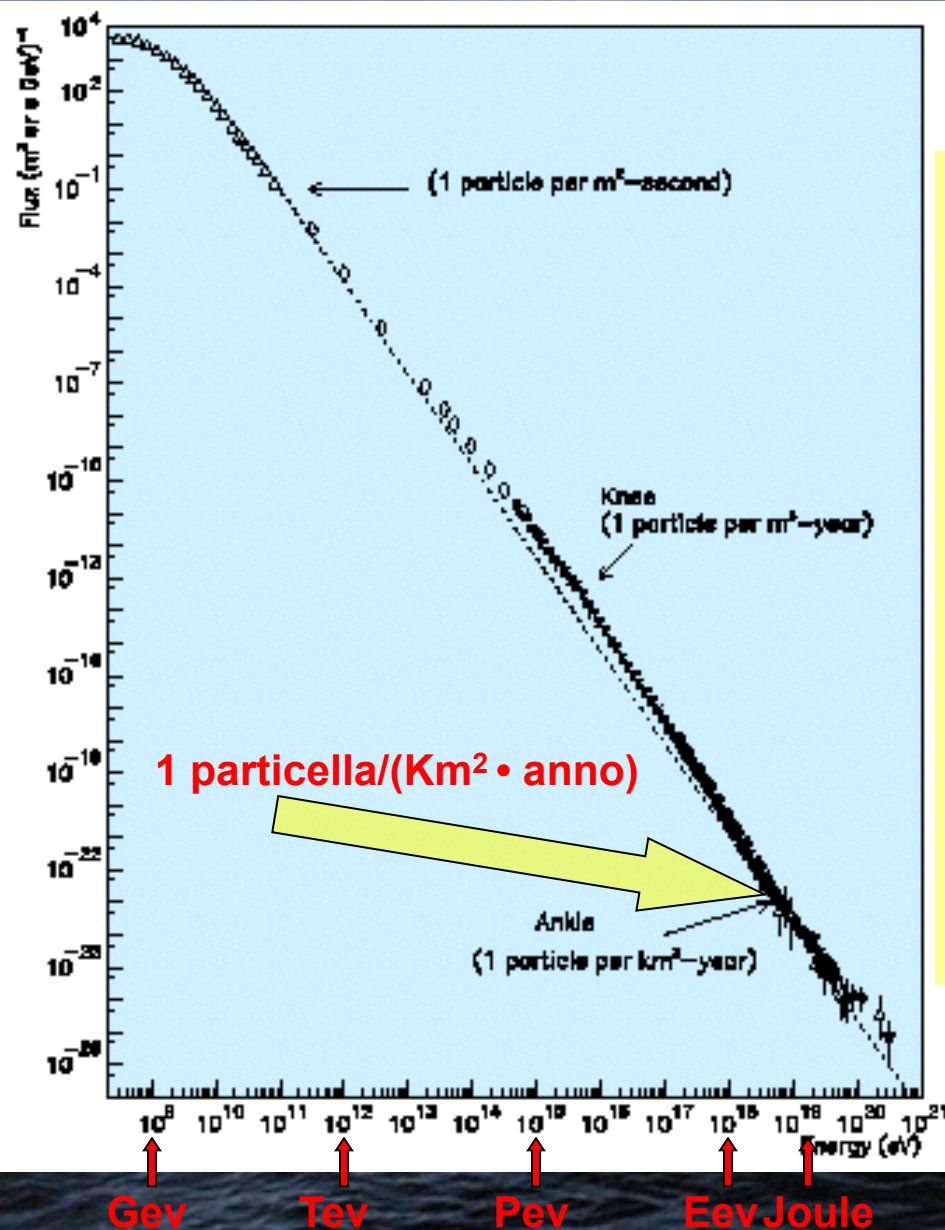
Rivelatore centrale
100 GeV-10 TeV
~ 25 Telescopi, Diametro 12 m

Rivelatore per basse energie
 $E_{\text{thresh}} \sim 10 \text{ GeV}$
4 Telescopi, Diametro ~ 23 m

Rivelatore per alte energie
~35 Telescopi, Diametro = 6-7 m
on 10 km² area



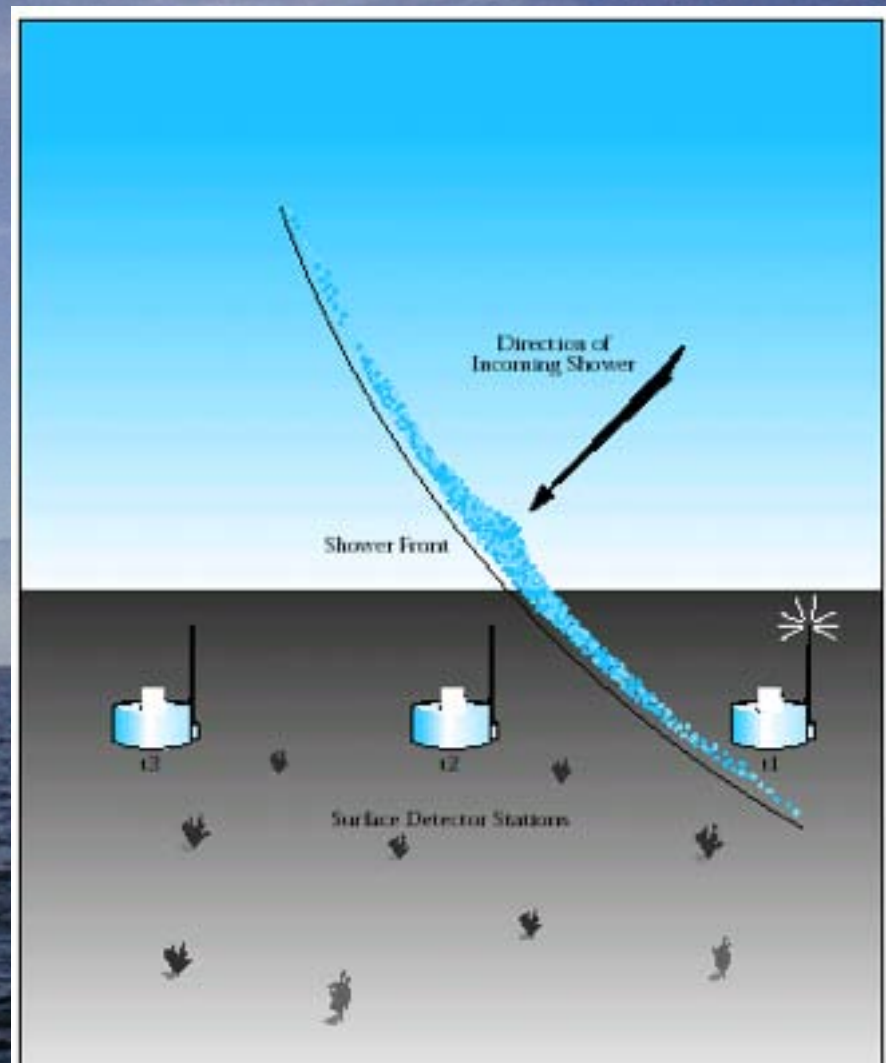
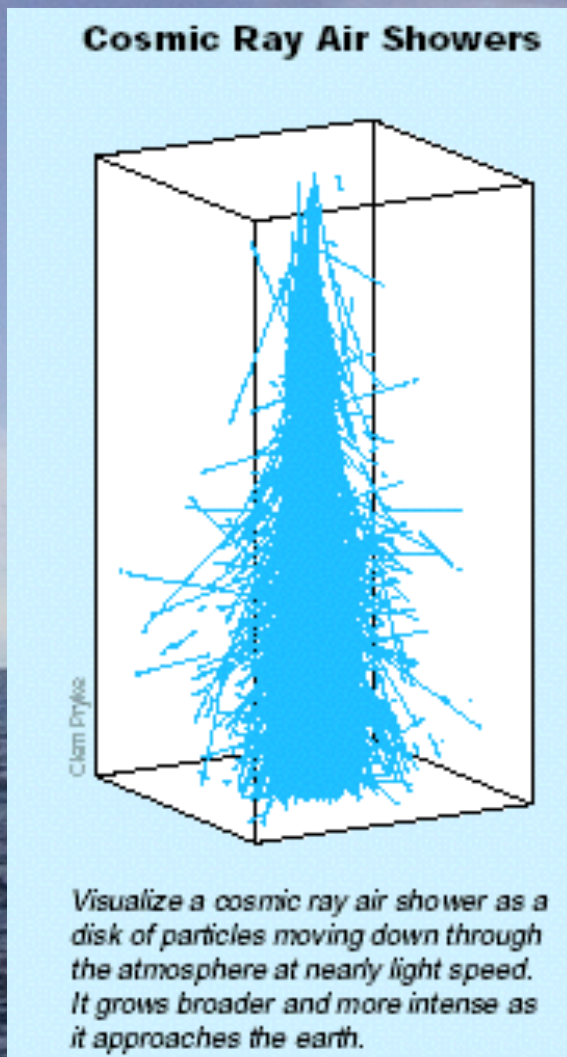
Rivelazione di raggi cosmici di altissima energia ($E > 100\text{TeV}$)



Lo studio di raggi cosmici con $E > 100\text{TeV}$ richiede:

- ⇒ **Apparati con enormi superfici di rivelazione: $10^3\text{-}10^4\text{ km}^2$ (rivelatori “ibridi” coposti con apparati a scintillatore, rivelatori di fluorescenza nell’atm., apparati traccianti, ...)**
- ⇒ **sulla superficie terrestre**
- ⇒ **si studiano i “risultati” delle interazioni dei raggi cosmici primari con l’atmosfera**
- ⇒ **si risale poi a E, direzione, natura dei “primari”**

Rivelatori per sciame estesi nell'atmosfera



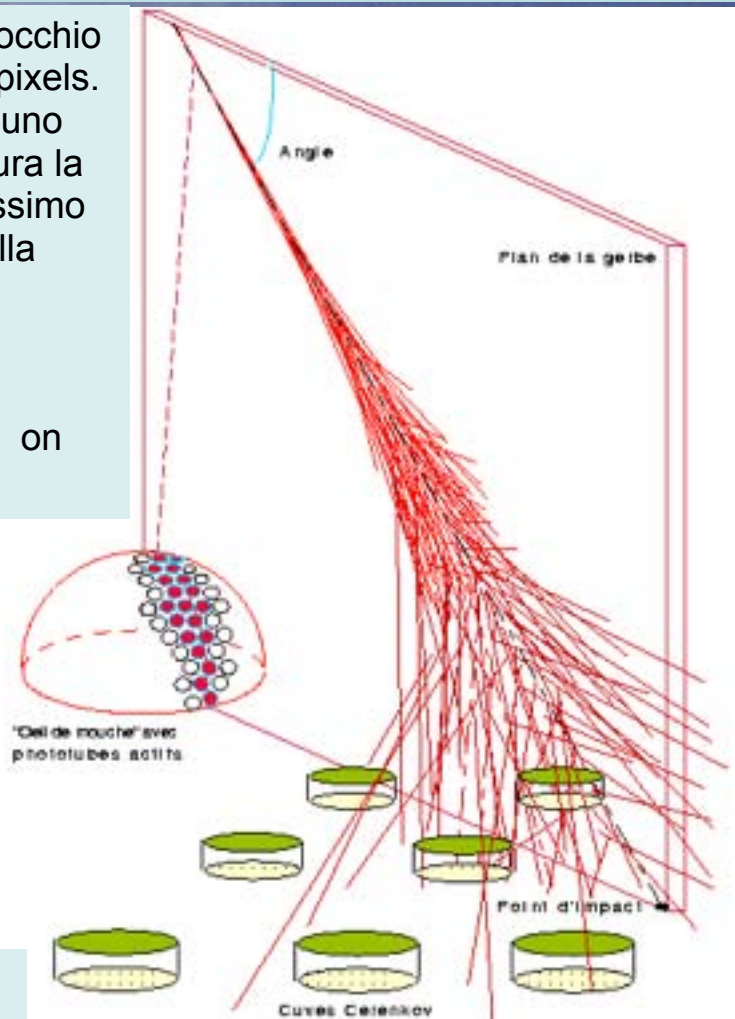
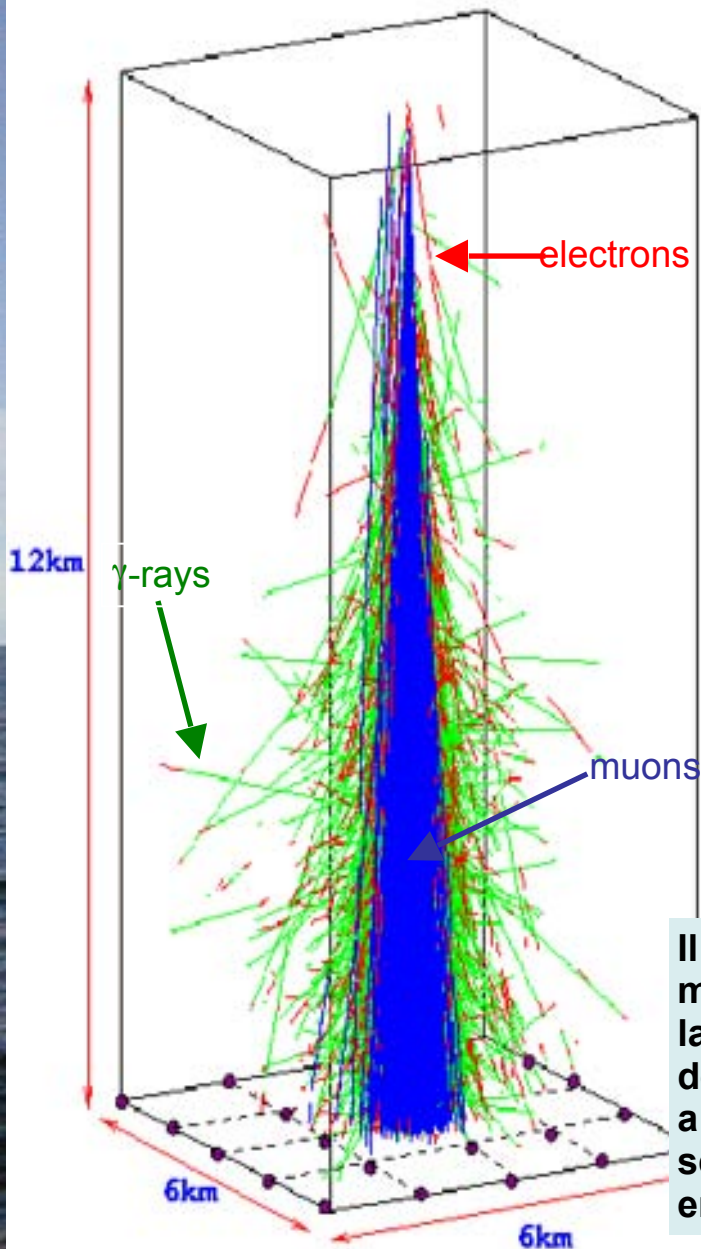
Lo sciame può essere immaginato come un “disco” di particelle che si propaga nell’atmosfera a velocità prossima a quella della luce. Registrando il tempo di arrivo delle particelle su vari rivelatori si può determinare la direzione del R.C. “padre”, dalle “dimensioni” dello sciame si può risalire all’energia e dalla composizione dello sciame alla “natura” (γ , p, He, ...) del R.C. “padre”.

Sciami di Alta energia nell'atmosfera e loro Rivelazione

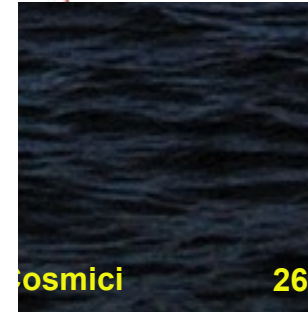
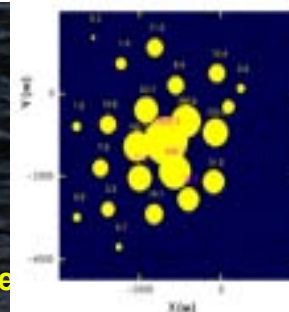
Il rivelatore tipo Fly's Eye (occhio di mosca) è composto da pixels. Ogni pixel riceve la luce in uno stretto angolo solido e misura la luce di fluorescenza. Il massimo dello sciame è funzione della energia del primario E_p .

$$X_{\max} \sim X_0 + X_1 \log E_p$$

dove X_0 dipende dal tipo di ion primario



Il rivelatore di superficie misura la distribuzione laterale delle particelle. La densità di energia misurata a 600m dal centro dello sciame è proporzionale alla energia del primario E_0



L'Osservatorio Pierre Auger in Argentina.



Contour of site (3000 km-sq)
In red: engineering array
Circles: average range of the fluorescence det.
Dots: the 1600 detector stations (tanks)

L'Osservatorio Pierre Auger in Argentina.

THE NEW DETECTORS

Muon detector

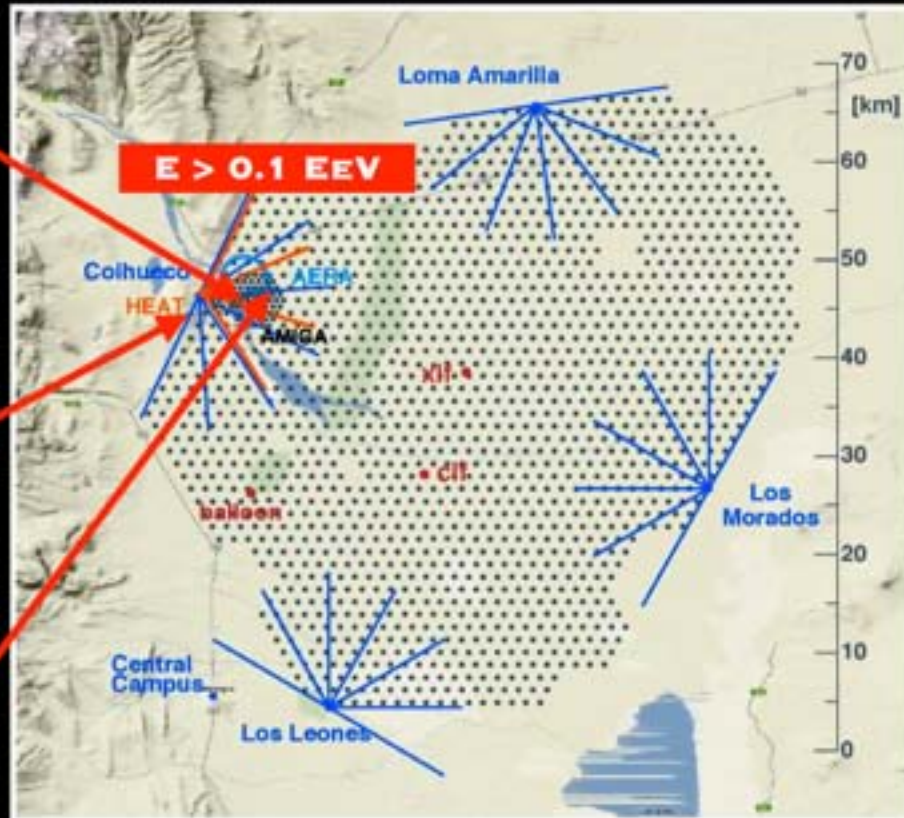


3 HIGH-ELEVATION FD
FOV 30-60°



Radio detector

The Pierre Auger Observatory, Argentina



THE INITIAL DETECTORS



Muon detector



FD detector

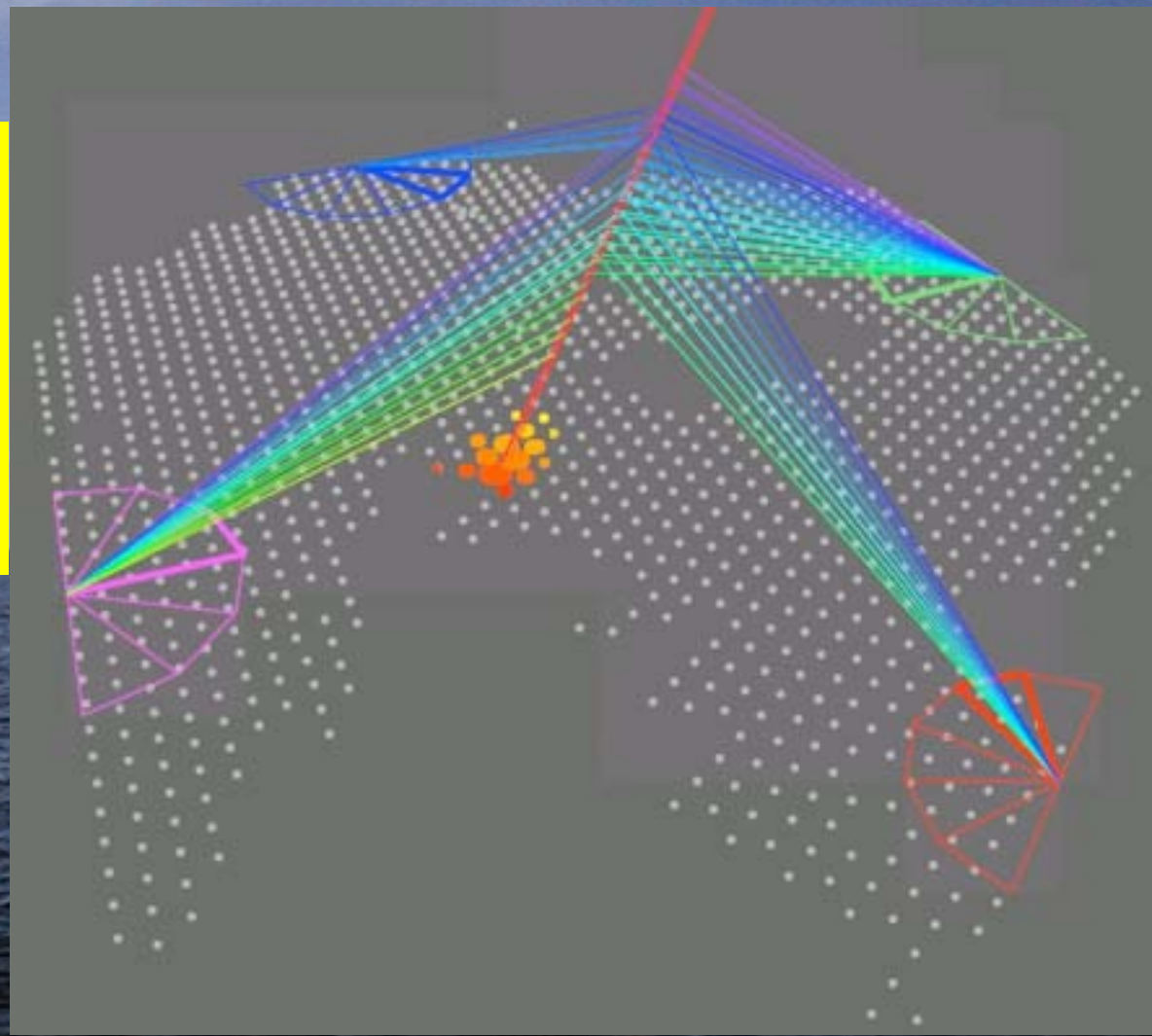


Calibration

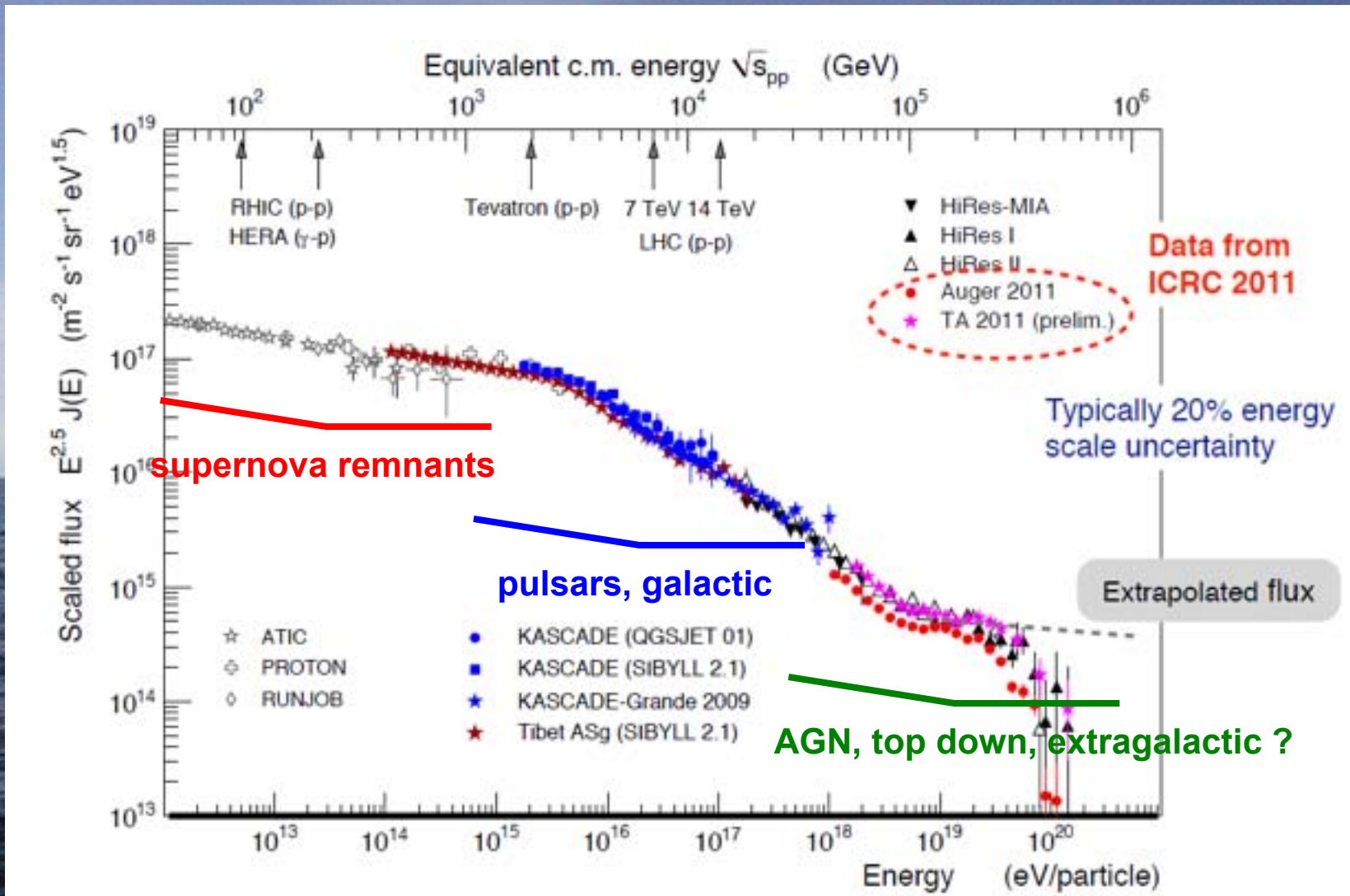
I rivelatori che compongono l'Osservatorio Pierre Auger sono distribuiti su una superficie vasta più di 3000 km². I rivelatori di superficie distano uno dall'altro per 1,5 km. I 4 rivelatori per fluorescenza osservano l'atmosfera sopra il rivelatore.

Un "Golden Event" visto dall'Osservatorio Pierre Auger

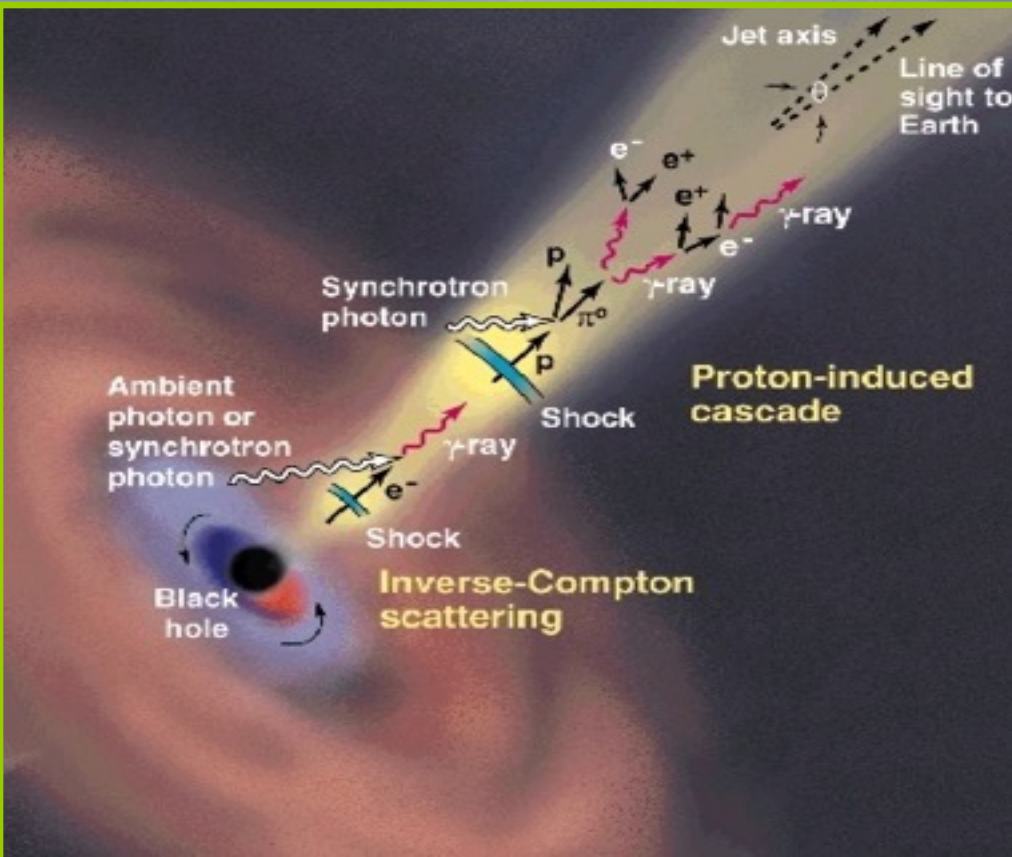
Se lo stesso evento è "visto" dai rivelatori per fluorescenza e termina con lo sciame che investe il rivelatore di superficie si hanno due misure indipendenti dell'energia del primario: intercalibrazione !



Pierre Auger: spettro d'energia dei R.C. primari



Quali processi di accelerazione?, Dove ?



“Acceleratori” di particelle di altissima energia:

Nuclei Galattici Attivi (AGN), Gamma Ray Burst (GRB), Micro Quasars ...



AGN 4261

Sorgenti di particelle di altissima energia che emettono continuamente, molto lontane dalla Terra, al di fuori della nostra Galassia ...

Come osservarle ???

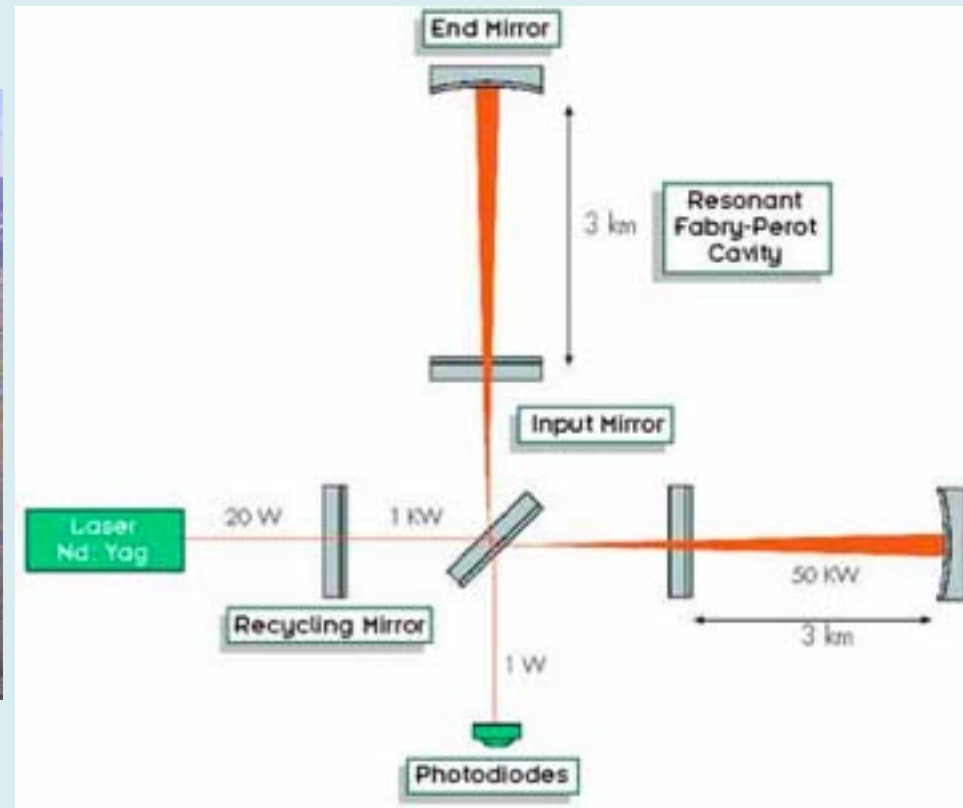
Immagini Hubble Space Telescope

Dal Cosmo ci aspettiamo anche le onde gravitazionali

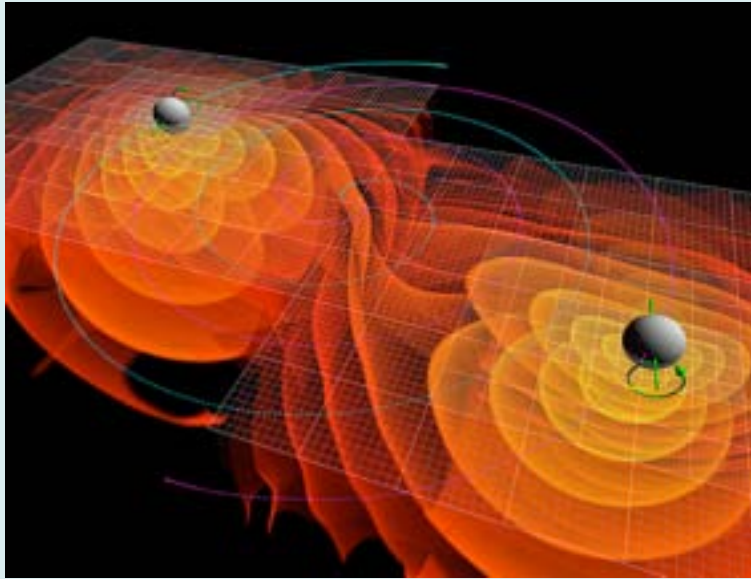
Interferometro di Michelson: due fasci di luce laser, provenienti dai due bracci, vengono ricombinati in opposizione di fase su un rivelatore di luce in maniera che, normalmente, non arrivi luce sul rivelatore. Un'onda gravitazionale varia la lunghezza dei "bracci". La variazione del cammino ottico, causata dalla variazione della distanza tra gli specchi che varia, produce un piccolissimo sfasamento tra i fasci e quindi un'alterazione dell'intensità luminosa osservata, proporzionale all'ampiezza dell'onda gravitazionale.



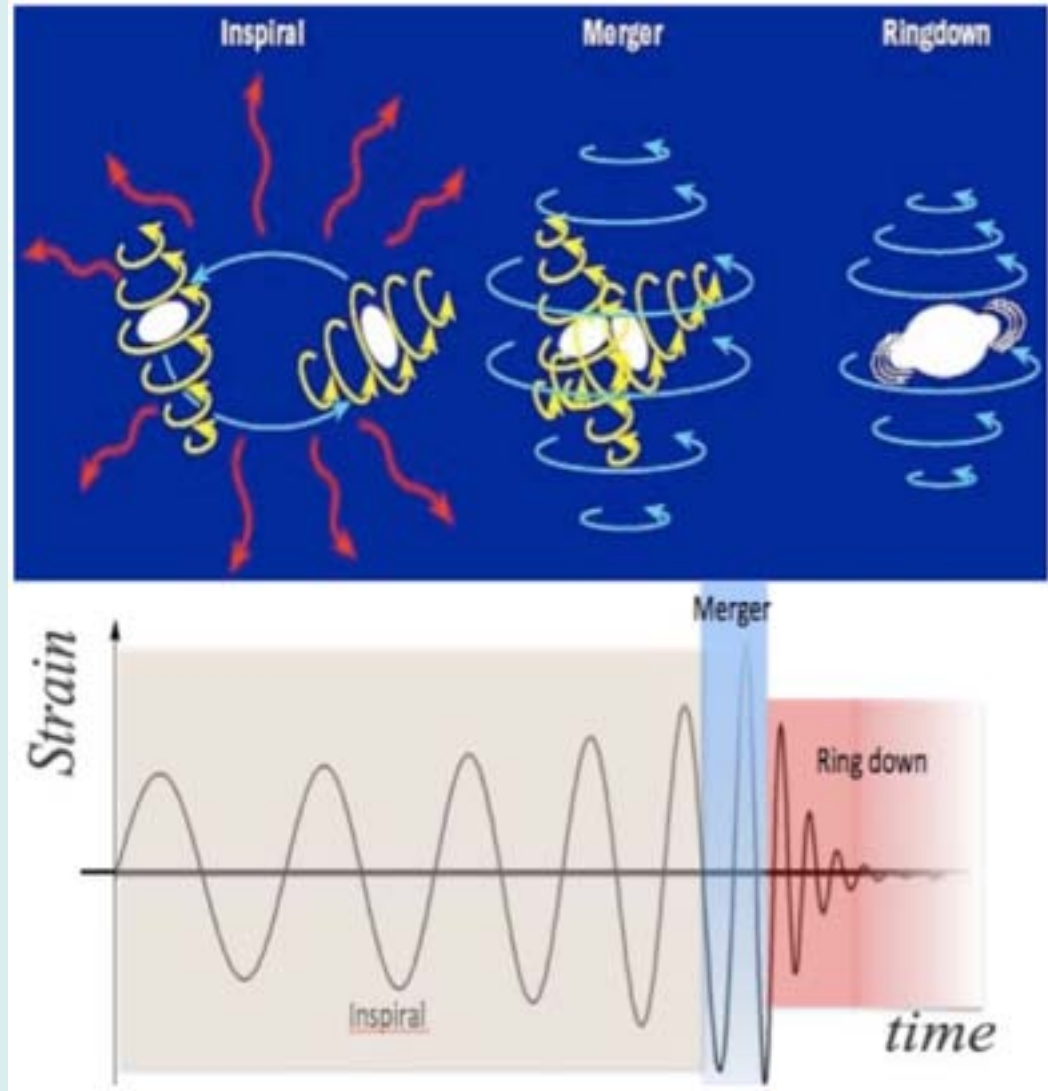
Interferometro Virgo, costruito a Càscina, nei pressi di Pisa.



Febbraio 2016: annunciata l'osservazione di un'onda gravitazionale, GW150914



Avvicinamento, e mescolamento di due "buchi neri": la rivelazione dell'onda gravitazionale così generata ha aperto la strada ad una nuova epoca di osservazioni astronomiche

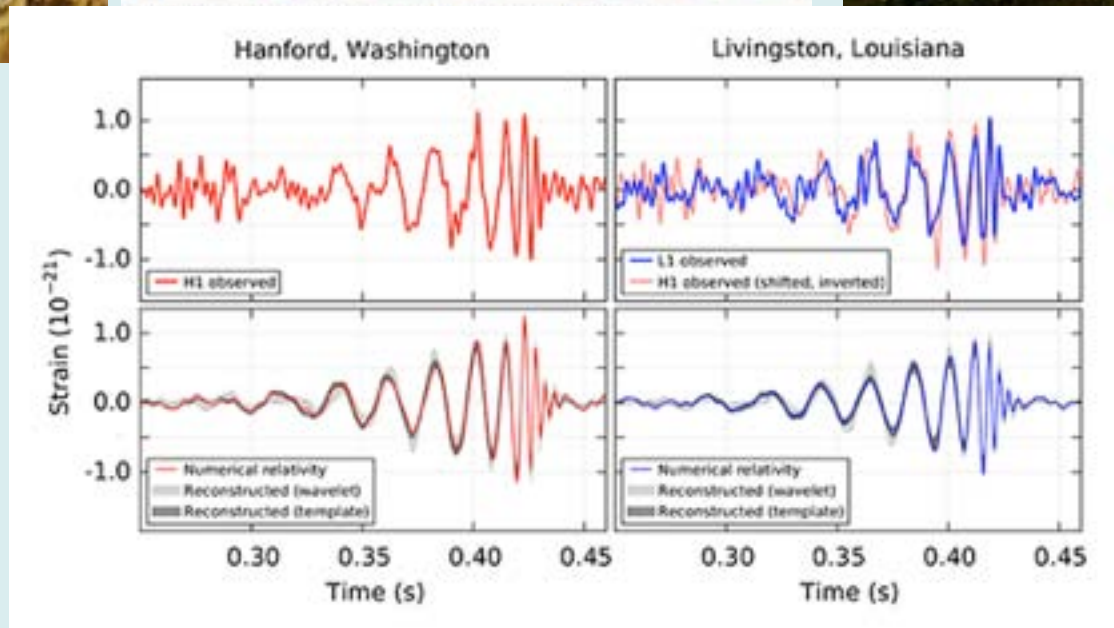


Il primo evento "GW" osservato

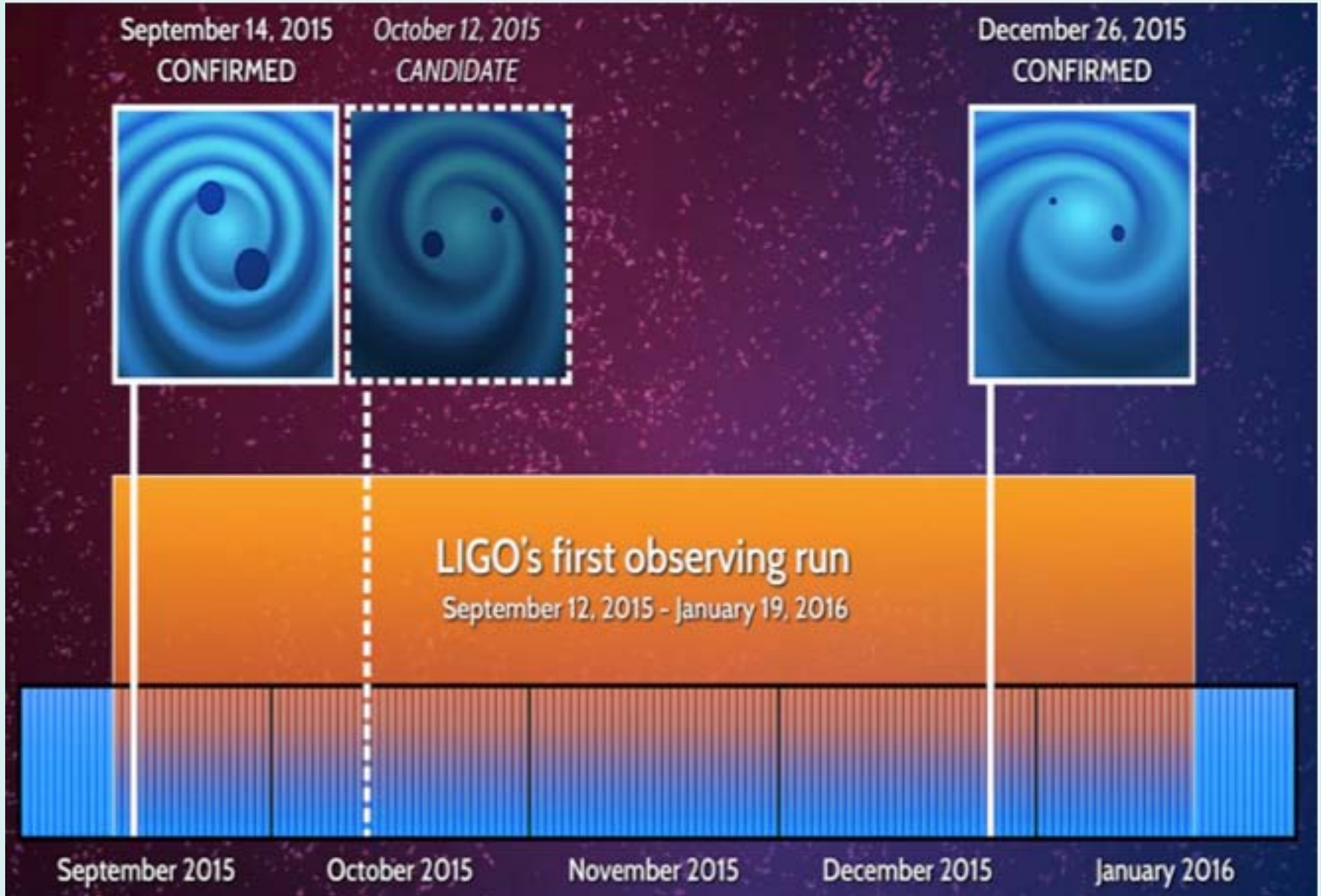
L'apparato LIGO è composto da due interferometri in due distanti località. GW150914 è stata osservata in contemporanea dai due interferometri.



GW150914: il primo evento osservato il 14/09/2015



3 eventi "GW" osservati: grandi aspettative



Importantissima la ricerca "multi - messaggeri"

Alcune potenziali sorgenti astrofisiche dovrebbero originare deboli flussi di neutrini di alta energia. L'approccio Multi - Messaggeri, tramite la coincidente osservazione di altri segnali (fotoni, R.C. carichi, onde gravitazionali, ...) aumenta il **potenziale di scoperta**; aumenta la **significatività** di un segnale visto in coincidenza; aumenta l'efficienza permettendo di rilasciare le condizioni di selezione.



**ANTARES ↔ VIRGO
LIGO**

common working group (GWHEN)
5 Line data
S. Adrián-Martínez et al.,
JCAP 06 (2013) 008

ANTARES ↔ AUGER

Adrian-Martinez et al.,
ApJ 774 (2013) 008



AGN Flares

(ν emission from γ -flaring blazars)

ANTARES ↔ FERMI

S. Adrián-Martínez et al.
Astropart. Phys. 35 (2012) 634

TAToO

(Telescopes – ANTARES
Target of Opportunity)

**Optical follow-up of
neutrino alerts for
transient source
search (GRBs, SNaE).
Analysis in progress!**



**ANTARES ↔ Optical Telescopes
TAROT & ROSTE + more**

Ageron et al., *Astrop.Phys* 35 (2012) 530-536



GCN

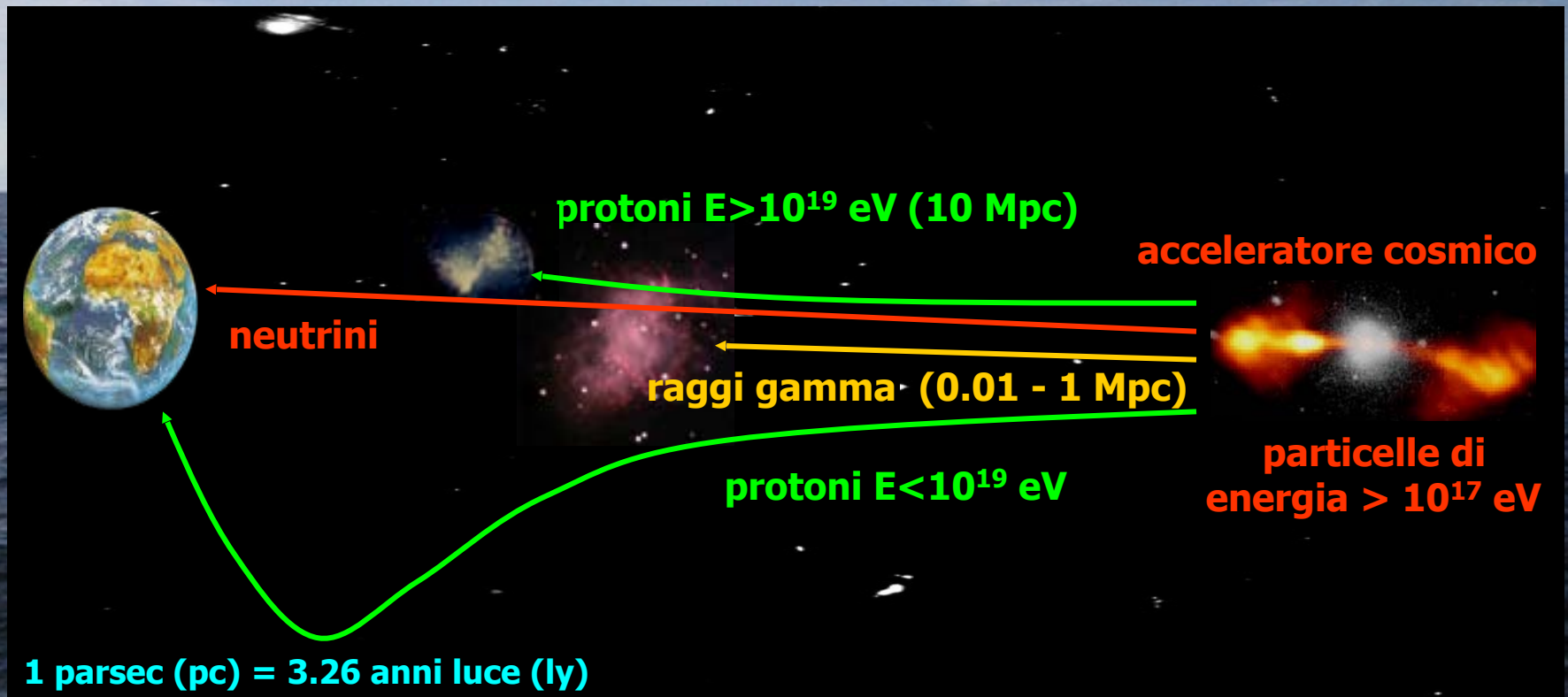
(GRB Coordinat. Network)

ANTARES ↔ GCN

1.S. Adrián-Martínez et al.,
JCAP 1303 (2013) 006

Diverse particelle, diversi orizzonti ...

- p e γ assorbiti o deviati dalla materia e dalla radiazione interstellare
- i neutrini (ν):
 - essendo privi di carica non sono deflessi dai campi magnetici
 - interagiscono debolmente quindi possono attraversare grandi distanze permettendo di osservare l'Universo lontano



Telescopi per neutrini: programma scientifico

- **Astrofisica con ν di alta energia:**

- ν da sorgenti diffuse nell'Universo

- ν da collassi stellari, AGN, GRB,
... sorgenti non altrimenti note

Misura di energia e
flusso dei neutrini

- ν da sorgenti puntiformi
galattiche/extra-galattiche

- Stelle binarie X , Resti di SuperNovae (SNR),
Nuclei di Galassie Attive (AGN), Micro-Quasars,
sorgenti di Gamma Ray Bursts (GRB), SN, ...

Misura di direzione,
energia e flusso di ν

- Importante: osservare l'angolo solido più
vasto includendo il Centro della Galassia

Misura di direzione,
energia e flusso di ν

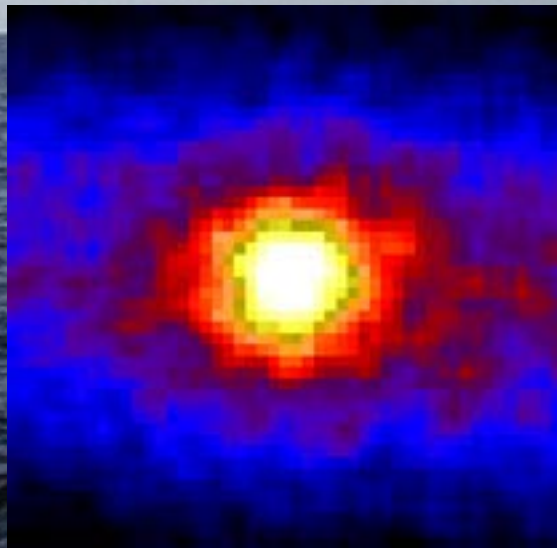
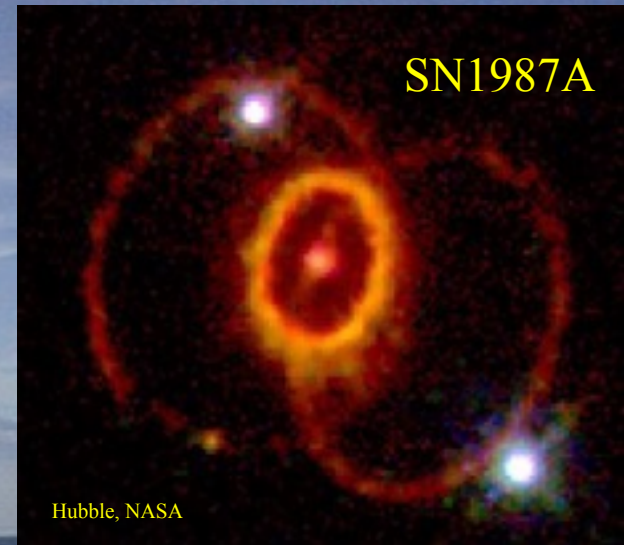
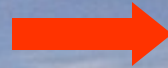
- **Fisica delle alte energie:**

- ricerca indiretta di materia oscura (WIMPs),
di Monopoli magnetici, oscillazioni di neutrino, ...

- **Interdisciplinarietà**

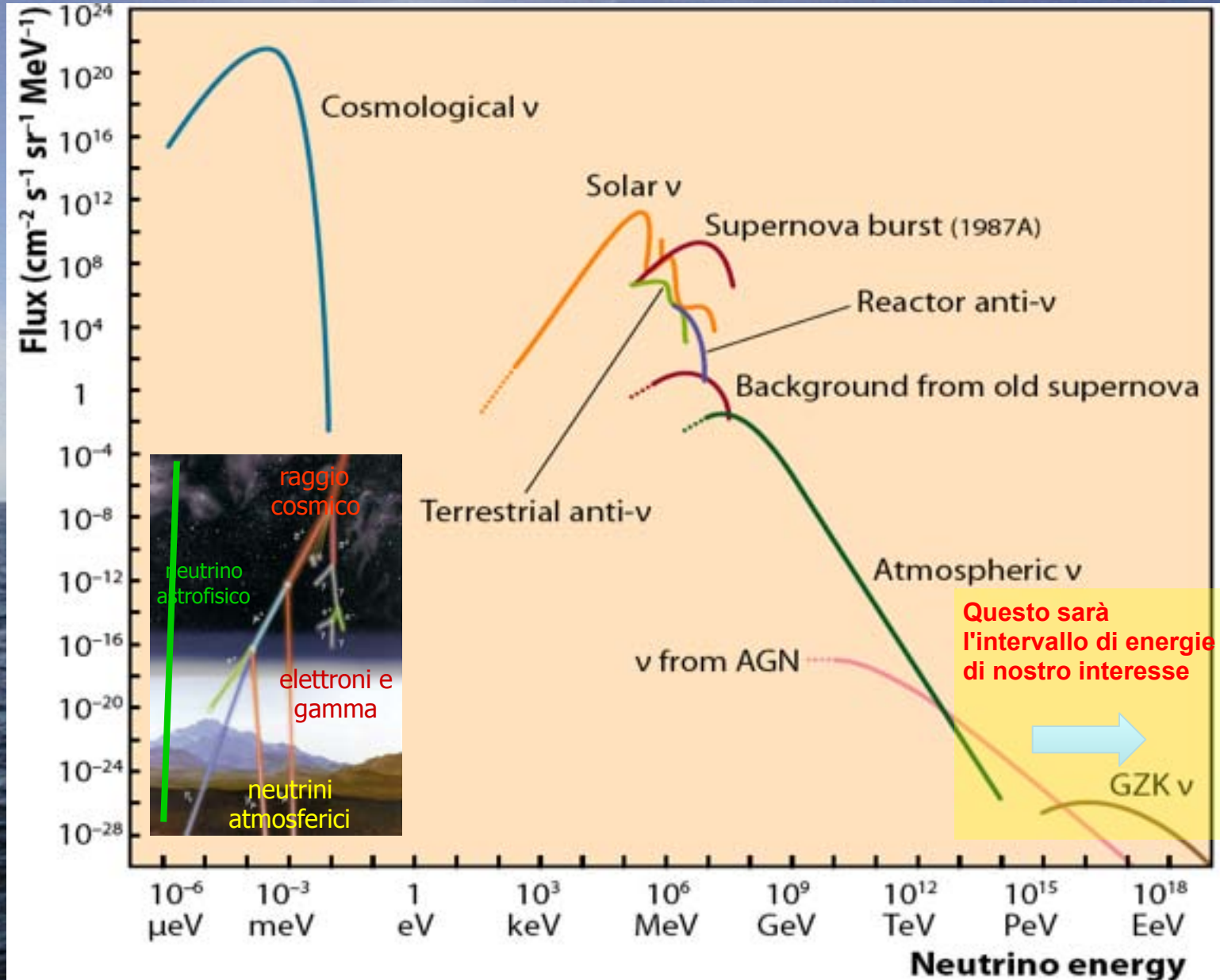
L'astronomia con ν è già cominciata ...

**1987: rivelati ν prodotti
da una SuperNovae**

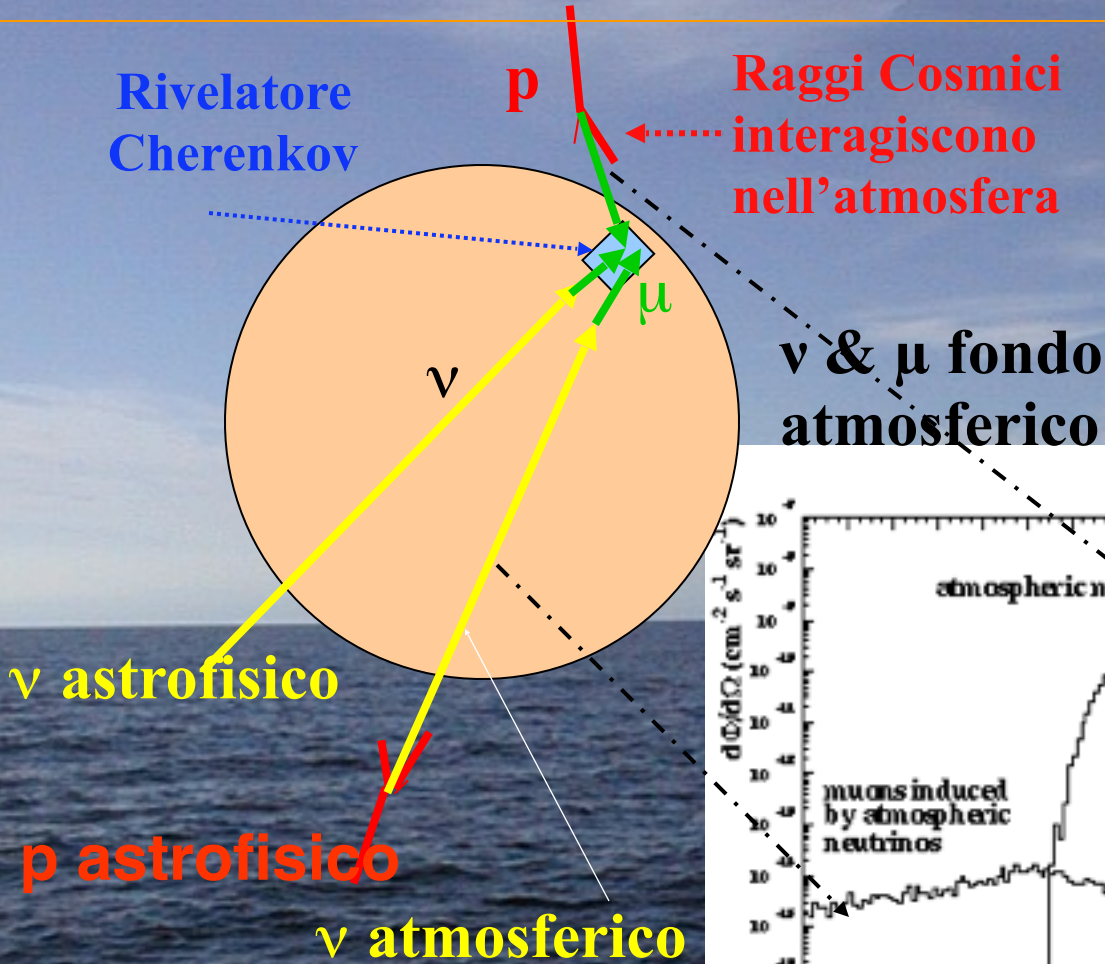


SuperKamiokande:
un rivelatore sotterraneo capace
di rivelare e ricostruire la
direzione d'arrivo dei neutrini
prodotti dal Sole

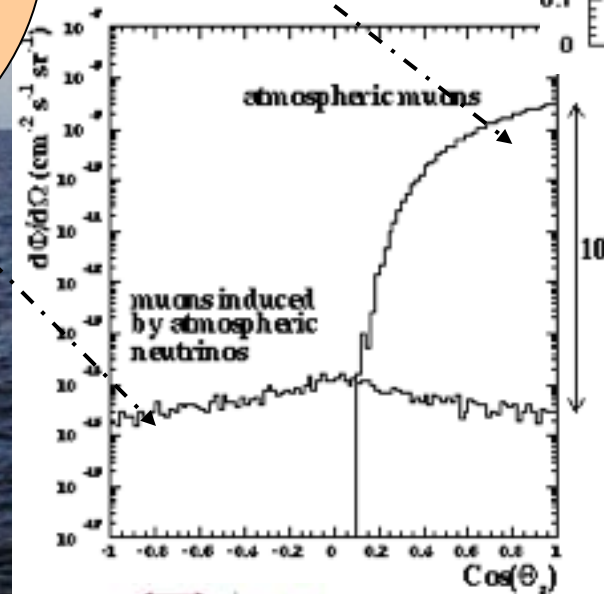
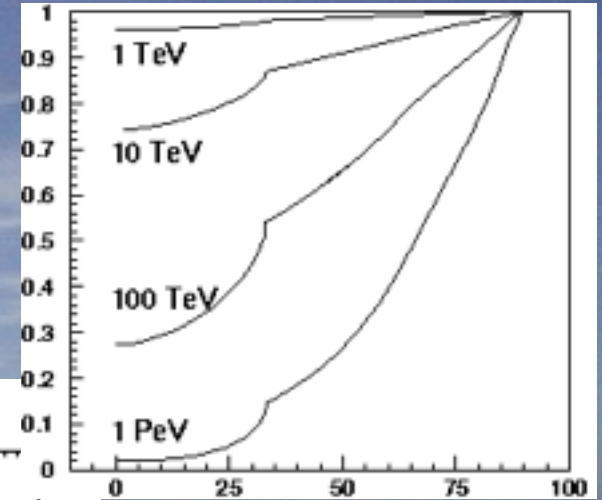
Flussi di neutrini sulla Terra: cosa sappiamo oggi



Necessità di un rivelatore sottomarino



Probabilità di propagazione nella Terra

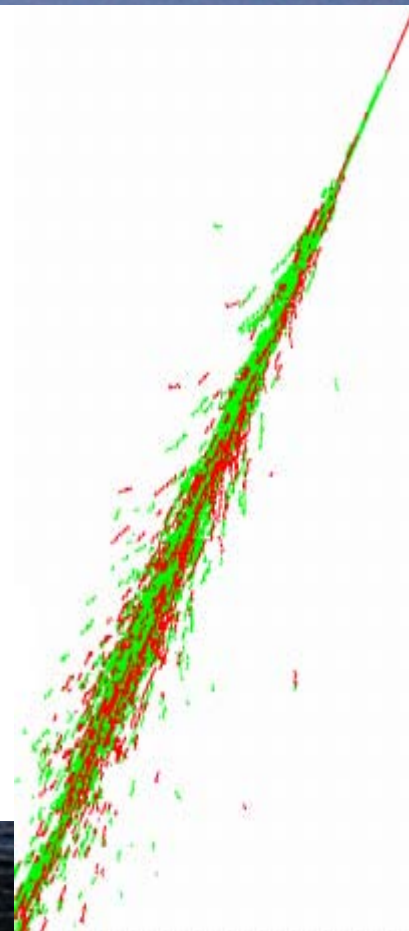
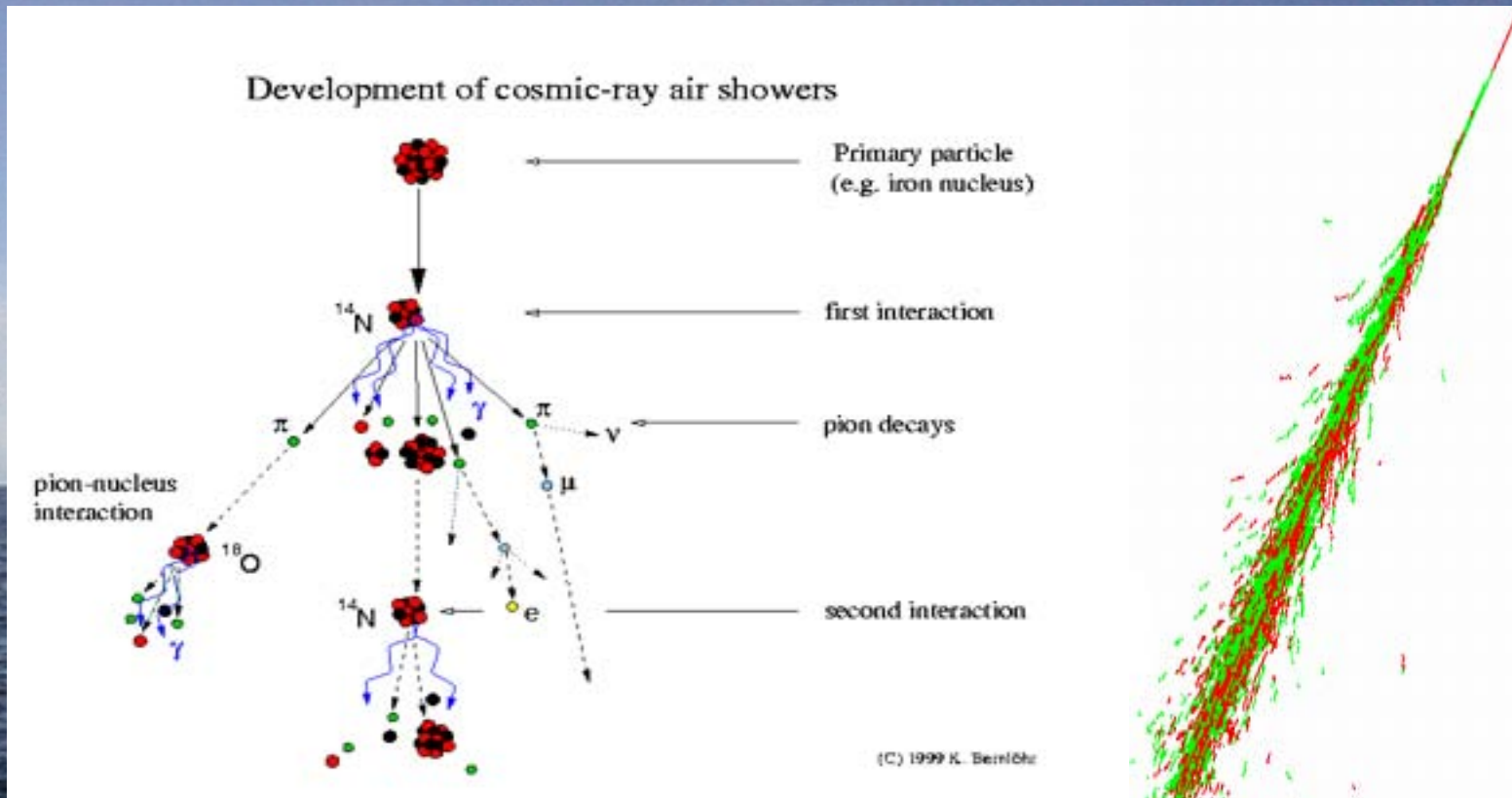


> 1PeV: ν orizzontali o dall'alto

<100 TeV: ν dal basso

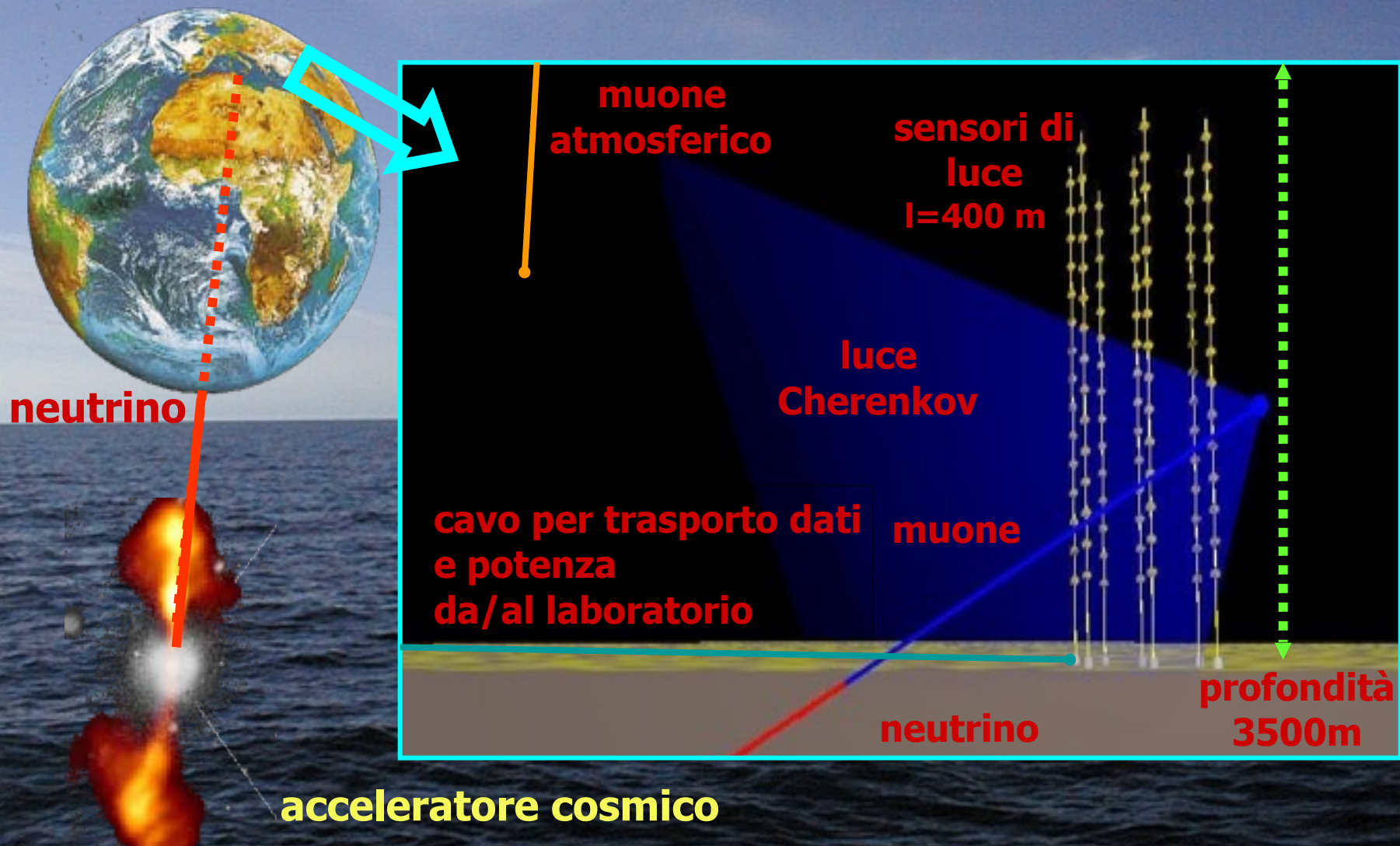


Il fondo: neutrini atmosferici

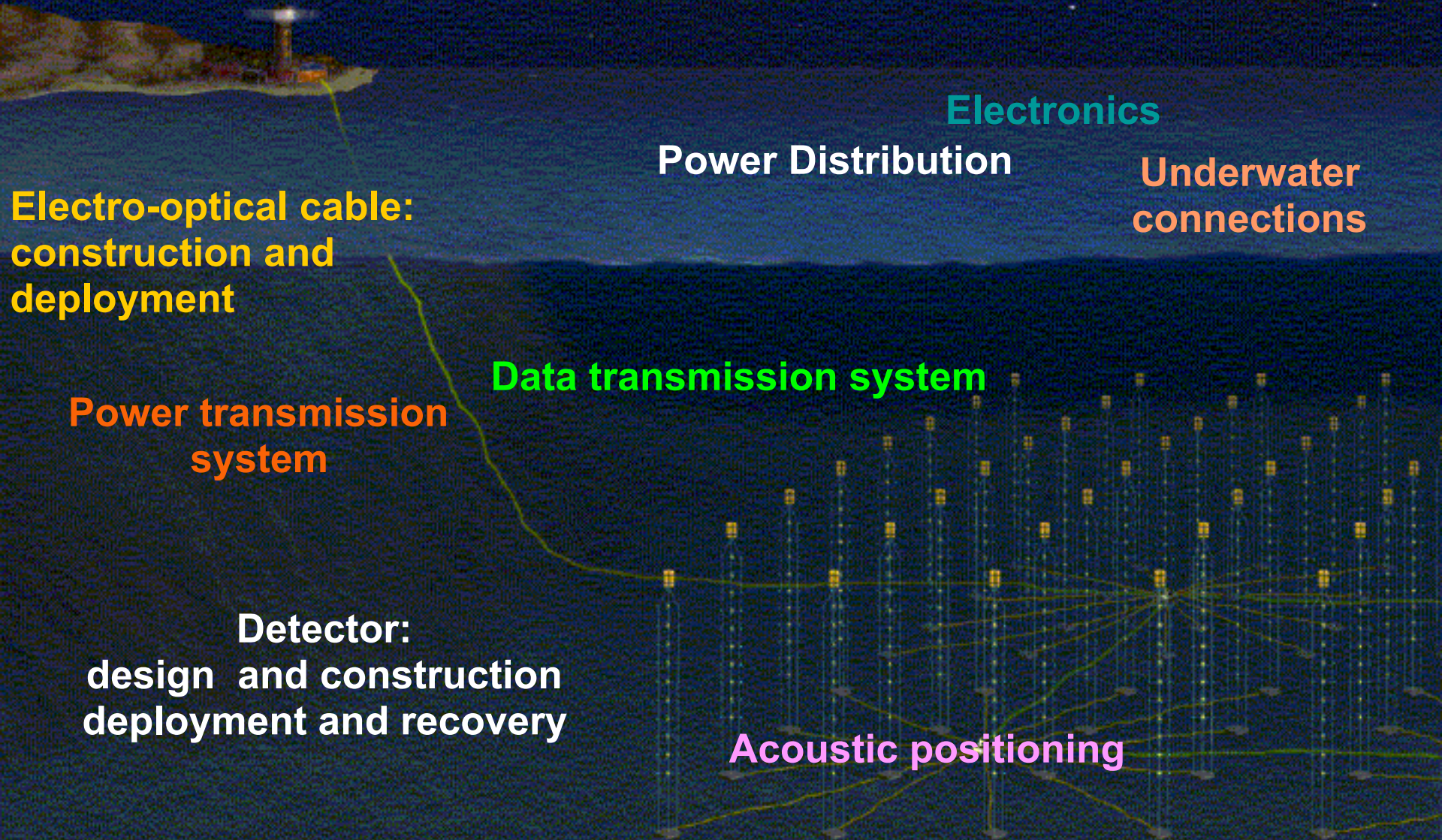


$$\begin{array}{ccccccc}
 \nu_{\mu}/\nu_e/\nu_{\tau} = & \pi \rightarrow \nu_{\mu} \mu \rightarrow \nu_{\mu} \nu_e e & & \pi \rightarrow \nu_{\mu} \mu & & \text{Dir. Prod.} & \\
 & (2/1/0) \quad 1/1/1 & \rightarrow & 1/0.01/0.01 & \rightarrow & 1/1/1 & \\
 & (\text{no-osc}) \quad \text{osc} & \text{GeV} & \text{TeV} & & 10\text{-}100 \text{ TeV} &
 \end{array}$$

Un rivelatore Cerenkov sottomarino



Un Telescopio Cherenkov sottomarino con dimensioni $\sim \text{km}^3$ nel Mediterraneo



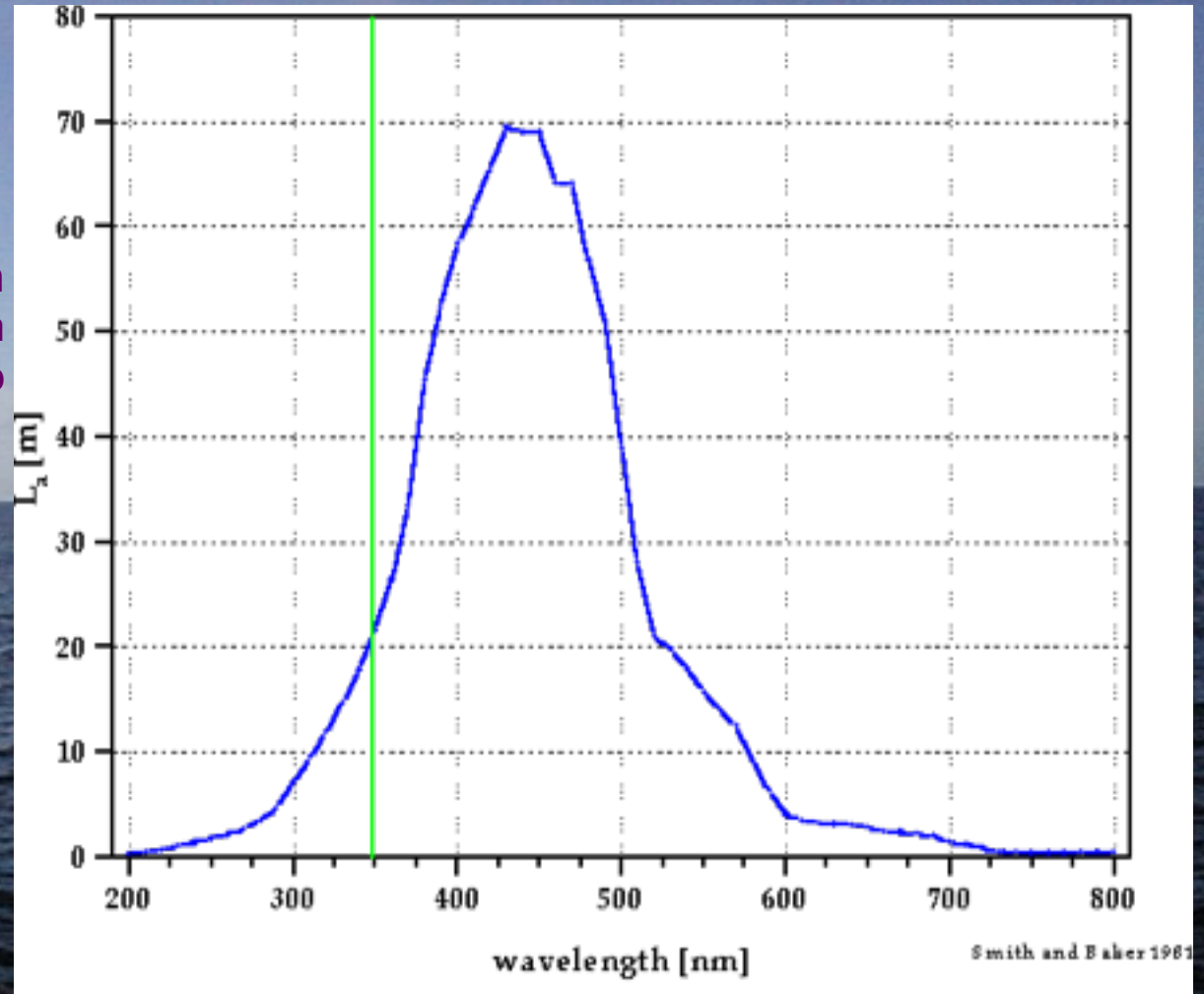
Propagazione della luce in acqua

$$I(x) = I_0 e^{-ax}$$

$$L_a = 1/a$$

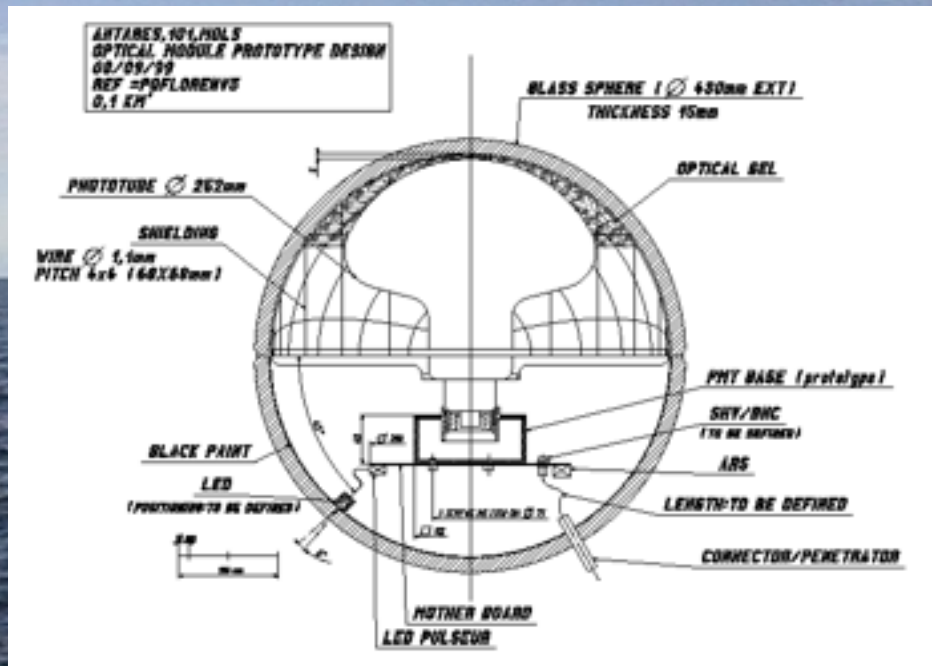
L'assorbimento della luce in acqua è minore nella regione dello spettro "visibile" (blu-verde)

glass cutoff $\sim 350\text{nm}$

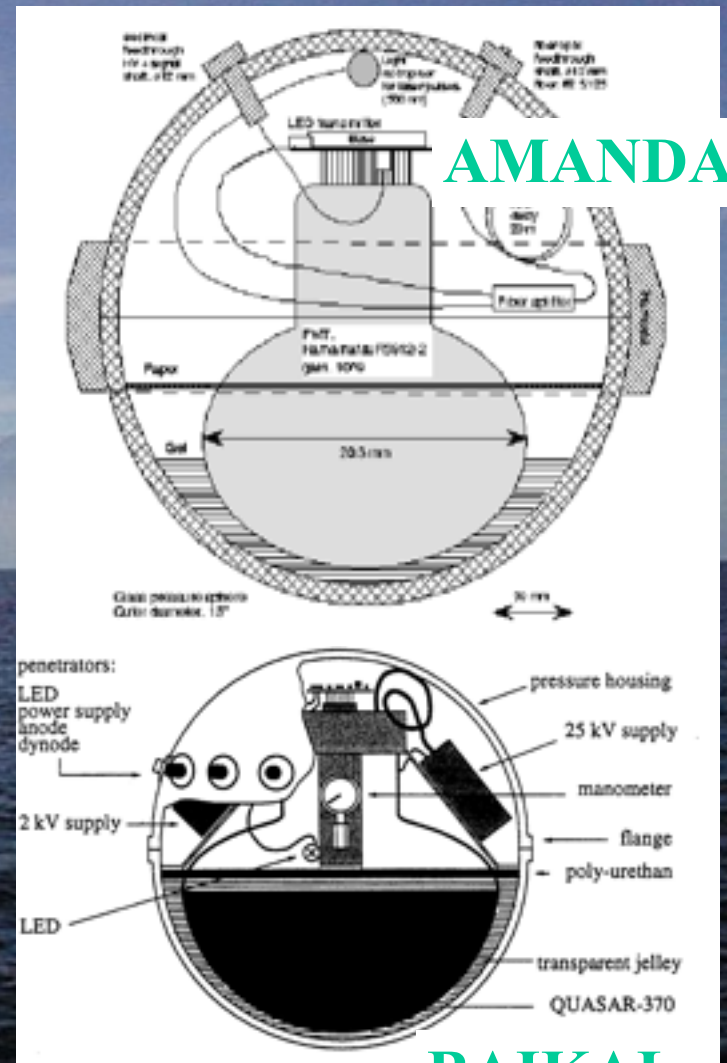


Moduli ottici per telescopi di ν sottomarini

Fotomoltiplicatori da 8÷15" in sfere di vetro, diametro 13-17" resistenti alla pressione (300-400 atm)



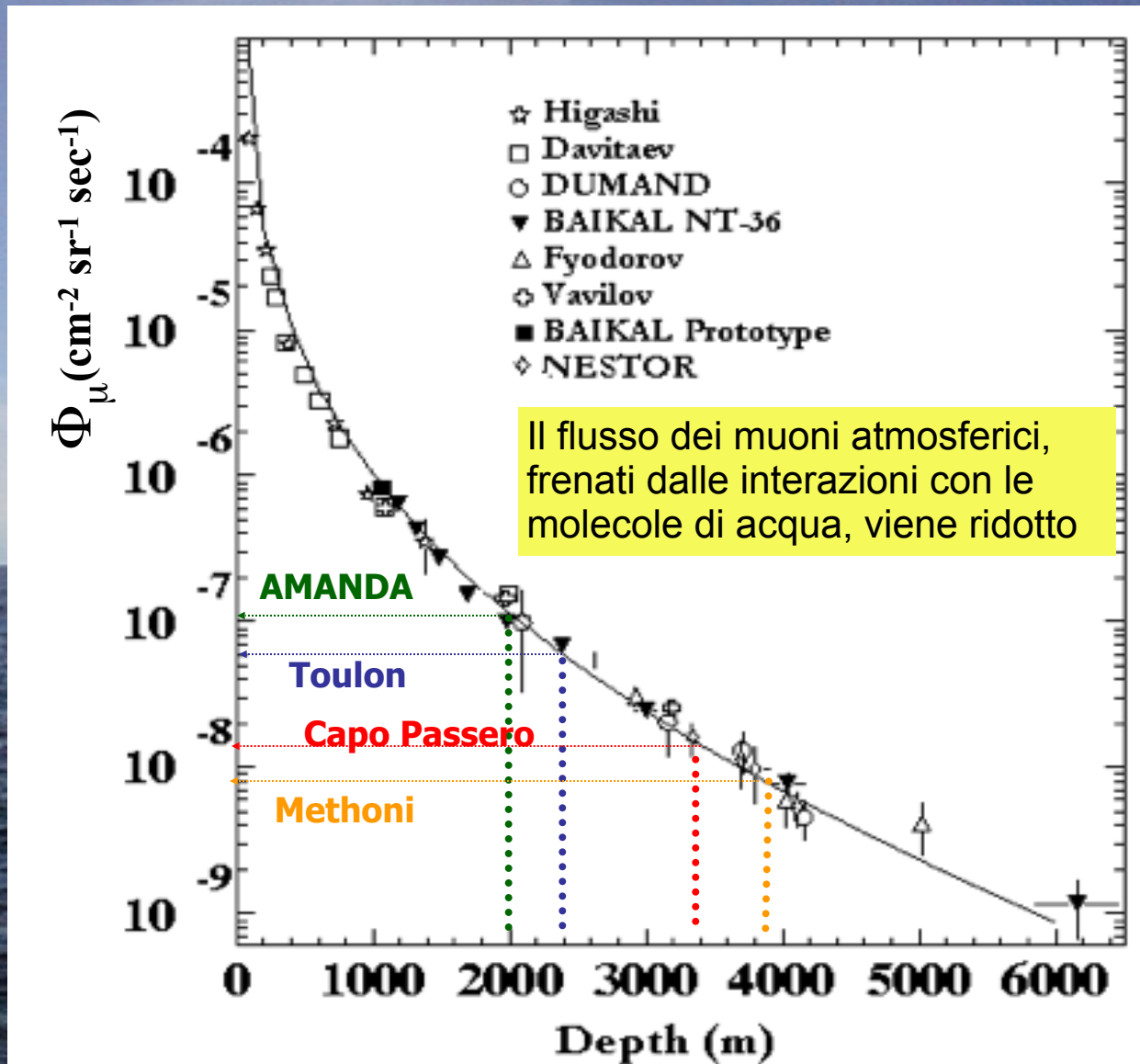
ANTARES



Quali caratteristiche deve avere il sito abissale ?

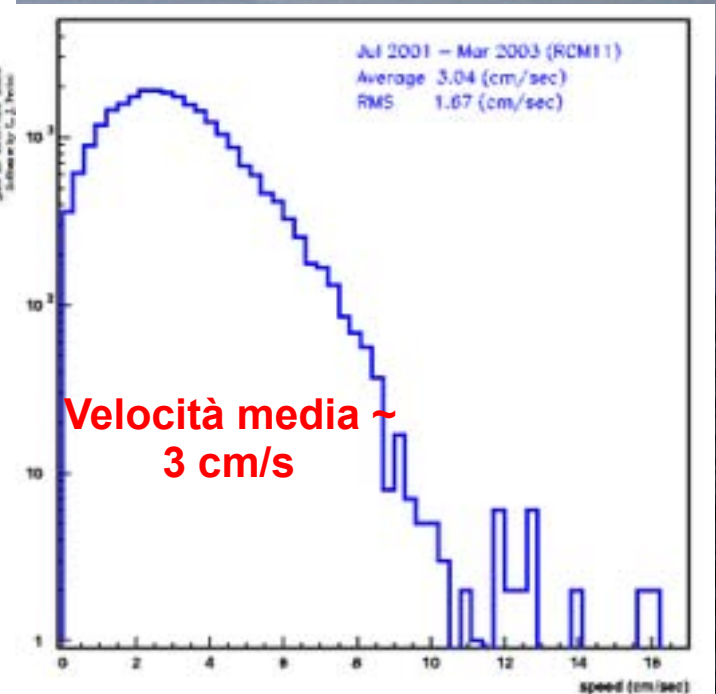
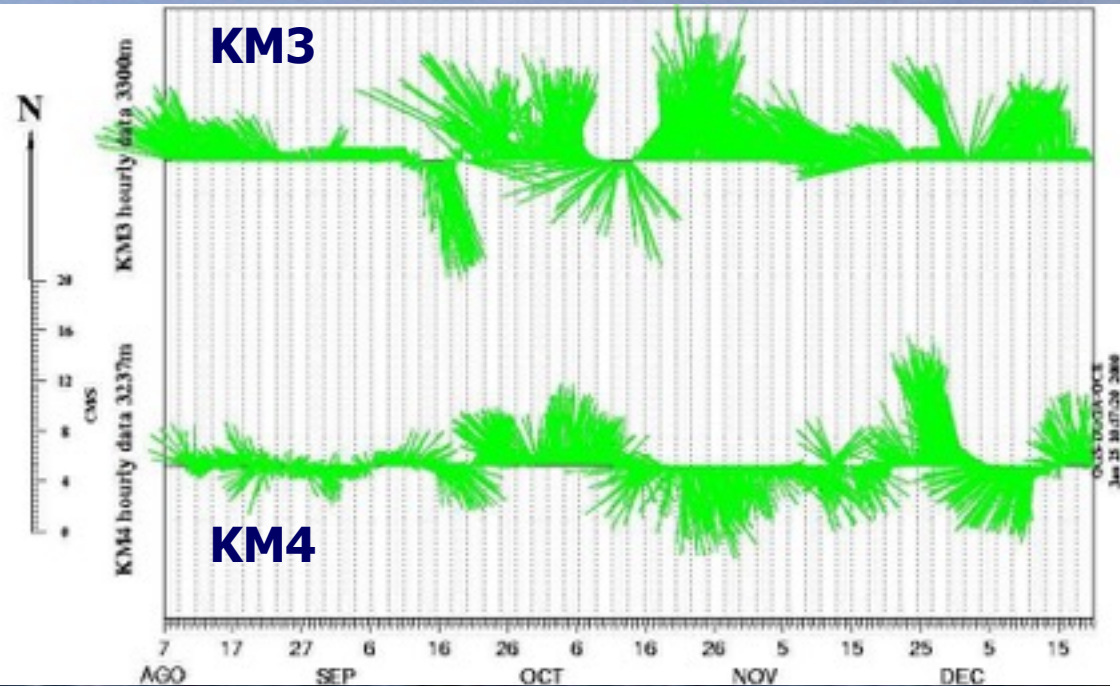
- Vicinano alla costa (<100 km).
- Non attivo sismicamente
- Profondità oltre i 3000 metri.
 - la massa d'acqua sovrastante il rivelatore riduce il fondo dei muoni atmosferici
- Bassa intensità delle correnti sottomarine (<10 cm/sec).
 - limitare lo spostamento dell'apparato sottomarino
- Ottime qualità di trasmissione della luce (>50 m).
 - ottimizzare il trasporto della luce Cherenkov da rivelare
- Bassa attività biologica.
 - ridurre la "bioluminescenza"
- Fondale adeguato all'ancoraggio di strutture (semi)rigide.

Capo Passero Site: depth 3350m



Misura della velocità della corrente sotto-marina a ~3500m di profondità nel sito di Capo Passero

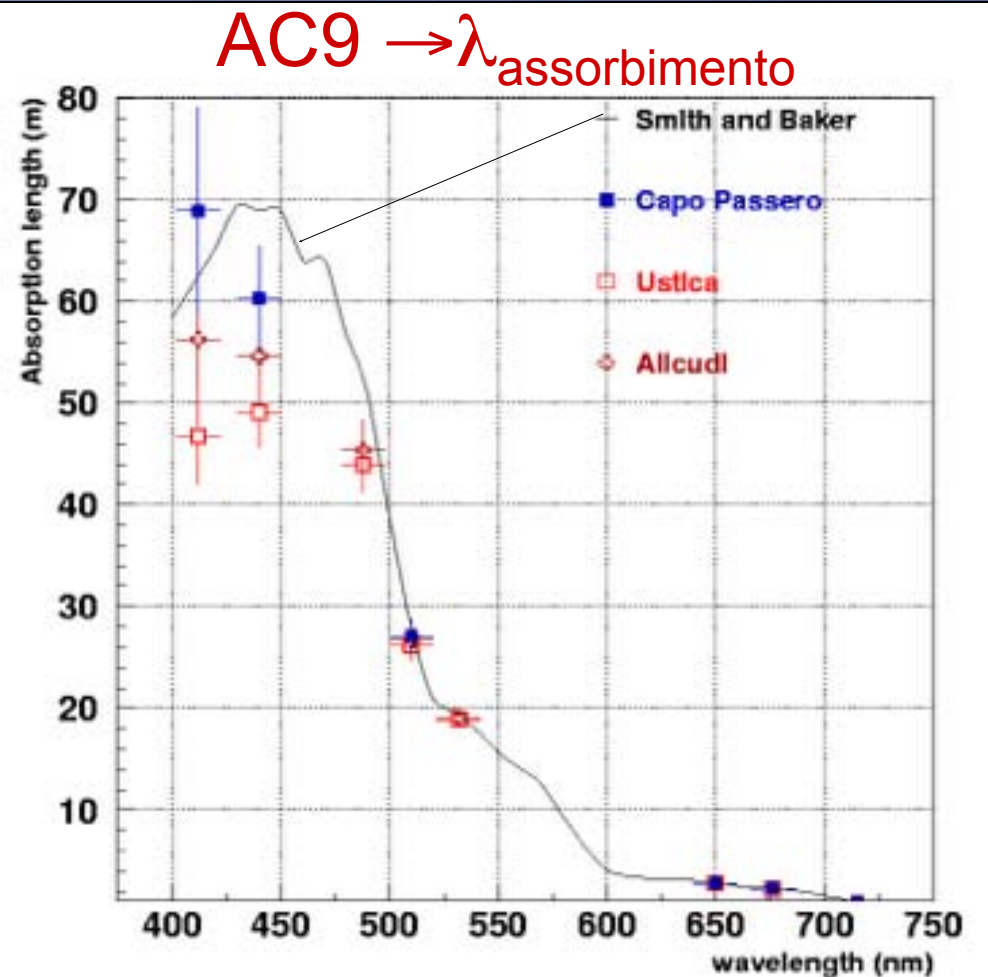
Enormi masse d'acqua (~10-100 km) si spostano/ruotano lentissimamente



Capo Passero Current Intensity
@3300 m depth

Proprietà ottiche dell'acqua marina abissale

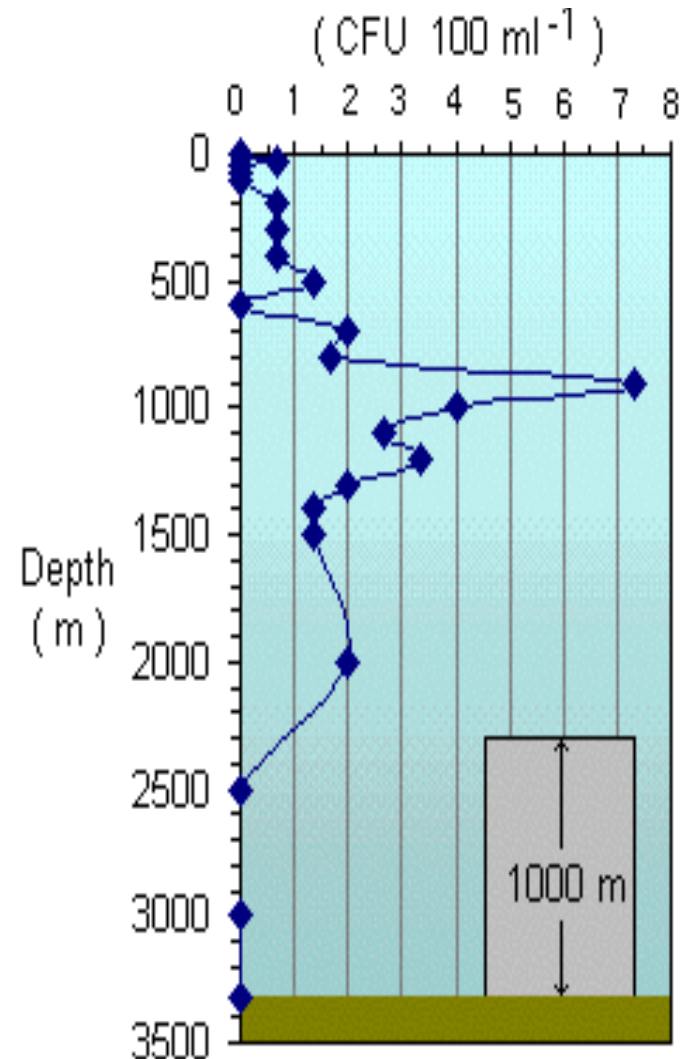
- $\lambda_{\text{assorbimento}}$, $\lambda_{\text{attenuazione}}$ per 9 lunghezze d'onda
- Misure delle proprietà ottiche e di Salinità, Temperatura, Profondità



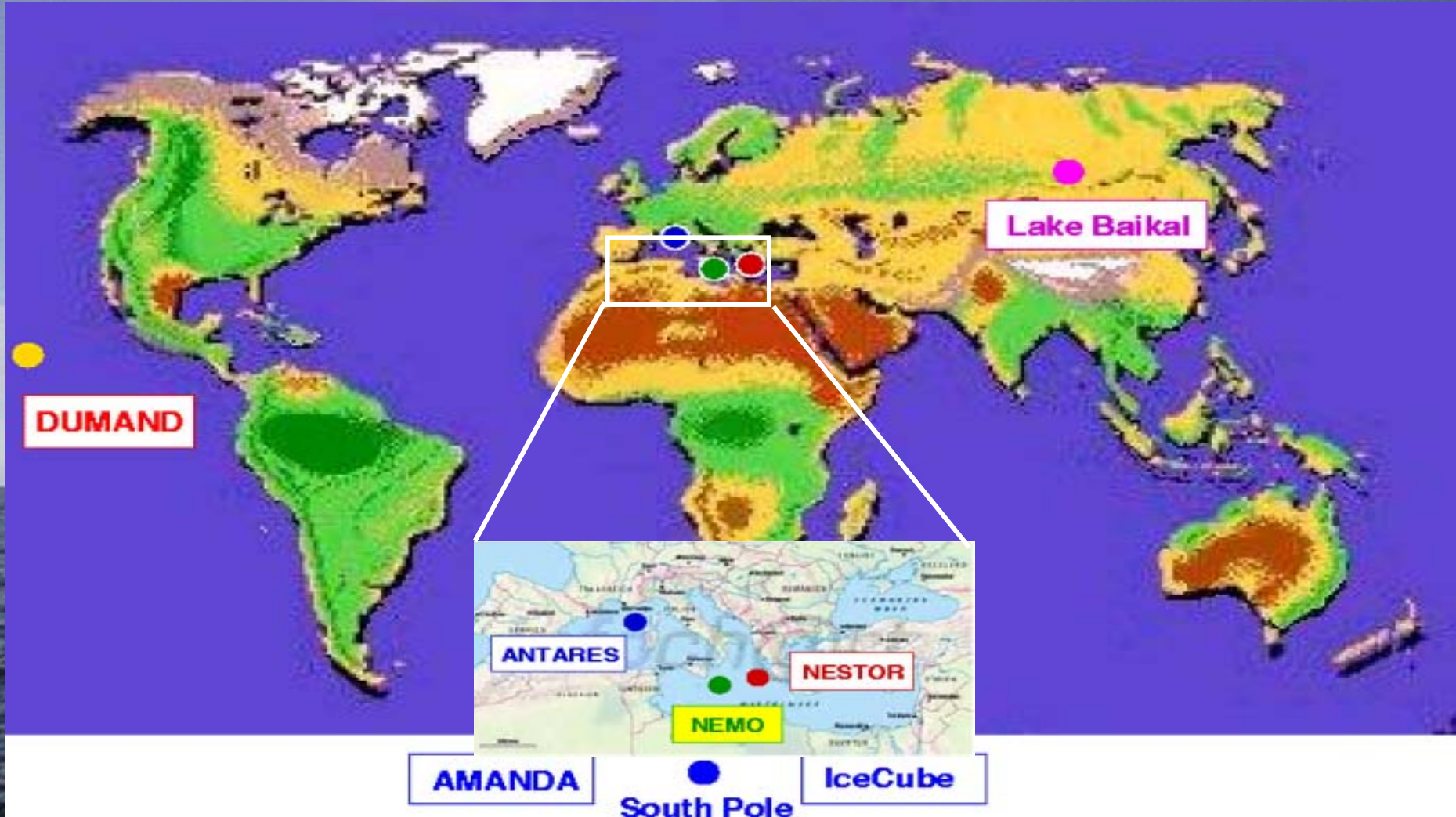
Rumore ottico negli abissi marini: bioluminescenza e ^{40}K



No luminescent bacteria have been observed in Capo Passero below 2500 m



Mappa mondiale dei Telescopi per Neutrini

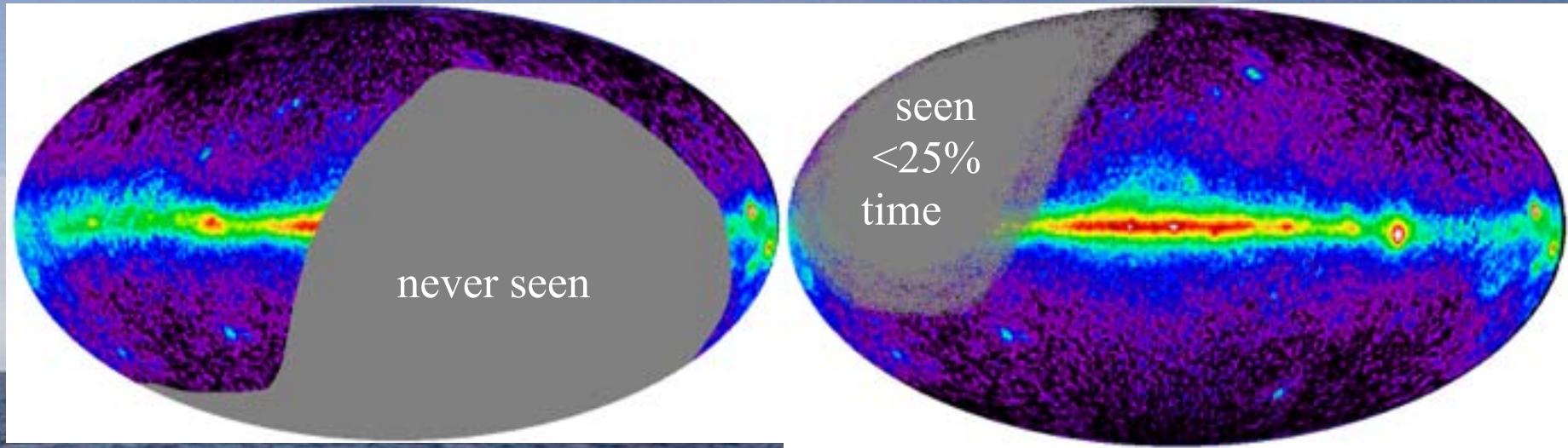


ANTARES + NEMO + NESTOR hanno unito gli sforzi per costruire un Telescopio Cherenkov sottomarino da $\sim 1 \text{ km}^3$ nel Mediterraneo \rightarrow la Collaborazione KM3NeT

Quanti Telescopi per neutrini ??

Sarà importante "osservare" l'Universo in tutto l'angolo solido

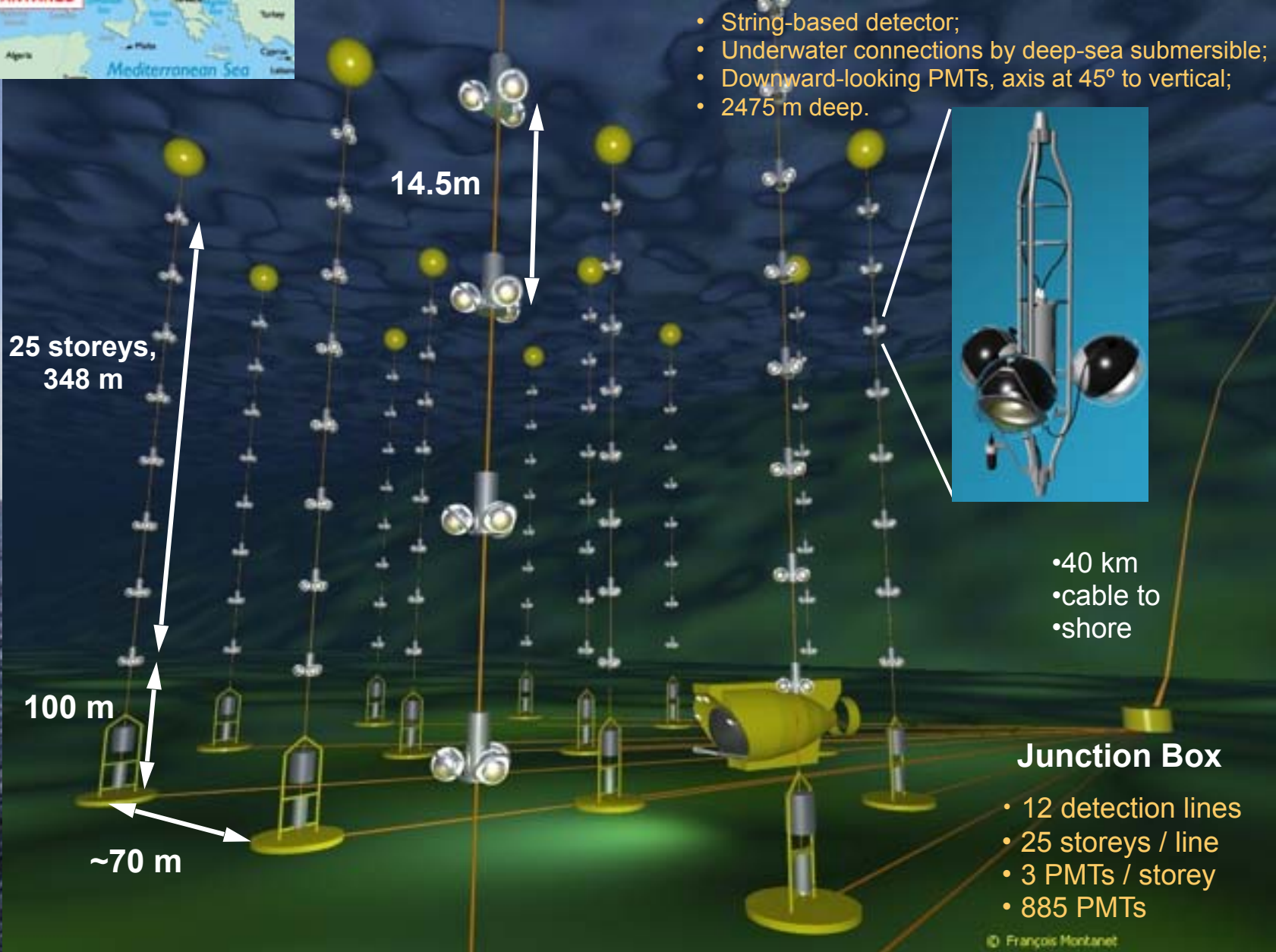
Gamma ray flux >100 MeV observed by EGRET



AMANDA, ICECUBE

ANTARES, Baikal, KM3NeT

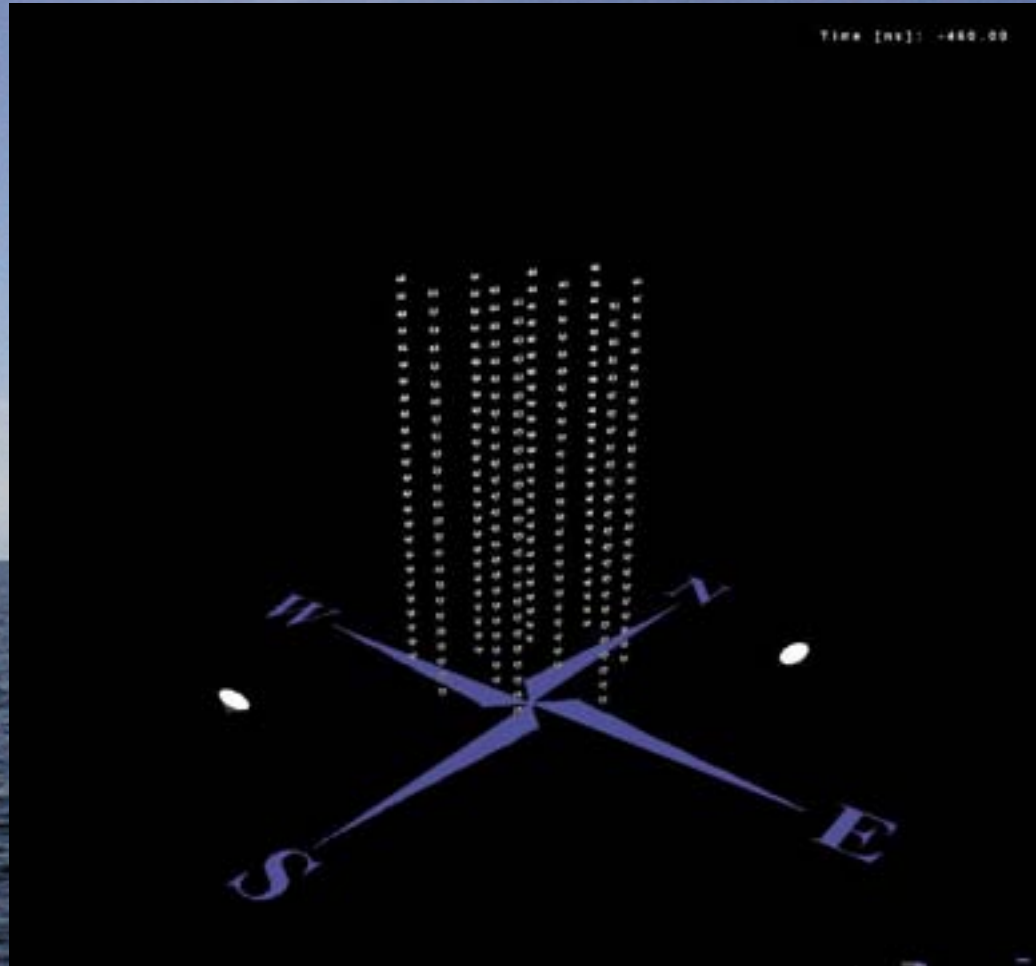
L'esperimento ANTARES



ANTARES: traccia "dall'alto": un muone atmosferico

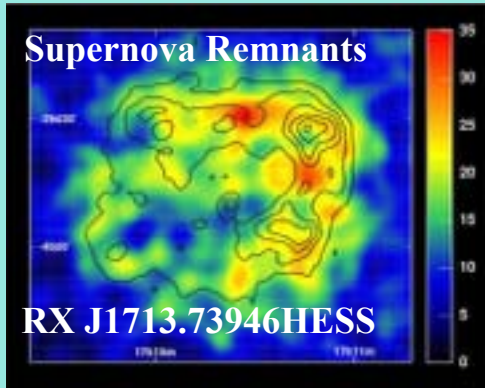
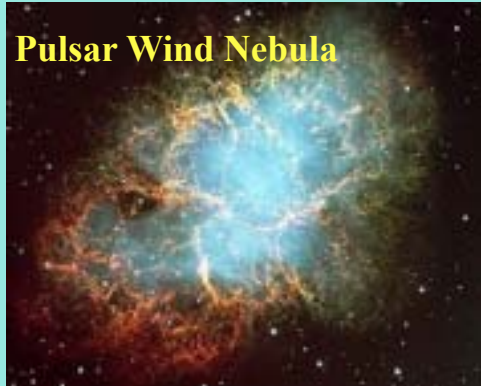


ANTARES traccia "verso l'alto": un "candidato" neutrino

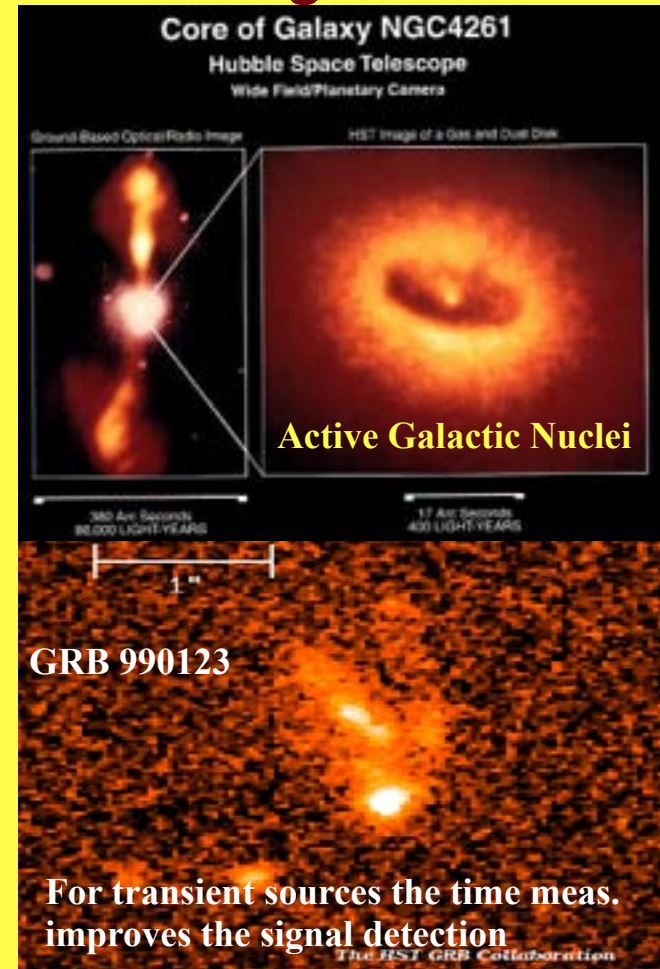


Obiettivi della ricerca: individuare sorgenti "puntiformi di neutrini"

Galactic



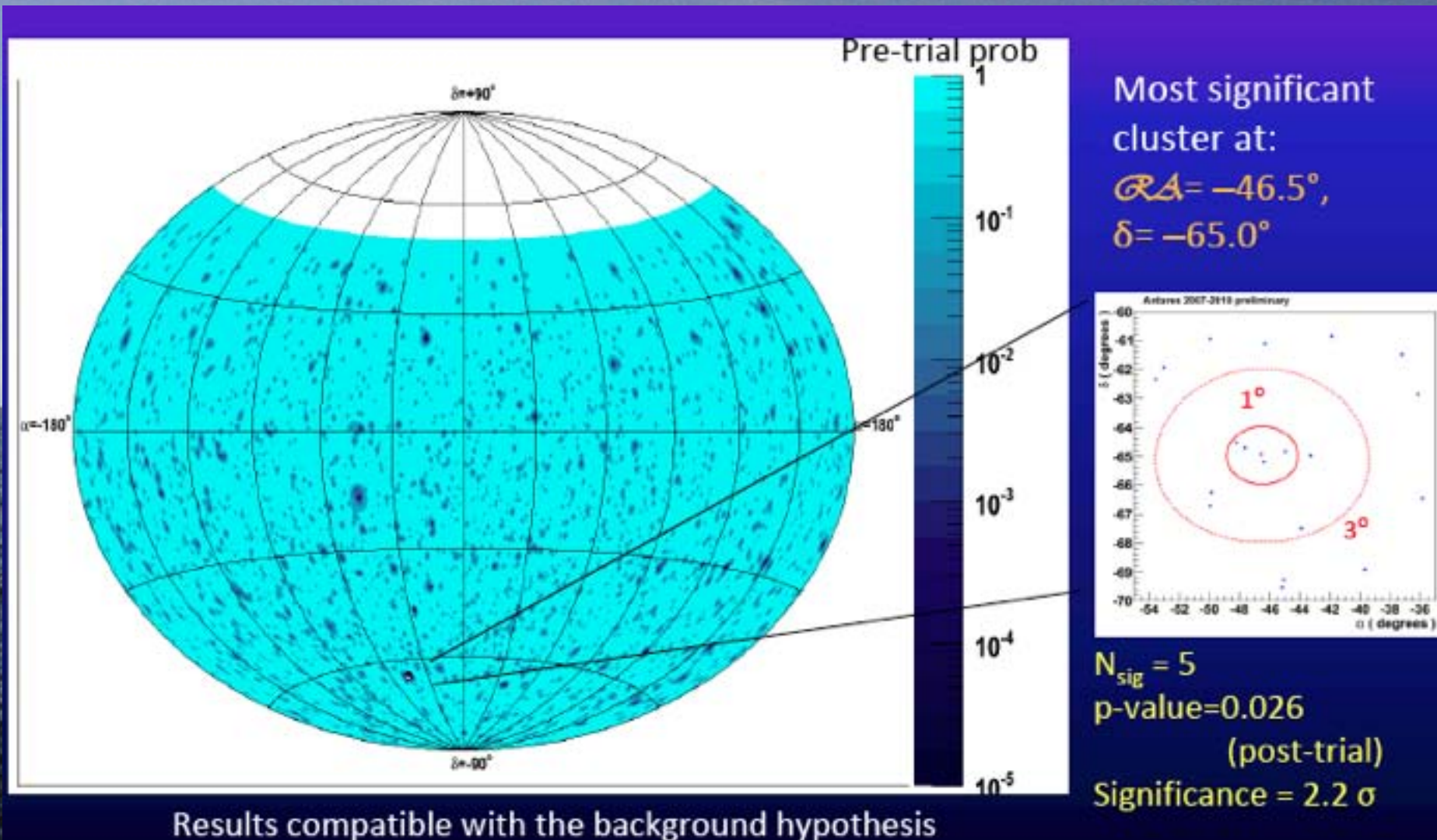
Extragalactic



Il segnale cercato: un eccesso di tracce, in un cono centrato attorno ad una posizione nel cielo, rispetto al fondo uniforme dei neutrini atmosferici. Diminuendo l'apertura del "cono di ricerca" si riduce il numero di neutrini atmosferici e si rende più efficiente la ricerca del segnale. Importantissima è la bontà del rivelatore nel ricostruire la direzione delle particelle,

$$\sigma(\vartheta) \leq 0.5^\circ \text{ for } E_\nu \geq 1 \text{ TeV}$$

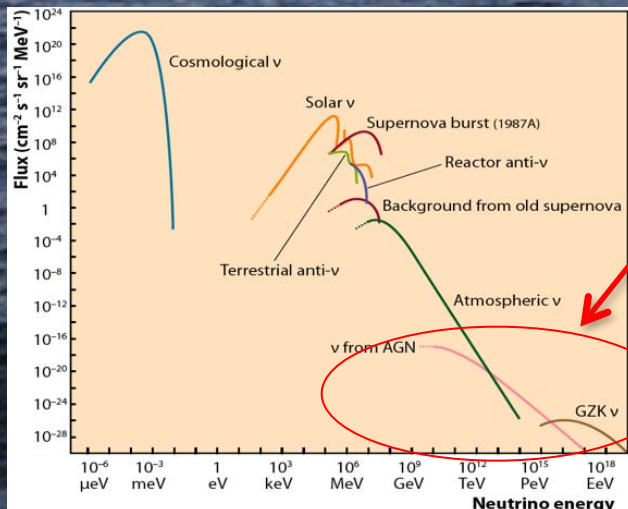
Un esempio: la ricerca di sorgenti puntiformi dell'esperimento ANTARES



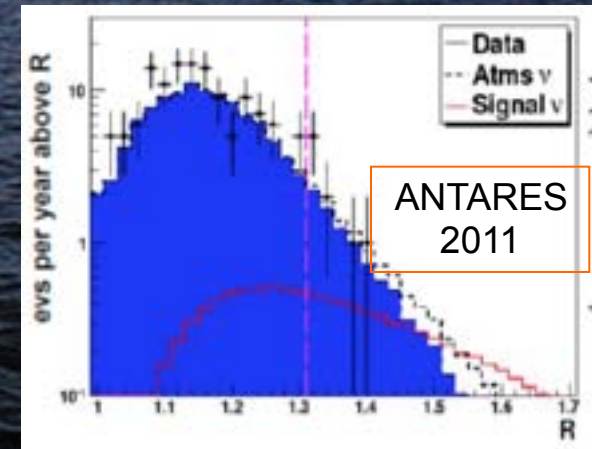
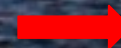
Un altro obiettivo: identificare un flusso di neutrini oltre quello di origine atmosferica

- Unresolved Active Galactic Nuclei
- Neutrinos from "Z-bursts"
- Neutrinos from "GZK like" p-CMB interactions
- Neutrinos foreseen by Top-Down models
-

Their identification out of the more intense background of atmospheric neutrinos (and muons) is possible at very high energies ($E > \text{TeV}$) and implies accurate energy reconstruction.

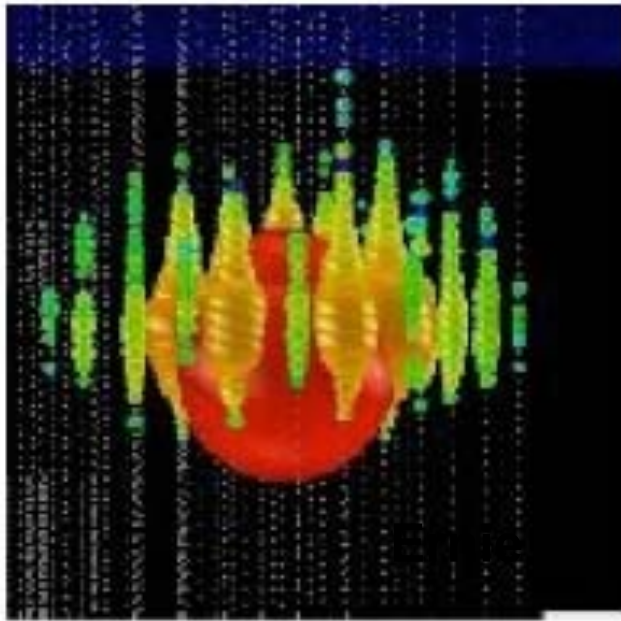


Search here !!!

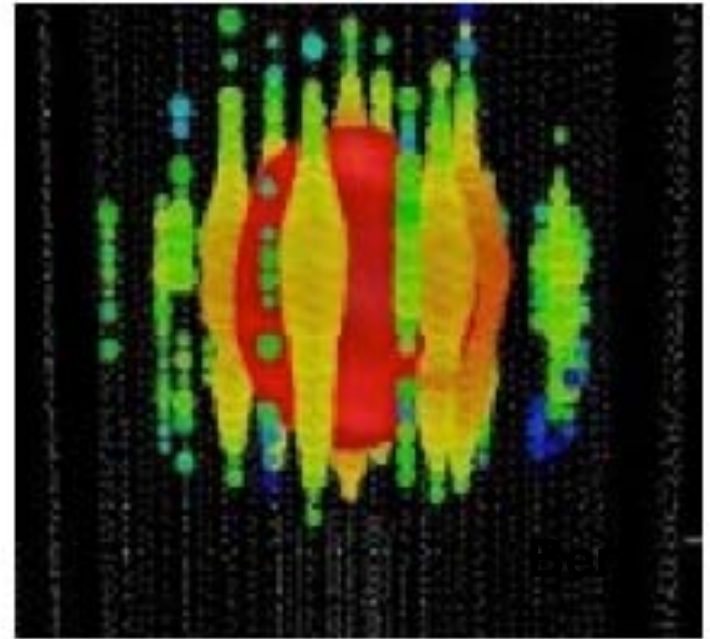


ANTARES
2011

SCOPERTA !!!: i primi due eventi di neutrini astrofisici di altissima energia identificati da IceCube (2012) !!!



312 DOMs



354 DOMs

Two neutrino events of energy above 10^{15} eV detected in IceCube were reported on Neutrino 2012 Conference.

T. Stanev @ Now 2012 Conference: "The first thought was that these events are produced by electron antineutrinos generating the Glashow resonance."

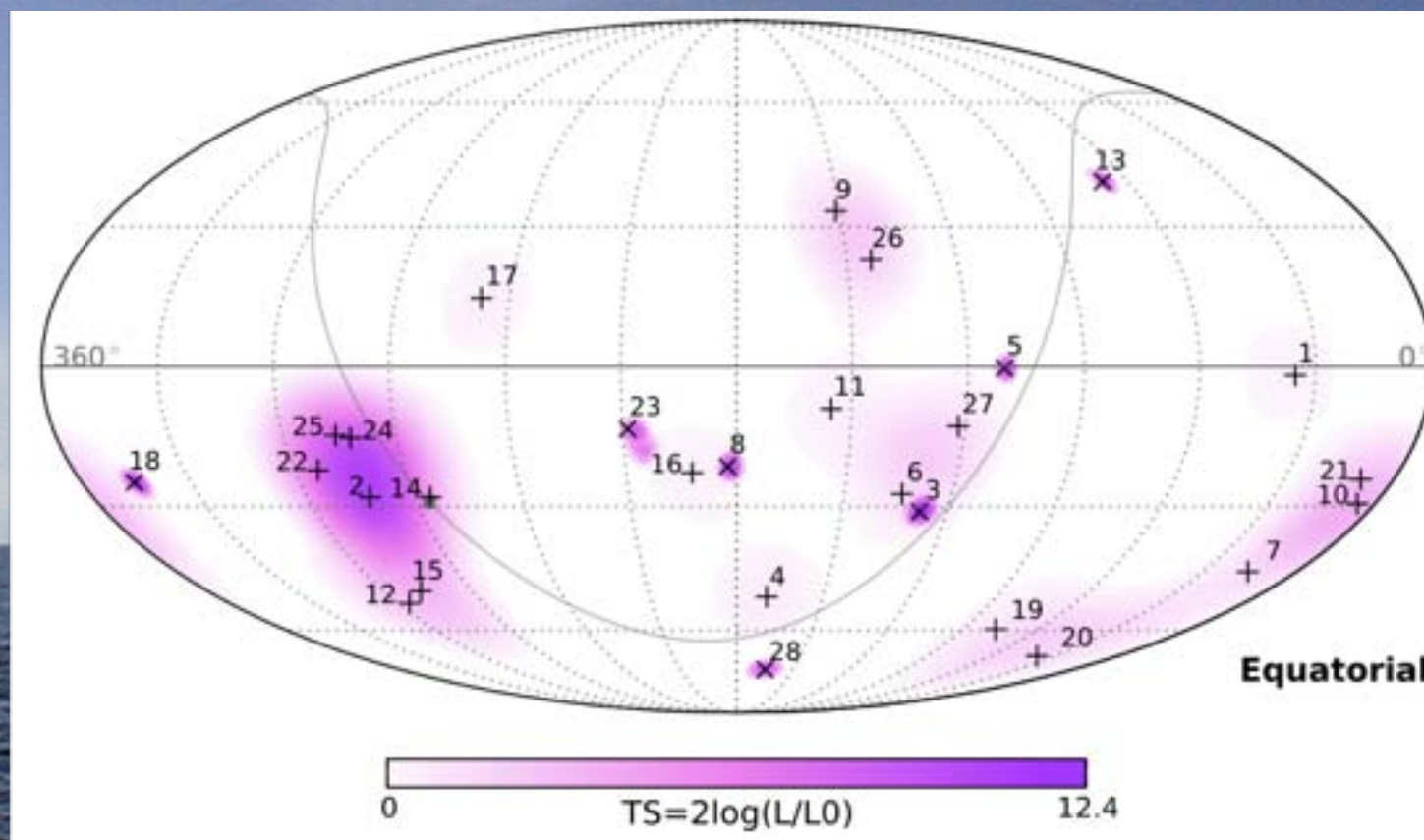
SCOPERTA CONFIRMATA !!!: altri 26 eventi di neutrini astrofisici di altissima energia identificati da IceCube (2013) !!!

**Science 22 Nov. 2013
Vol. 342 no. 6161**

- **Observed energy distribution harder than any expected atmospheric background**
- **Measured event sample compatible with isotropic neutrino flux**

IL CAPITOLO DELLA ASTRONOMIA CON NEUTRINI ASTROFISICI E' APERTO !!

SCOPERTA CONFIRMATA !!!: altri 26 eventi di neutrini astrofisici di altissima energia identificati da IceCube (2013) !!!



Skymap in equatorial coordinates of the Test Statistic value (TS) from the maximum likelihood point-source analysis. The most significant cluster consists of five events (all showers and including the second-highest energy event in the sample) with a final significance of 8%. Best-fit locations of individual events are indicated with vertical crosses (+) for showers and angled crosses (x) for muon tracks.

Altri obiettivi di ricerca: non solo astrofisica ma studio delle proprietà fondamentali delle particelle elementari

... anche problemi non risolti in fisica delle particelle ...

- Dark Matter searches:
 - Neutralinos from Sun, Earth, Galactic Center
- Monopoles, Nuclearites
- Acceleration mechanisms
- Neutrino interaction Cross sections
- Neutrino oscillations, neutrino properties
- ...

International consortium involving more than 300 scientists from 12 countries (CY, DE, ES, FR, GR, IE, IT, Morocco, NL, PO, RO, UK)

> 40 Institutes

> 120 Scientists

Common objective: build the sensitive high energy neutrino telescope in the Northern Hemisphere

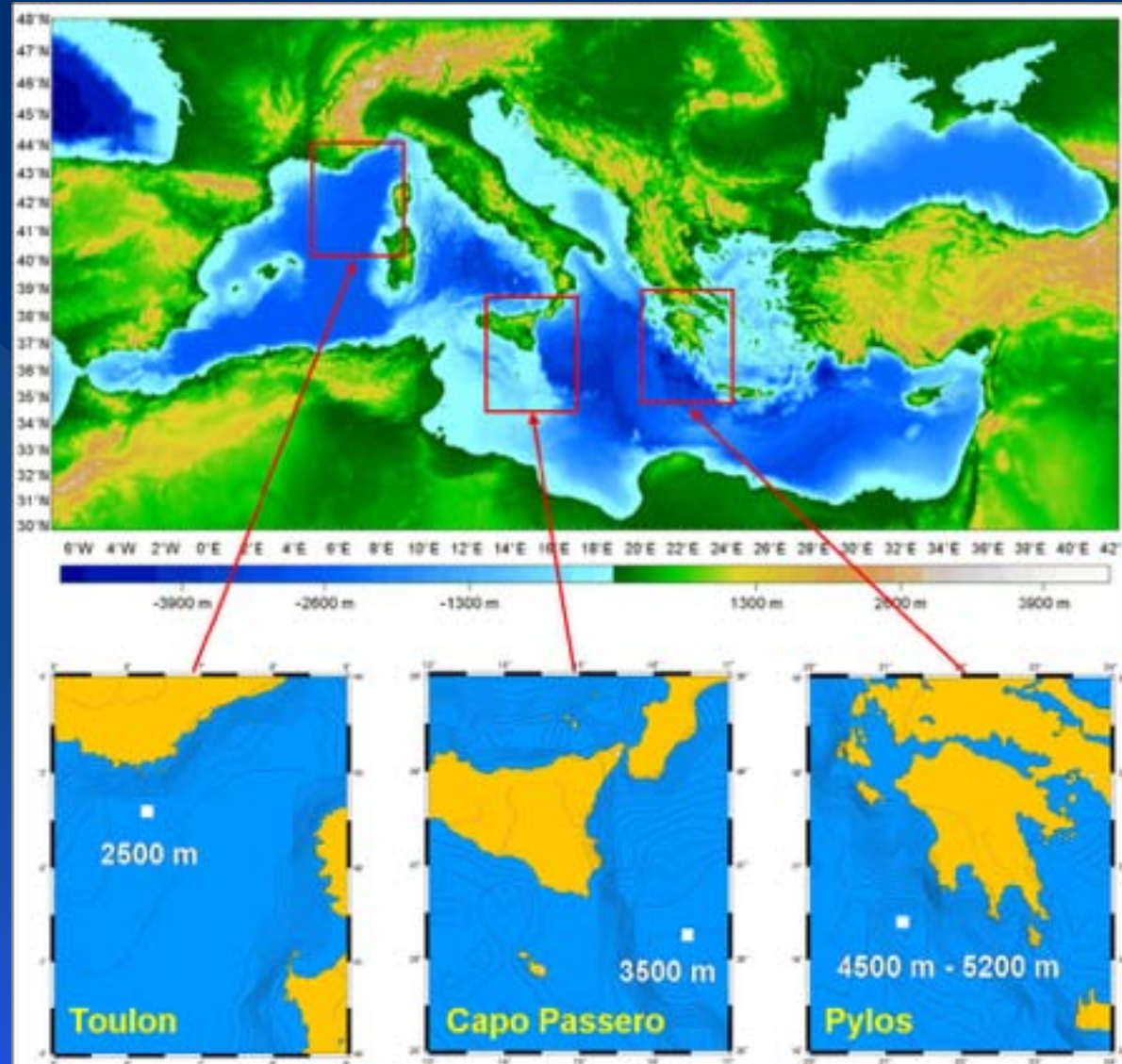


KM3NeT

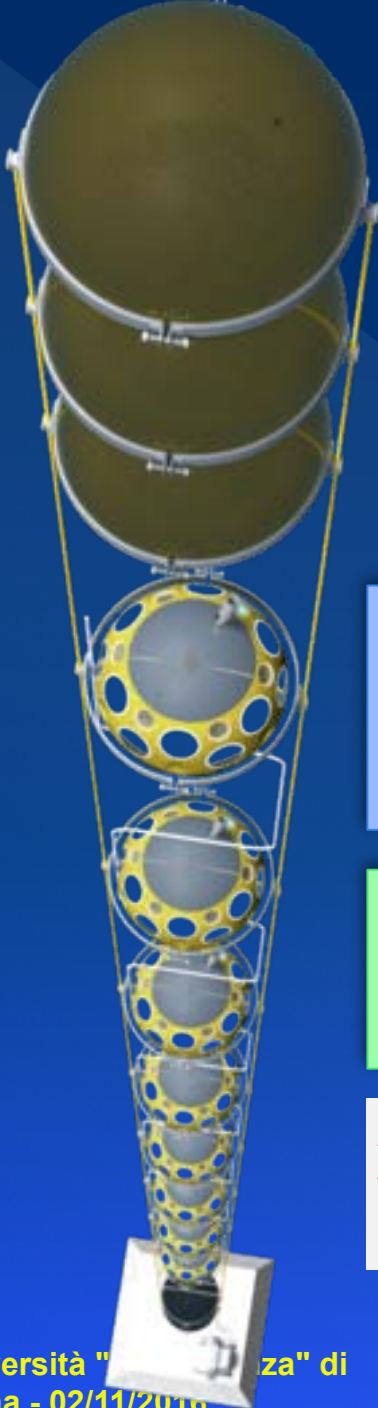


KM3NeT multisite construction

- 3 detectors, each $\sim 2\text{km}^3$ in 3 sites
- KM3NeT-France:
Toulon
- KM3NeT-Italy:
Capo Passero
- KM3NeT-Greece:
Pylos
- Long-term site characterisation measurements performed



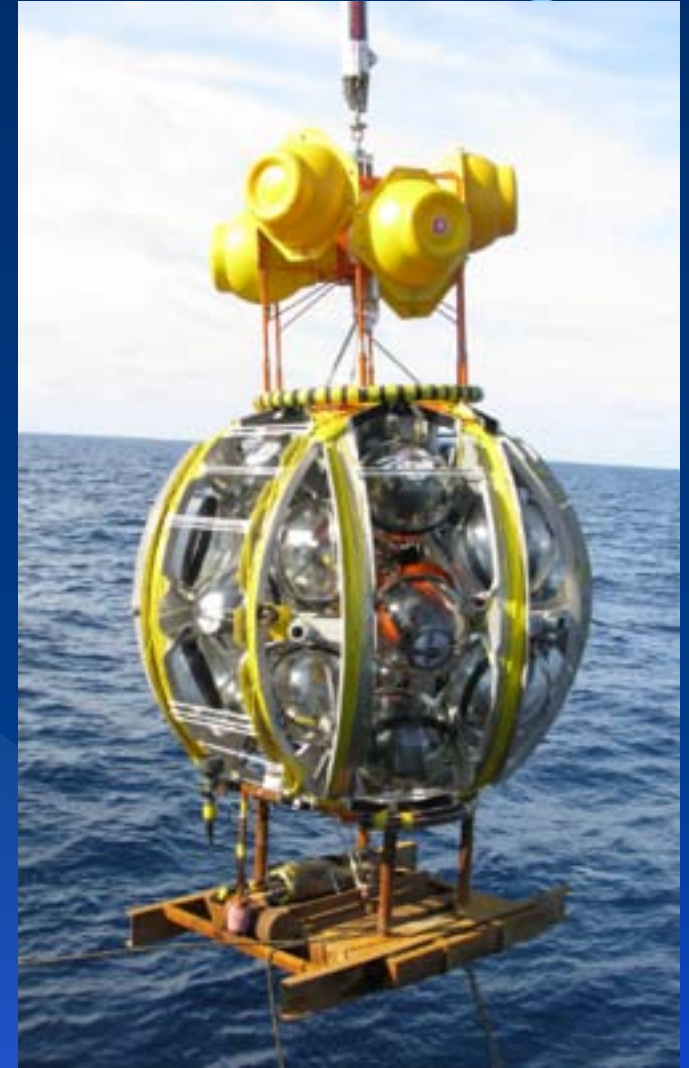
The String Technology



Digital Optical Module
31 small, 3", PMTs in one glass sphere
Photon counting

Detection Unit with 18 storeys
36 m inter-storey distance
Compact deployment

A multi-PMT OM mounted on the ANTARES Instrumented line allows to study its behaviour



The Tower technology

NEMO – Phase2

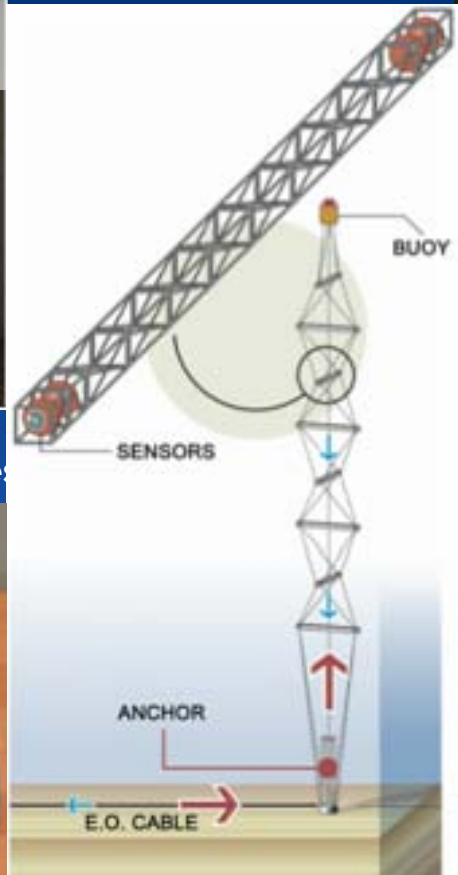
8 floors, 4PMTs/Floor, 2 hydrophones/Floor
8 m bars, vertical dist. = 40 m, $H_{tot} = 450$ m
oceanographic instruments
Deployed at 3500m depth in March 2013

The OM: 10" Hamamatsu R7081, Front End Module, Time Calibration, LED beacons



32 OMs, all fully tested and calibrated.
2 OMs equipped with piezo-hydrophones

Hydrophones: acoustic positioning and bioacoustics



Antonio Capone - Osservatorio

NEMO-Phase2 Tower before deployment



KM3NeT – Italy Towers

14 Floors
8 m bars, vertical dist. = 20 m
 $H_{tot} \sim 400$ m

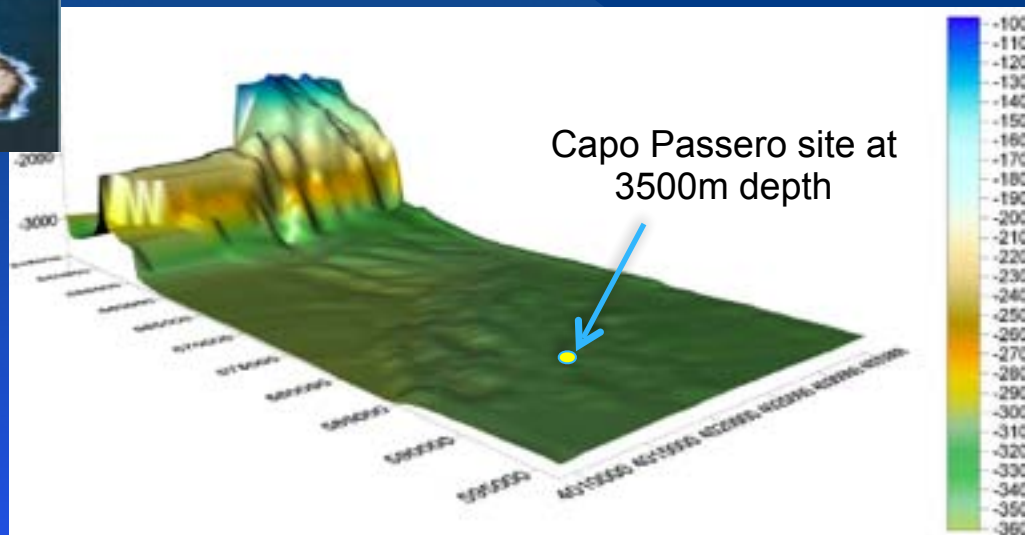


6 OMs + 2 hydrophones / Floors

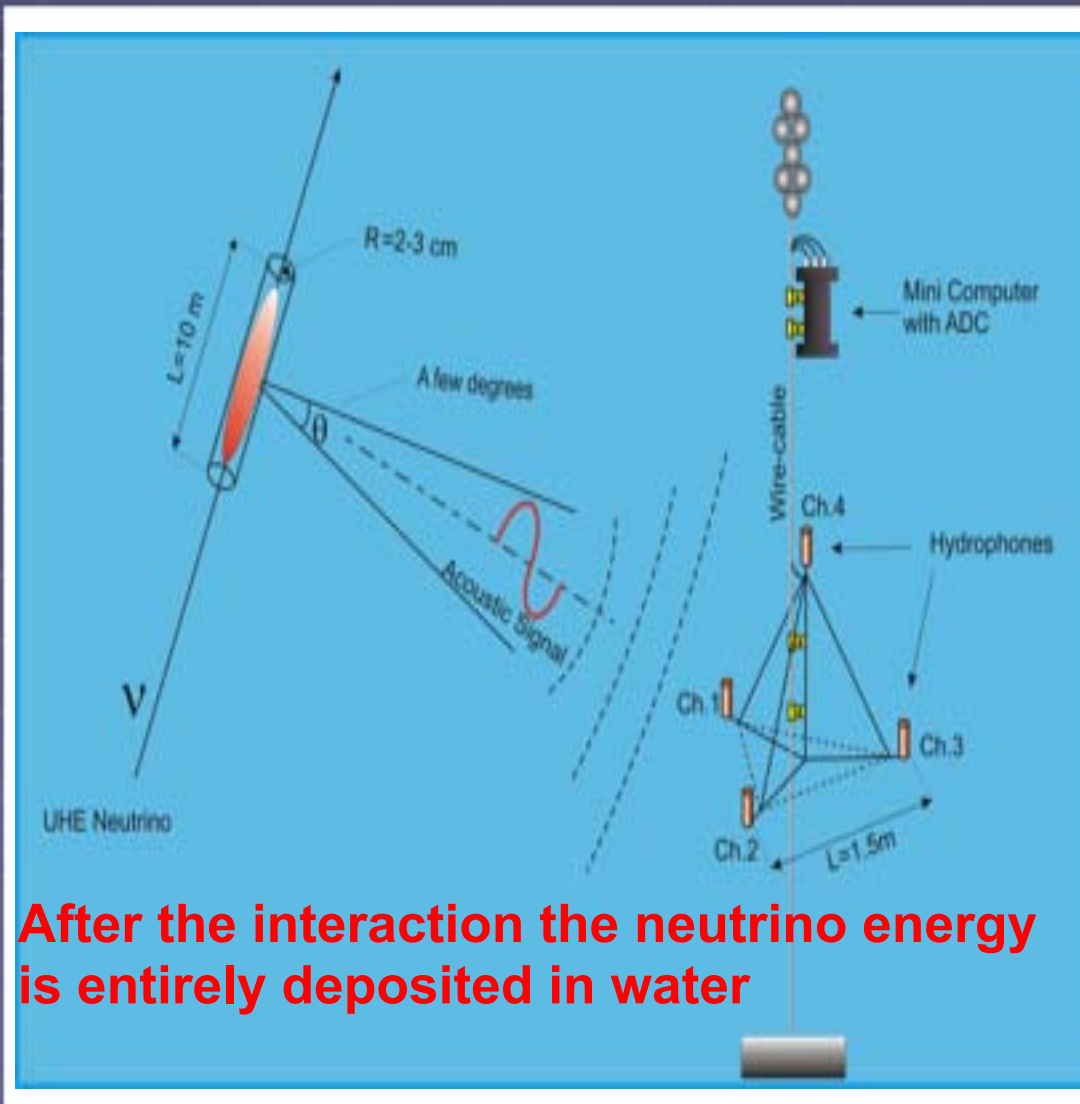
Oceanographic Instruments
Towers at ~ 100 m hor. dist.

NEMO-Phase2 Tower @ the Capo Passero Site

- On-shore infrastructure available (on-shore building completion at beginning 2008)
- 100 km Electro-Optical cable (>50 KW, 20 fibres) deployed (summer 2007)
- On shore Power Feeding System operational
- ALCATEL DC(10kV) / DC(400V) converter deployed and connected (winter 2009)
- NEMO-PHase2 Tower deployed March 2013:
 - validation of the Tower technology
 - long time measurement of deep-sea environmental conditions



Acoustic detection principle/features



After the interaction the neutrino energy is entirely deposited in water

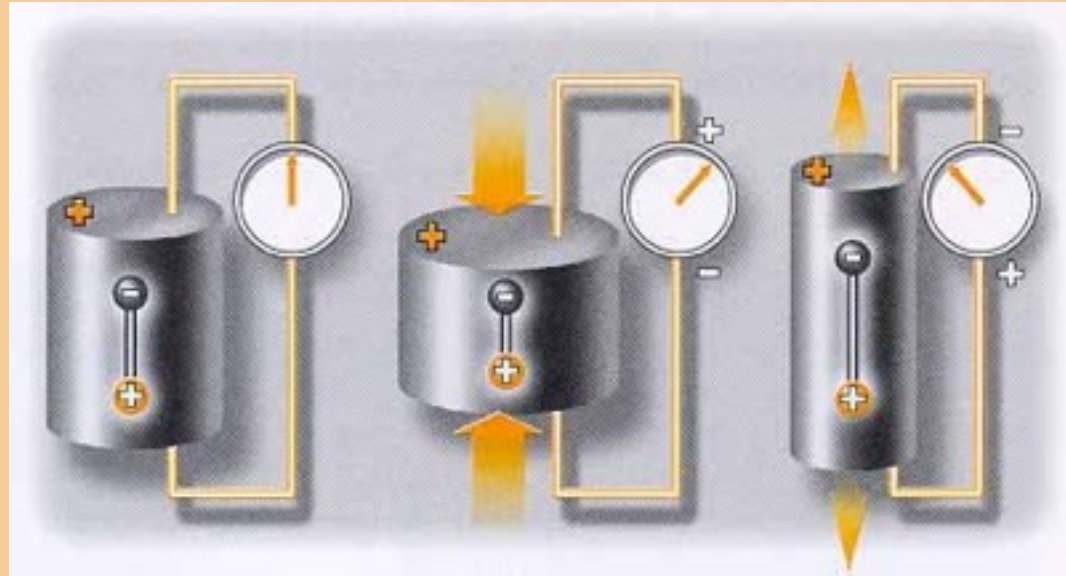
- Typical cylindrical volume over which the hadronic energy is deposited is $\sim 10\text{ m}$ long by a few centimetres wide
- *The energy deposition is instantaneous with respect to the signal propagation*
- Hence the acoustic signal propagates in a narrow "pancake" perpendicular to the shower direction in analogy with light diffraction through a slit

Acoustic Signal Detection

Acoustic Sensors Development

The Piezoelectric Effect

Piezoelectric effect consists on voltage produced between surfaces of a solid dielectric (non - conducting substance) when a mechanical stress is applied to it

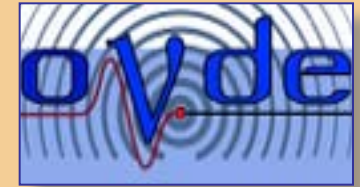


Acoustic detection by NEMO site: OvDE

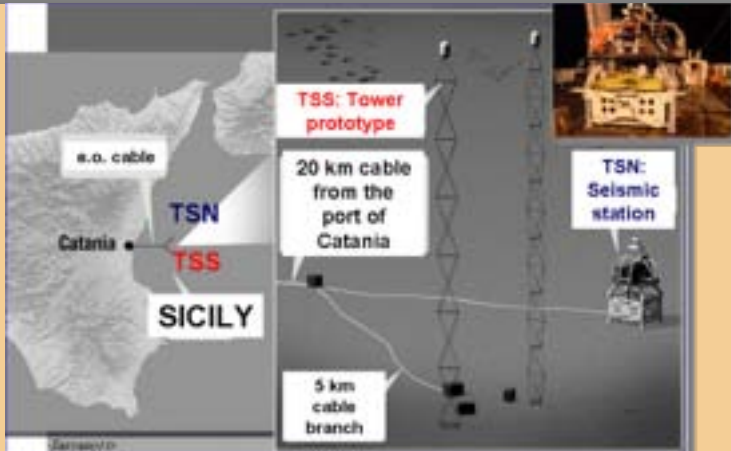


Neutrino Mediterranean Observatory

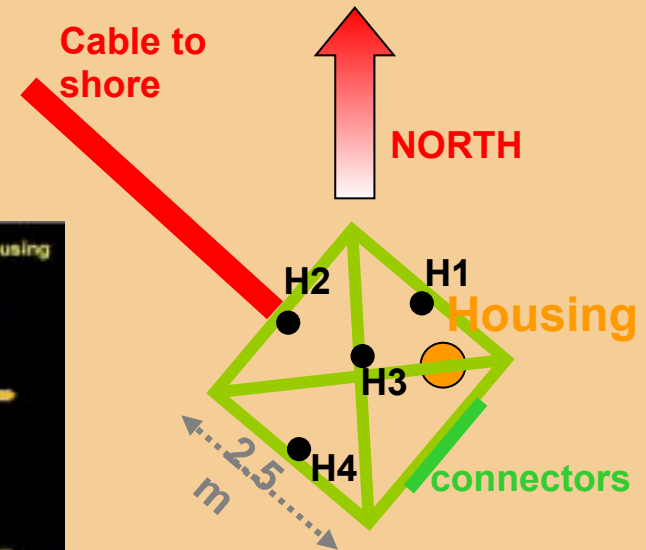
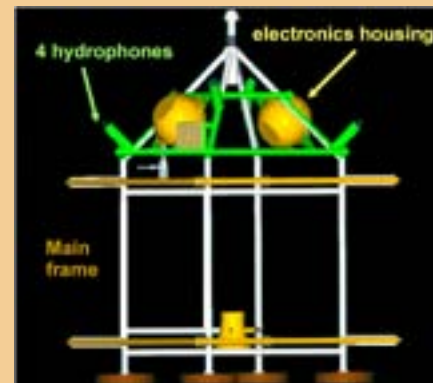
ONDE – Ocean Noise Detection Experiment



NEMO Test Site (Catania)



Lat: 37° 32.681' N
Long: 015° 23.773' E
Depth: 2050 m



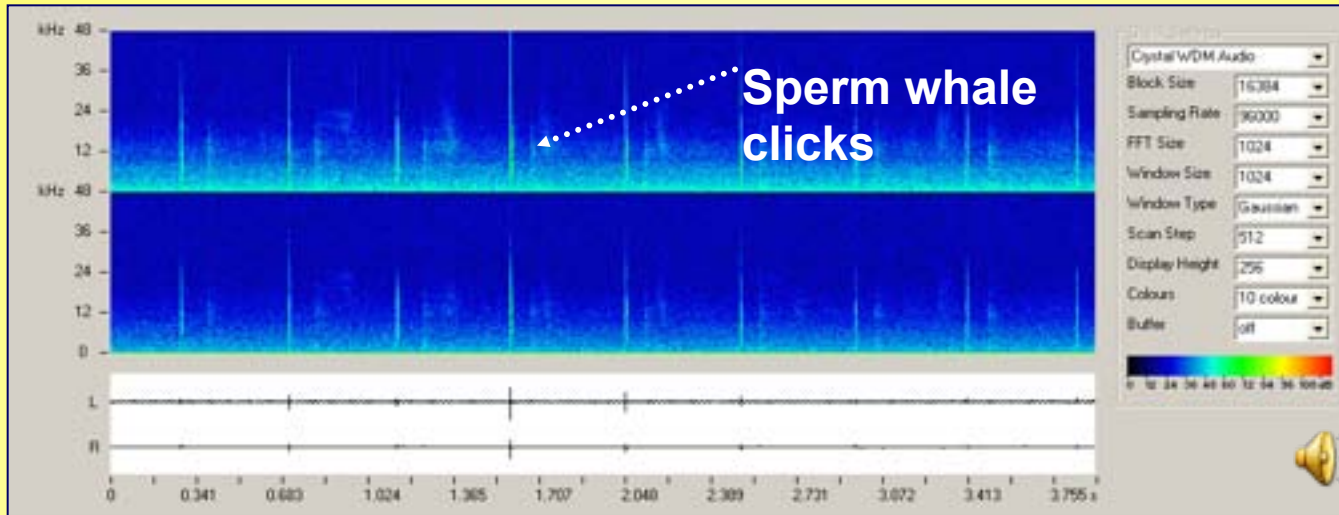
Height from seabed :

H1, H2, H4: ~ 2.6 m

H3: ~ 3.2 m

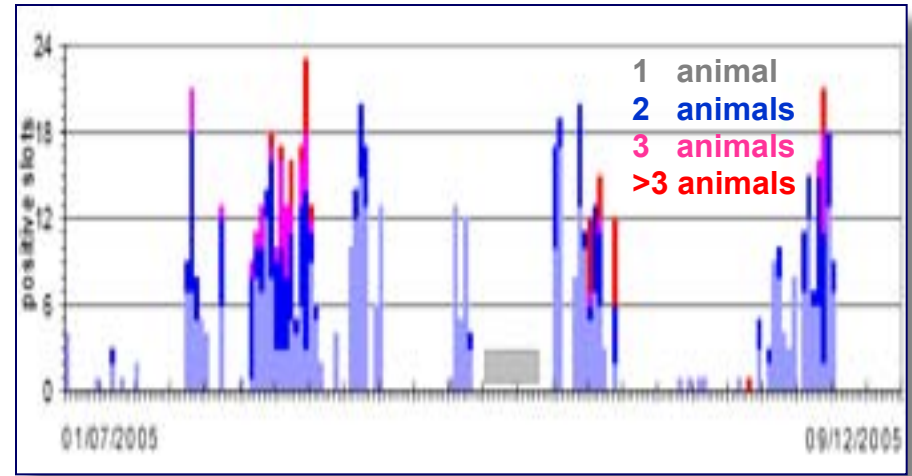
**First noise spectra
Whales&Dolphins signals**

Bioacustica: rivelati segnali di capodogli nel Golfo di Catania



OvDE sensitivity allowed cetaceans detection over >40 km range. The results indicate presence of sperm whales more frequent than previously observed.

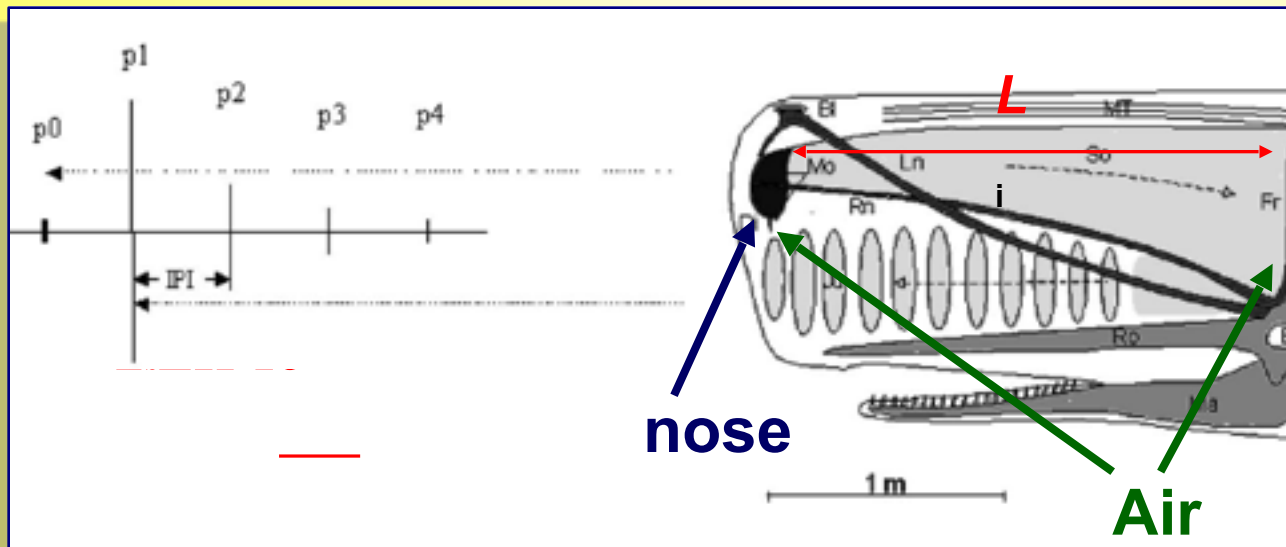
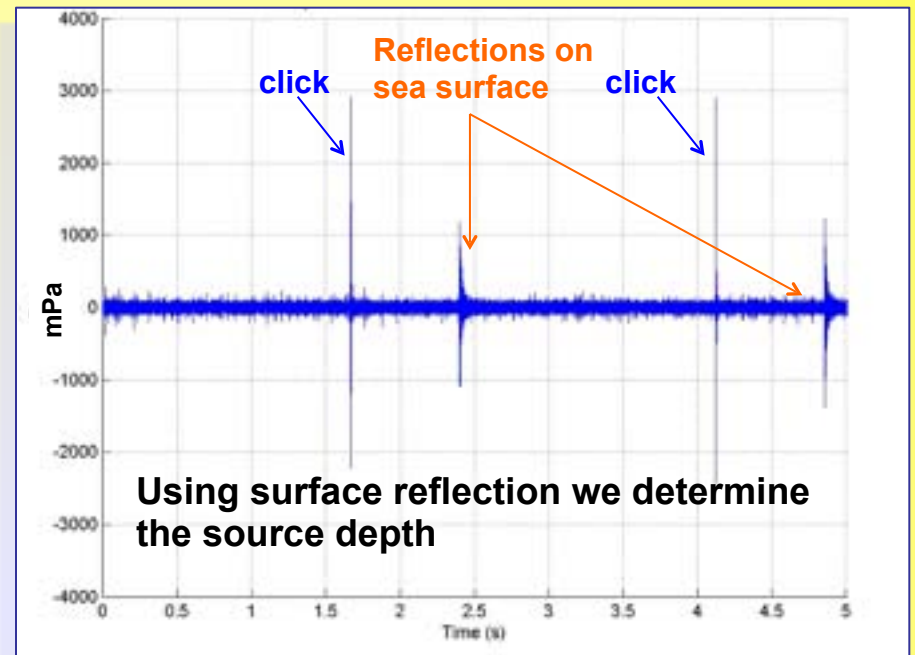
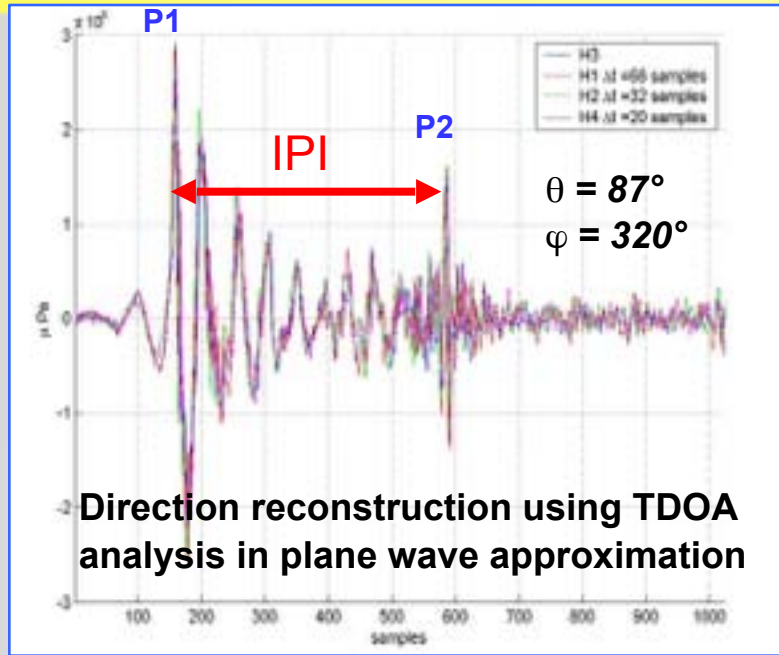
Long term observation and source tracking is used to determine marine mammals presence and seasonal routes.



INFN and CIBRA

Science, March 2, 2007

Bioacoustica: Capodogli. Studio dei "click" (curiosità !!)



Depth = 560 ± 5 m
 $L = 3.41 \pm 0.05$ m
Size = 9.72 - 10.50 m
Young male or female

Il futuro ??? Il possibile vostro impegno ??

L'astronomia Multi-Messenger !!!

Multi-Messenger Astronomy: Gravitational Wave + Electromagnetic + Neutrinos

