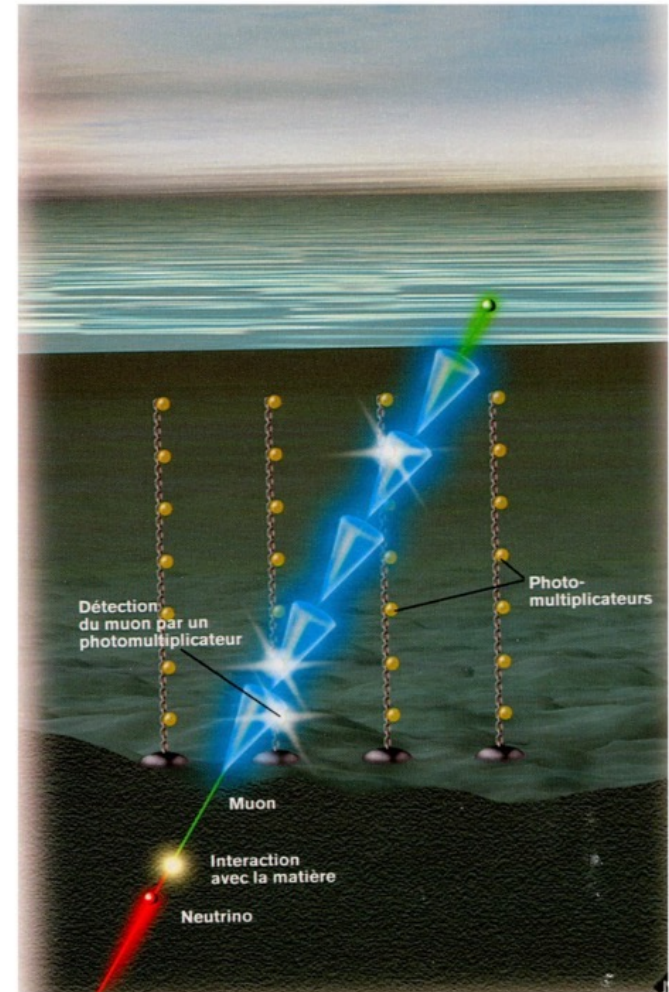


# Astronomia con raggi cosmici carichi di altissima energia e con neutrini



**Antonio Capone**  
Università di Roma "La Sapienza"

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



Copyright Science&Vie Juillet 1999

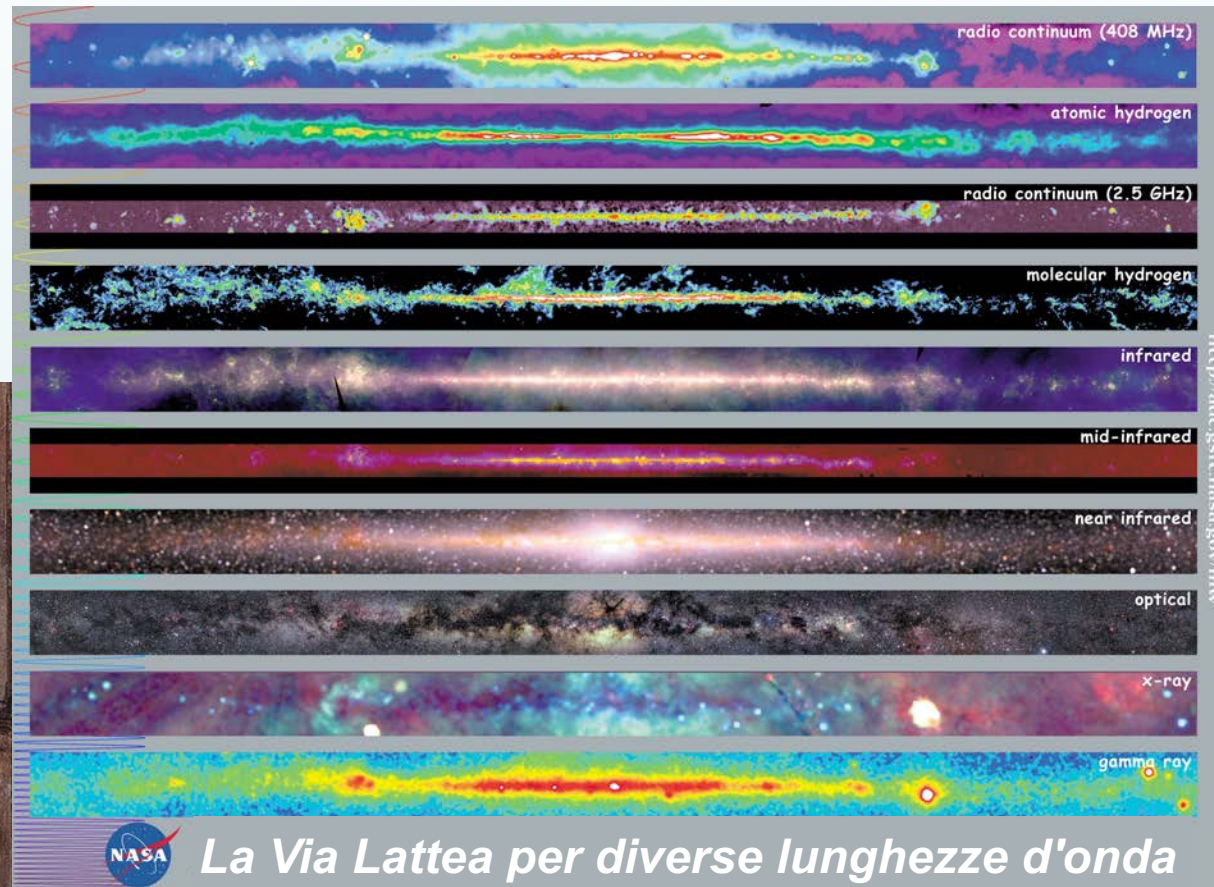
# Da Galileo ad oggi ... evoluzione dell'astronomia

Una sorgente luminosa in cielo può generare altre radiazioni elettromagnetiche, nella banda radio, infrarosso, ultravioletto, raggi gamma di alta energia ...



*Galileo Galilei mostra al Doge di Venezia Come usare il telescopio (1858), affresco di Giuseppe Bertini (1825–1898)*

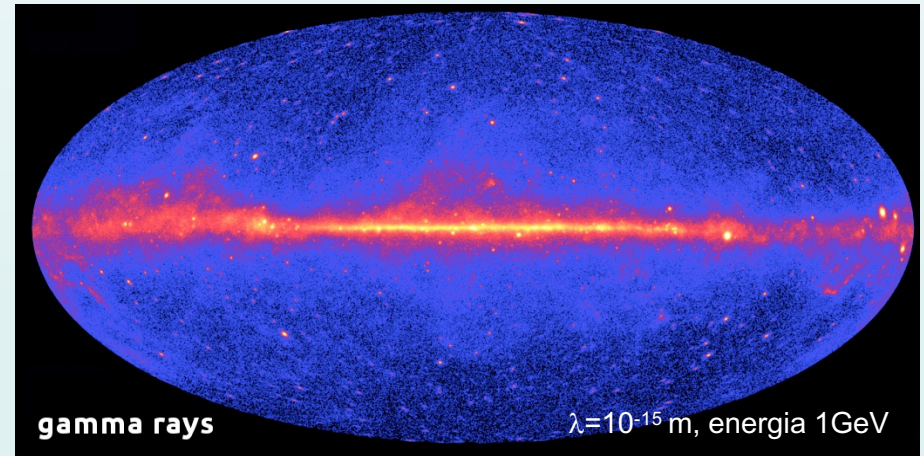
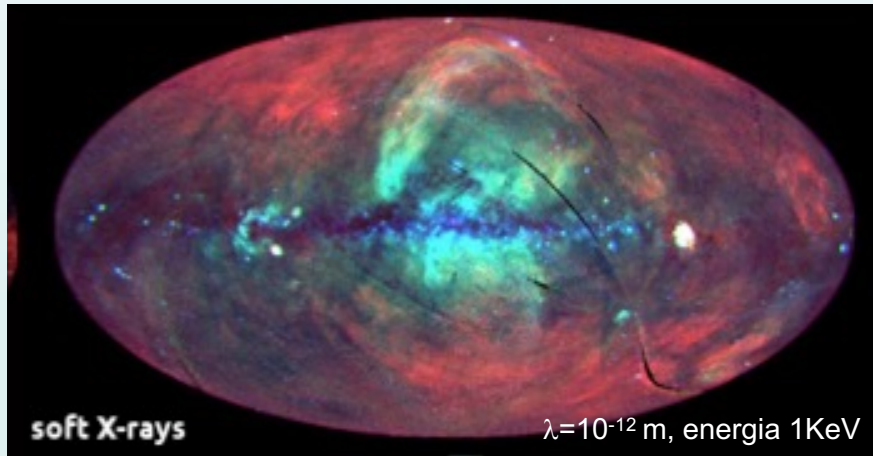
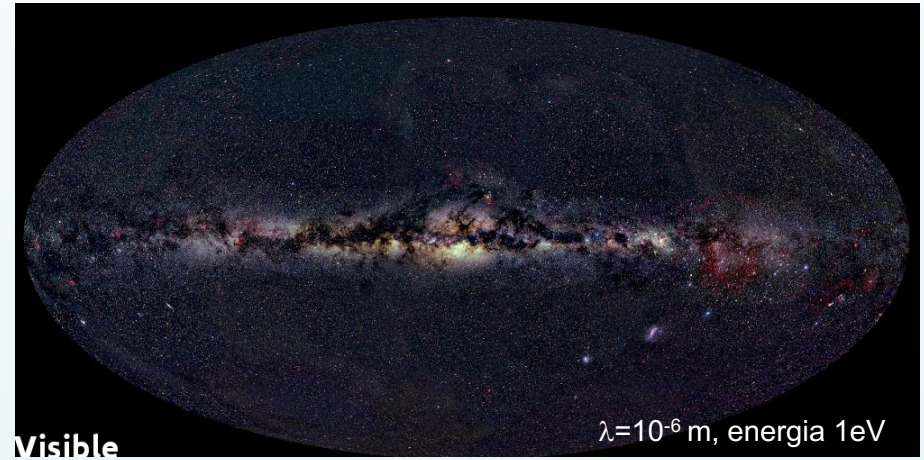
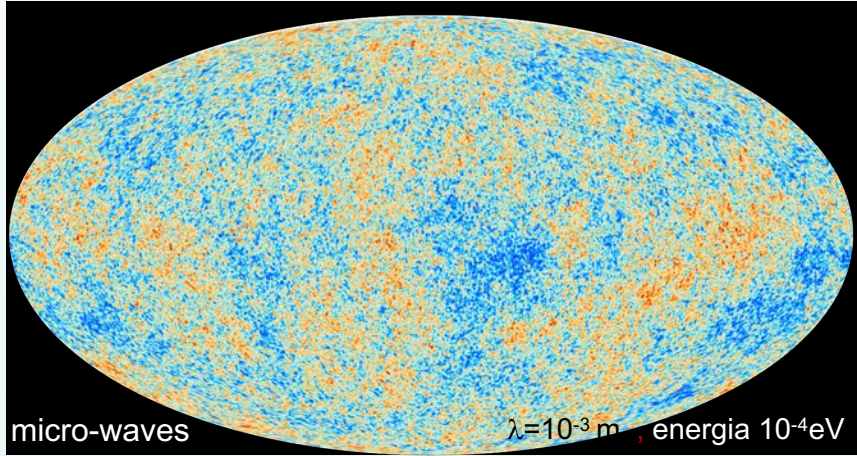
Antonio Capone - 3 aprile 2019



... ed anche particelle elementari che, in particolari circostanze, possono arrivare fino a noi: protoni, elettroni, nuclei, neutrini, ... : **i Raggi Cosmici**

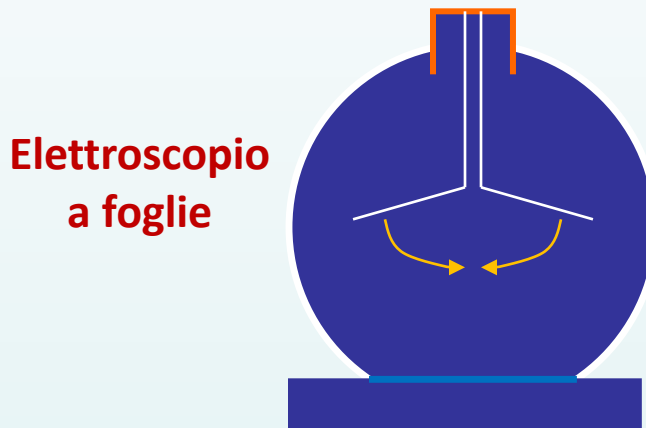


# Il cielo "osservato" a diverse frequenze



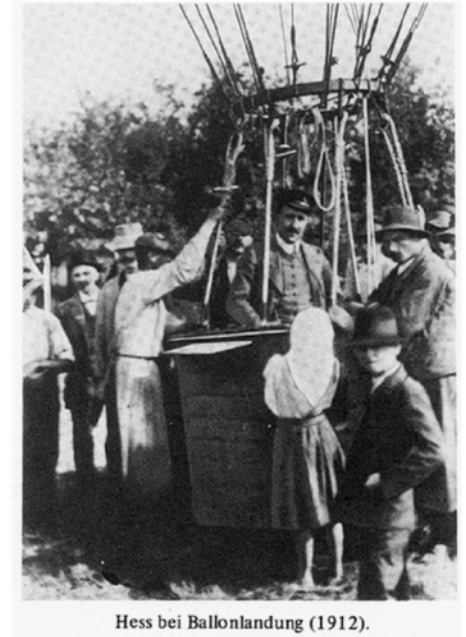
# Prima evidenza dell'esistenza dei Raggi Cosmici

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



**Hess** 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 Pieskow.

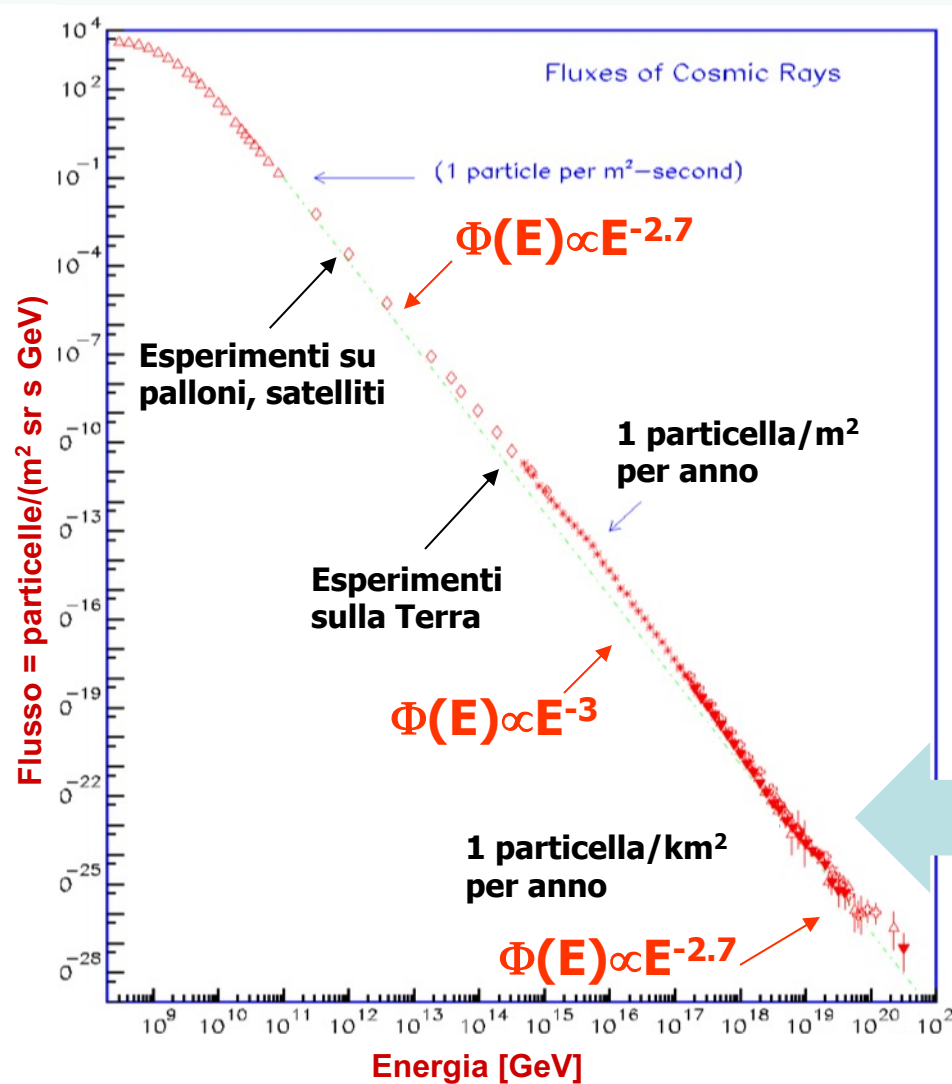


# Cosa sappiamo oggi dei Raggi Cosmici ??

- ~ 1000 particelle/(s·m<sup>2</sup>)
- **nuclei ionizzati: 90% protoni, 9% particelle  $\alpha$ , nuclei più pesanti**
- quale è 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**

# Cosa altro sappiamo oggi dei Raggi Cosmici

## Distribuzione in energia dei R. C.



- Rivelate particelle elementari, protoni, con energia maggiore di  $10^{21}$ eV (come quella di una palla da tennis lanciata in prima battuta da un campione di tennis  $\sim 150$ km/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 km<sup>2</sup>



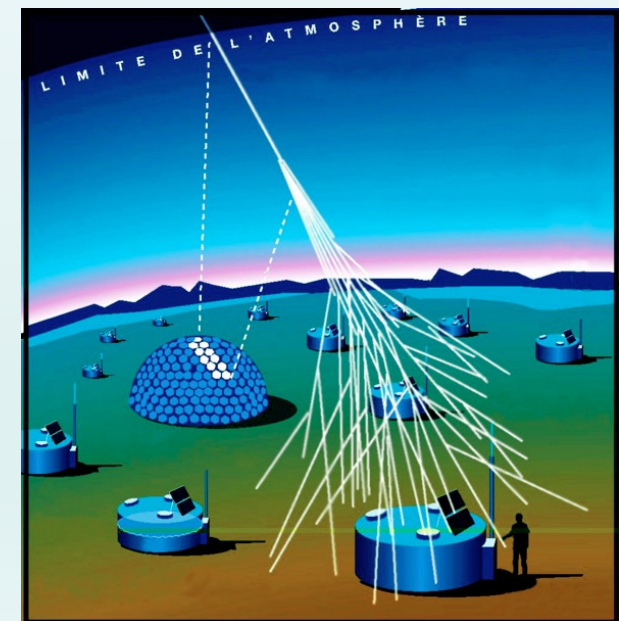
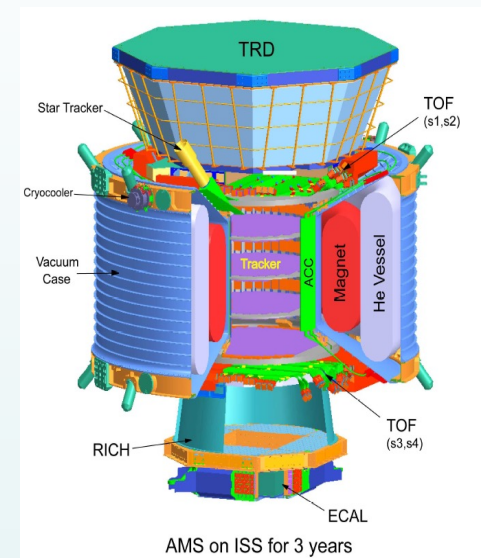
# Come possiamo studiare i Raggi Cosmici ??

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

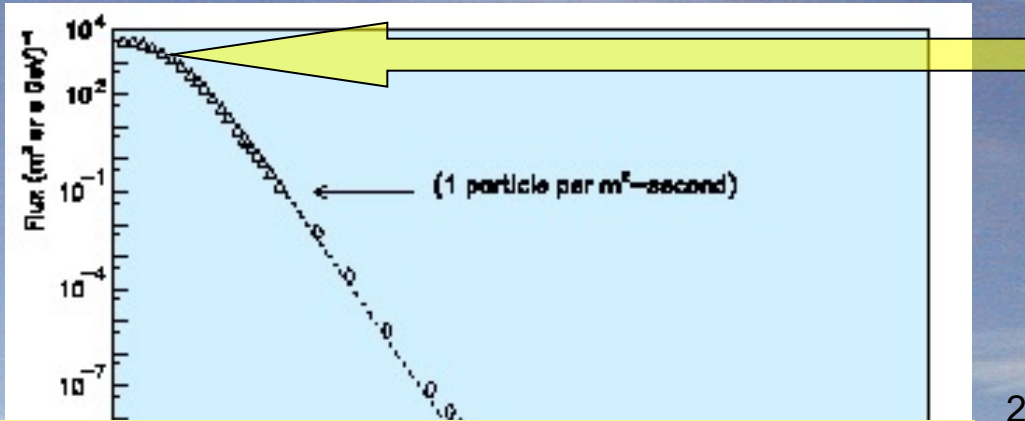
- nello spazio (satelliti)
- nell'alta atmosfera (palloni)

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

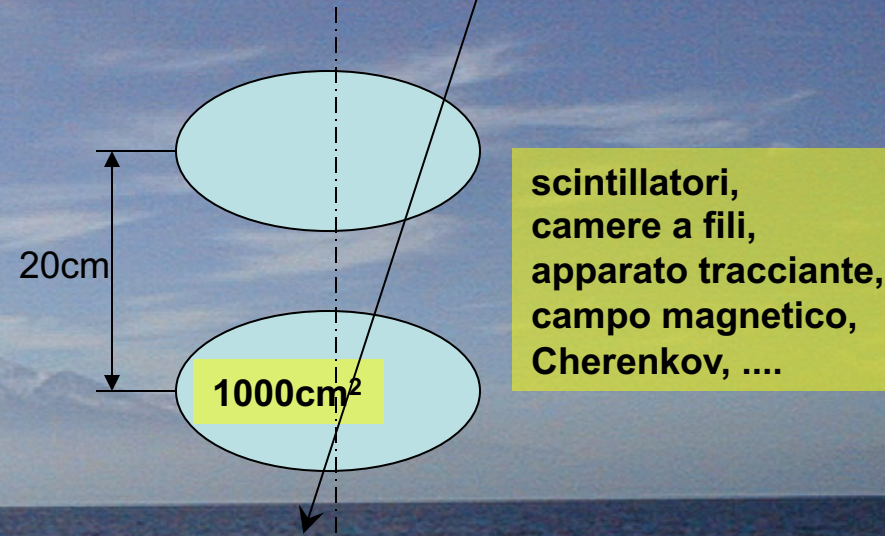
- studio degli “sciami” di particelle originate dalla loro interazione
- studio della luce (Cherenkov) da essi prodotta in aria
- rivelatori a Terra
- laboratori sotterranei



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



$\sim 250$  particelle/s



scintillatori,  
camere a fili,  
apparato tracciante,  
campo magnetico,  
Cherenkov, ....

Un piccolo apparato trasportato da palloni (qualche decina/centinaio di ore di volo --> 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, ...)

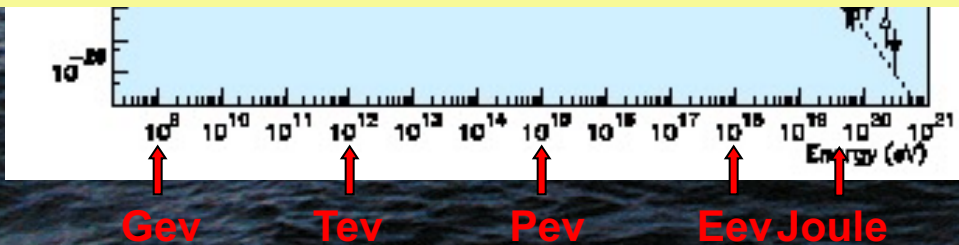
Come calcolare il numero di eventi che si possono registrare ??

$$N_{\text{eventi}} = \text{Flusso} * A * T * \Delta\Omega * \Delta E$$

↑     ↑     ↑     ↑     ↑

$$\left[ \frac{\# \text{ particelle}}{m^2 \text{ s sr GeV}} \right] \quad [m^2] \quad [s] \quad [sr] \quad [GeV]$$

Esempio  $10^3 * 0.1 * 36 \cdot 10^3 * 0.25 * 1$   
 $= 9 \cdot 10^6$  eventi in 10 ore





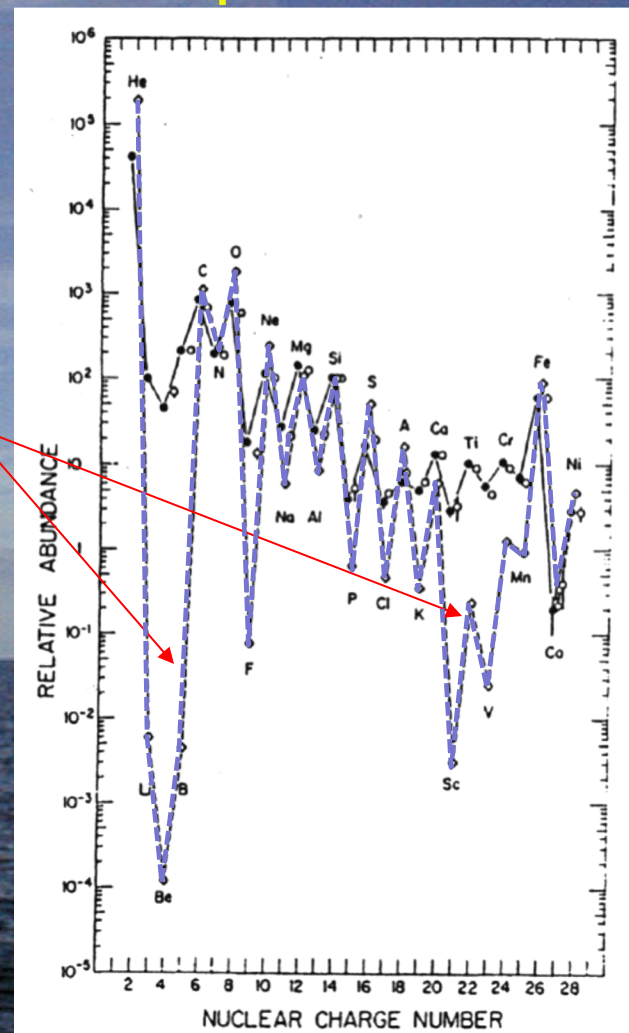
# Composizione dei raggi cosmici primari

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  $\geq 10$  milioni di anni

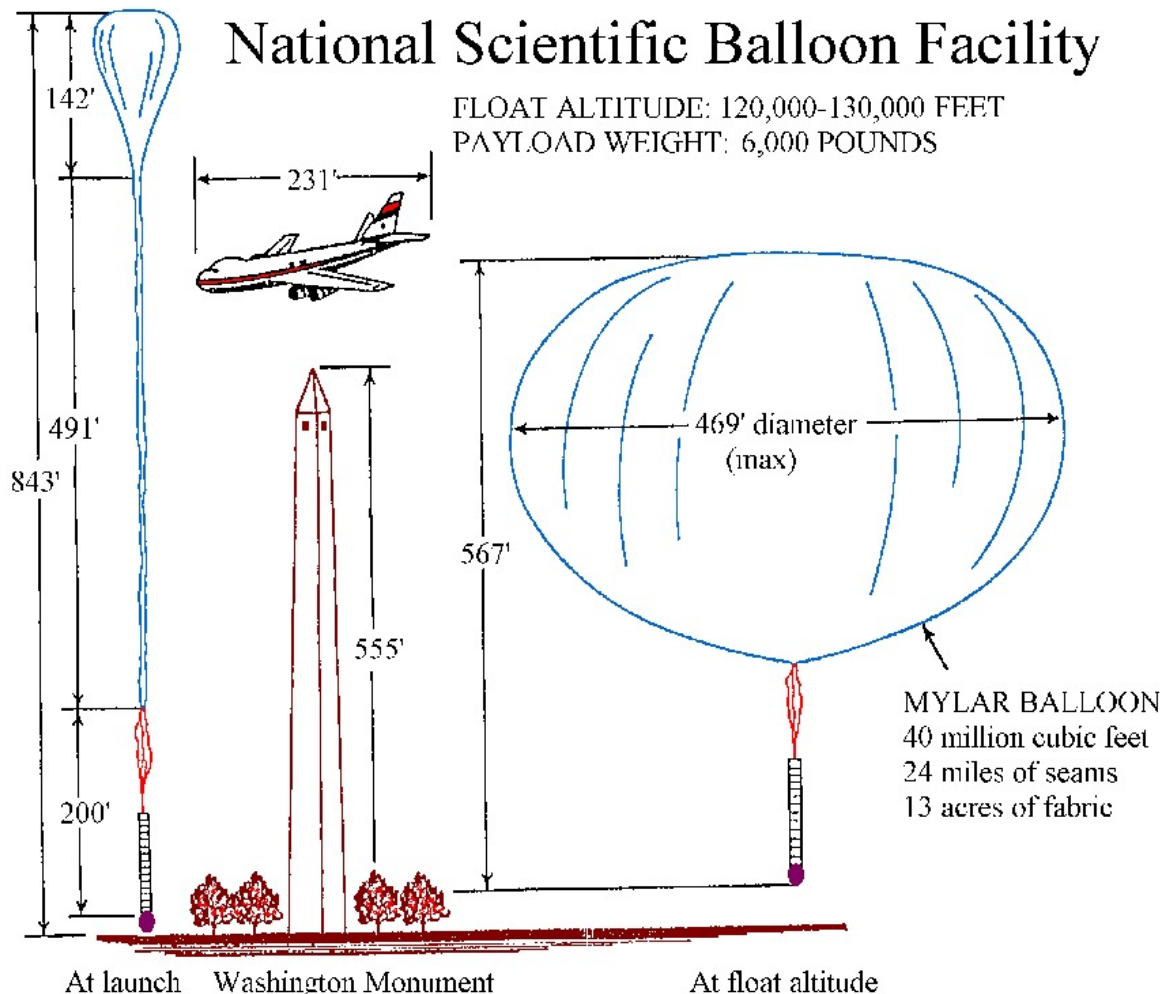
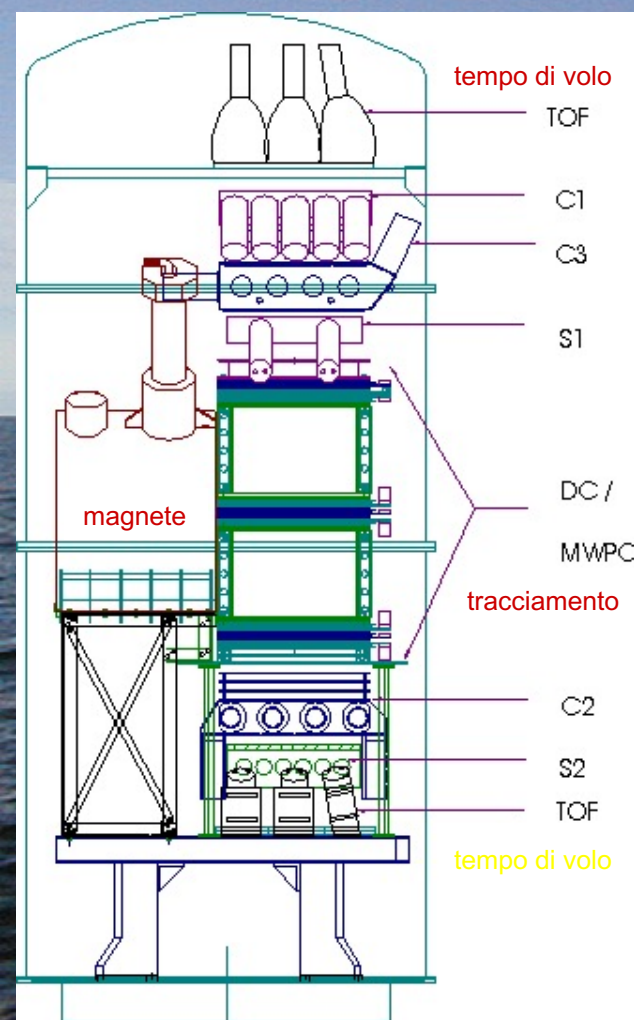


Abbondanza degli elementi che compongono i raggi cosmici dall'He al Ni, espressa relativa al Si, confrontata all'abbondanza relativa per i pianeti del sistema solare.

# 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, ...)

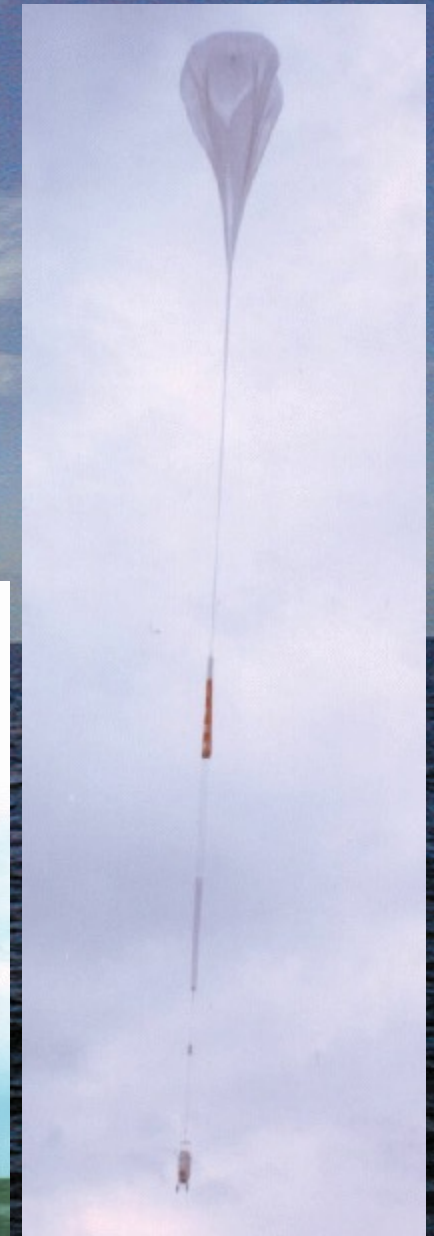




# IMAX - La fase di lancio

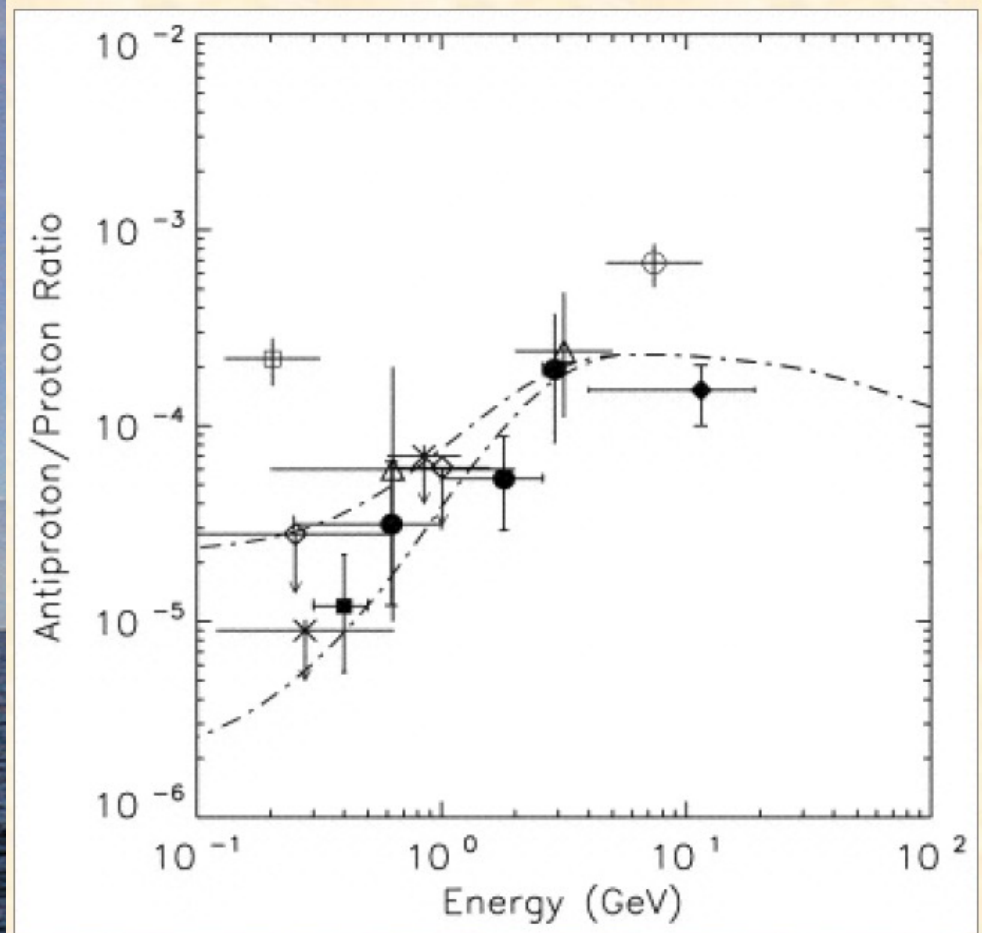
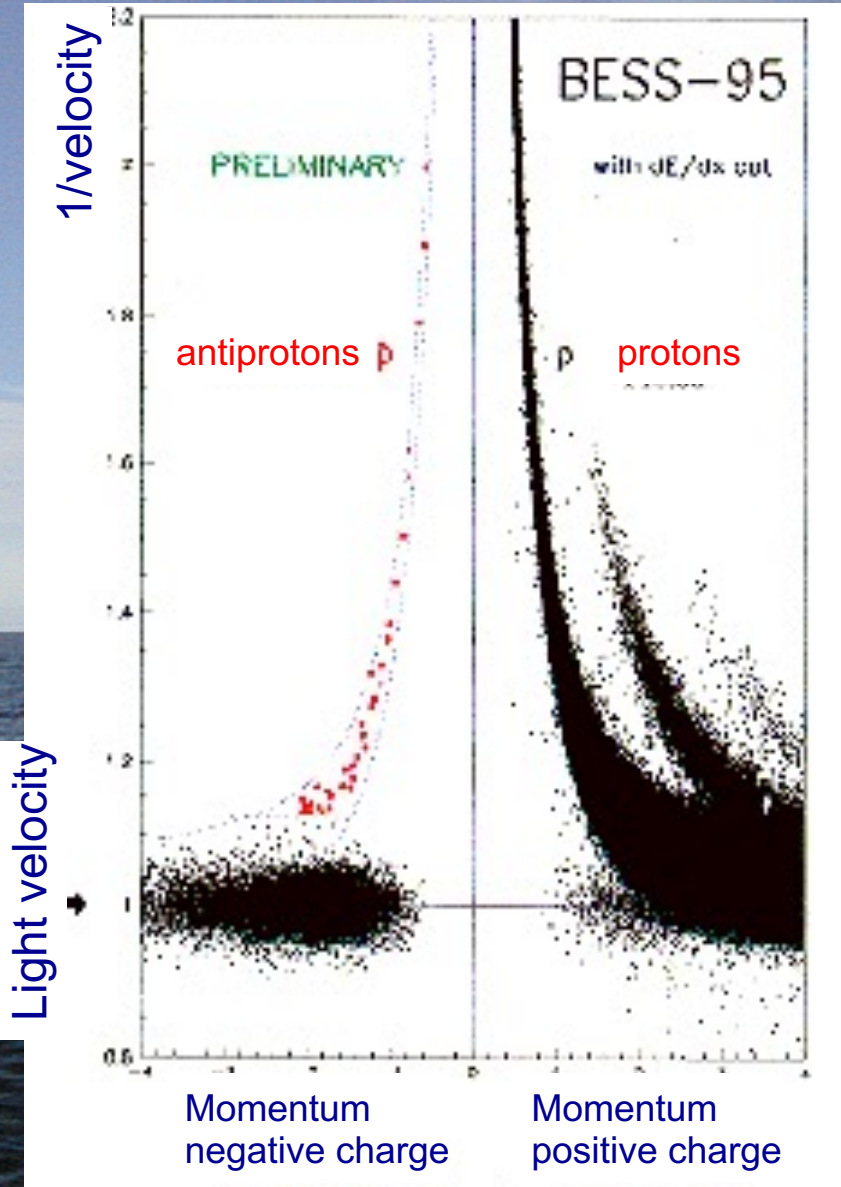
## FLIGHT

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  $1.4 \times 10^6$  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  $3.4 \times 10^6$  events were recorded during the float period.

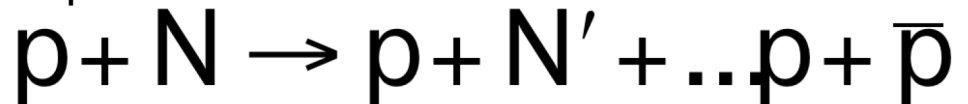




# Composizione dei raggi cosmici primari: antimateria ?

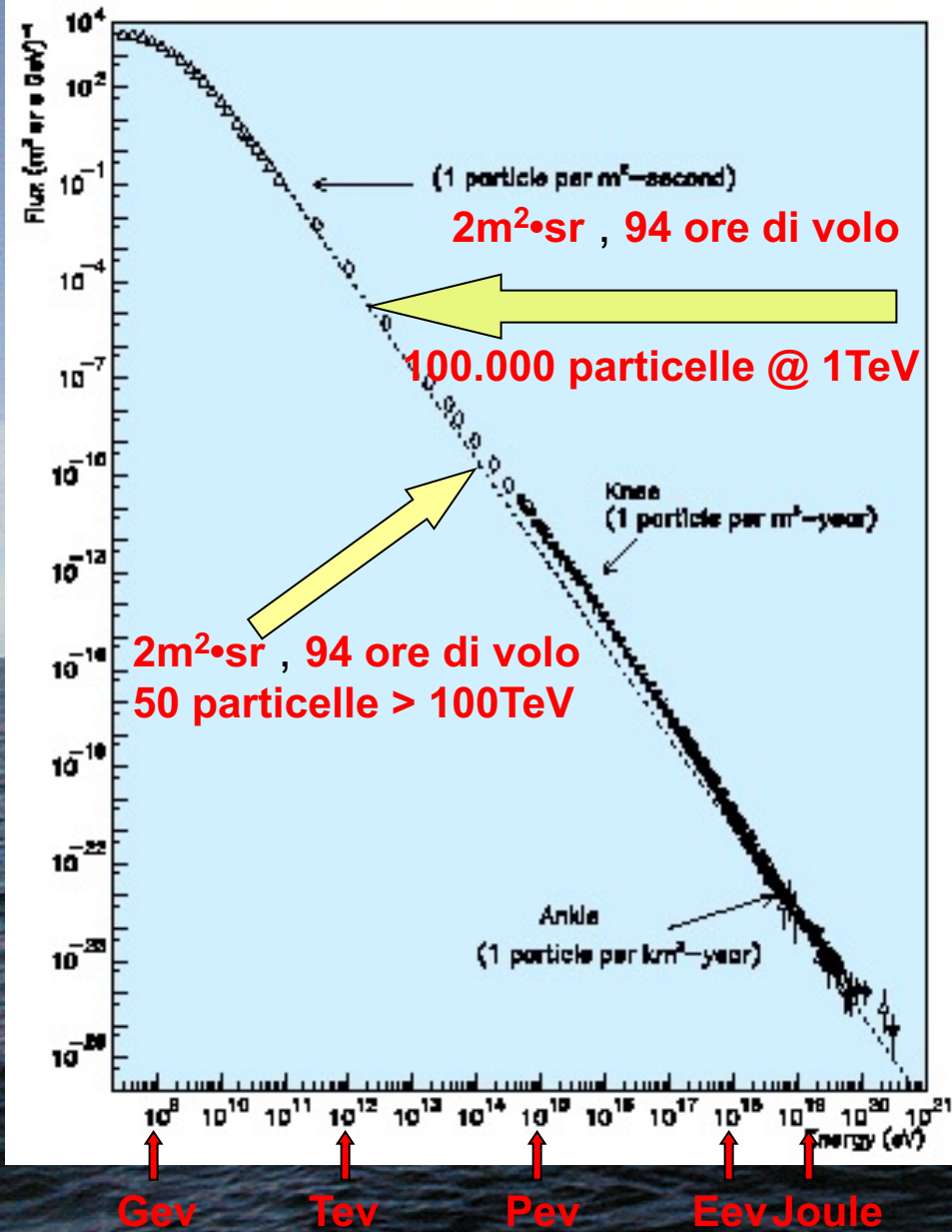


evidenza di un flusso di antiprotoni nei R.C. primari ma ... compatibile con quelli aspettati dalle interazioni





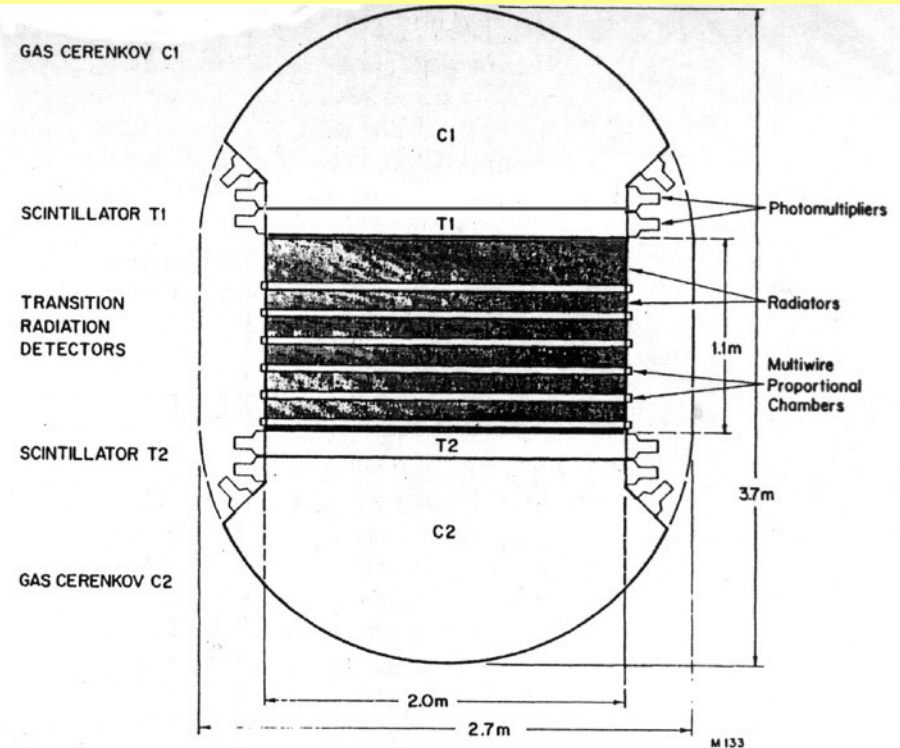
# Rivelazione di raggi cosmici primari con $E \leq 1-10$ TeV



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,

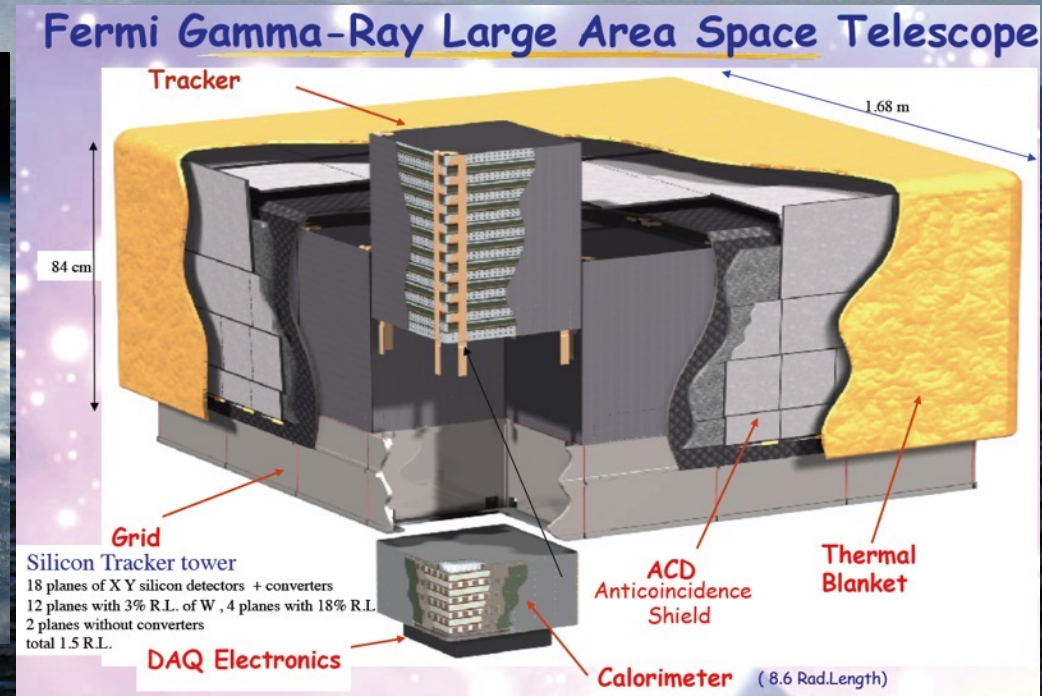
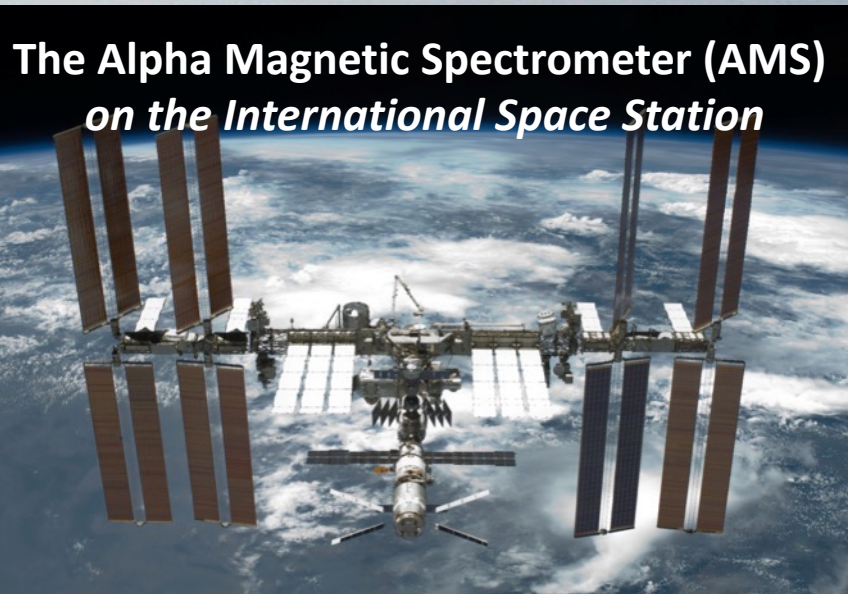
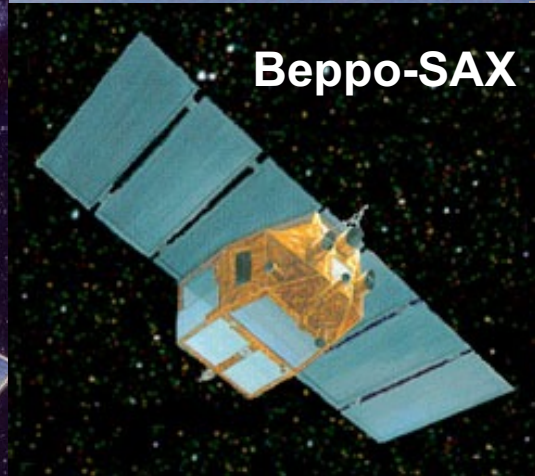
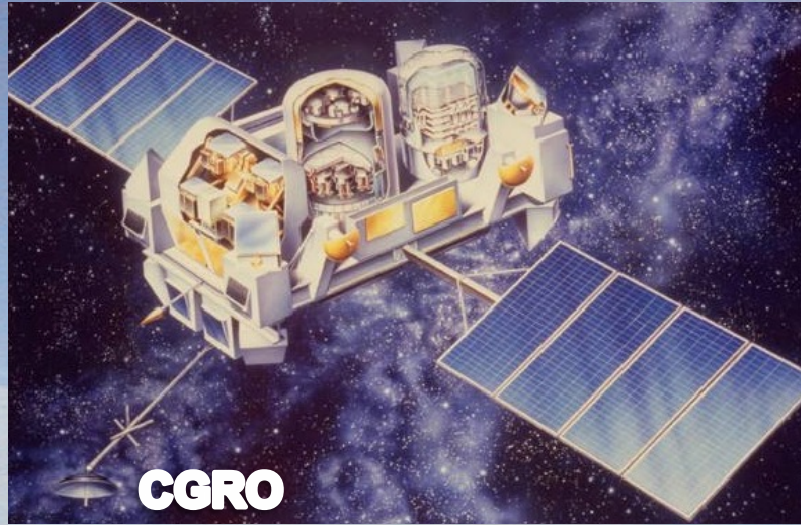
**Il primo apparato per lo SpaceLab -->  $2\text{m}^2 \cdot \text{sr}$**



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*.)

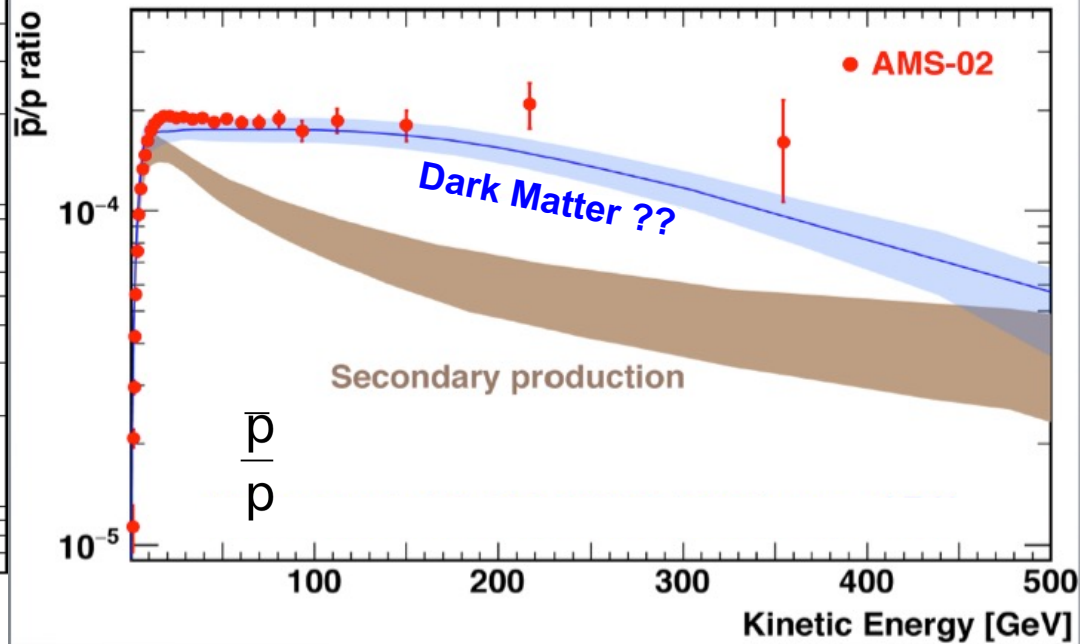
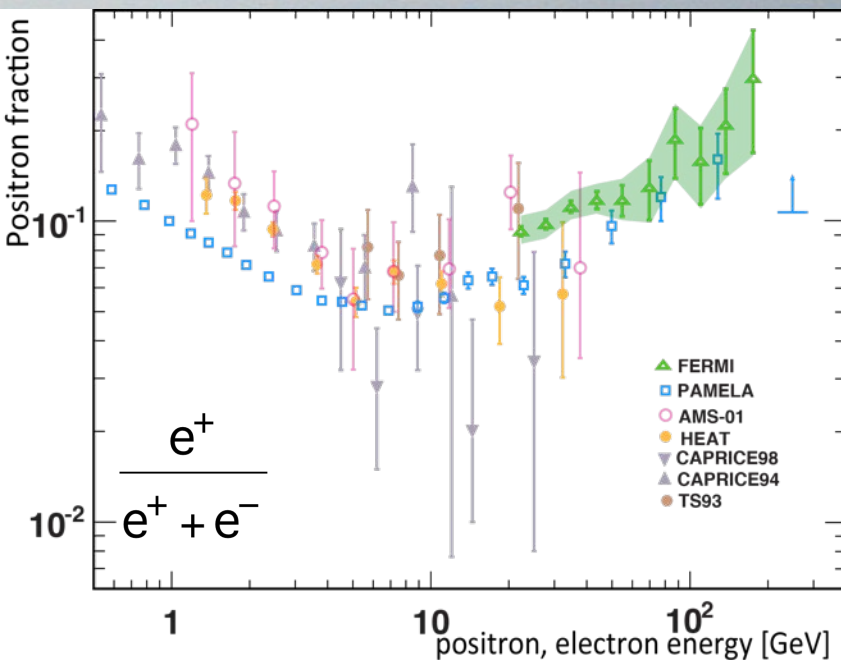
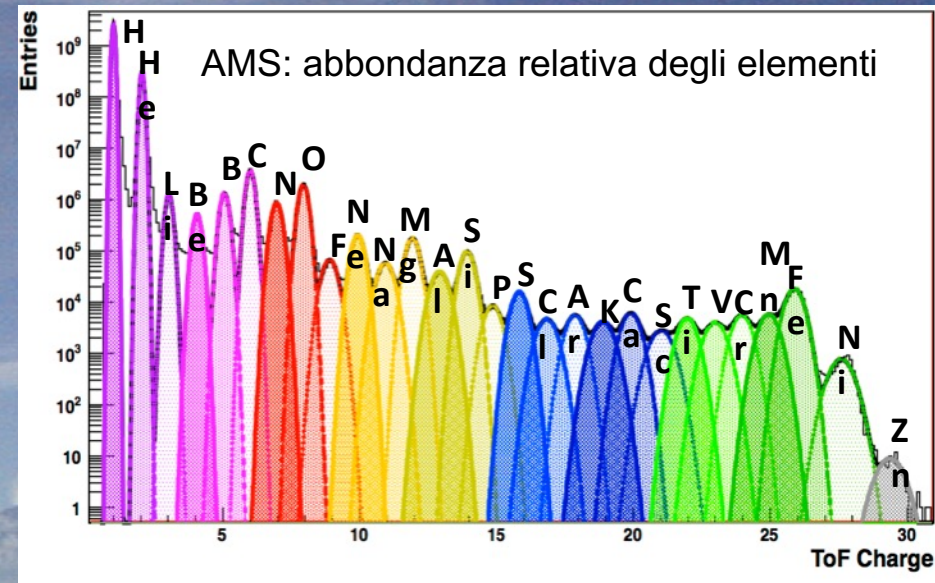
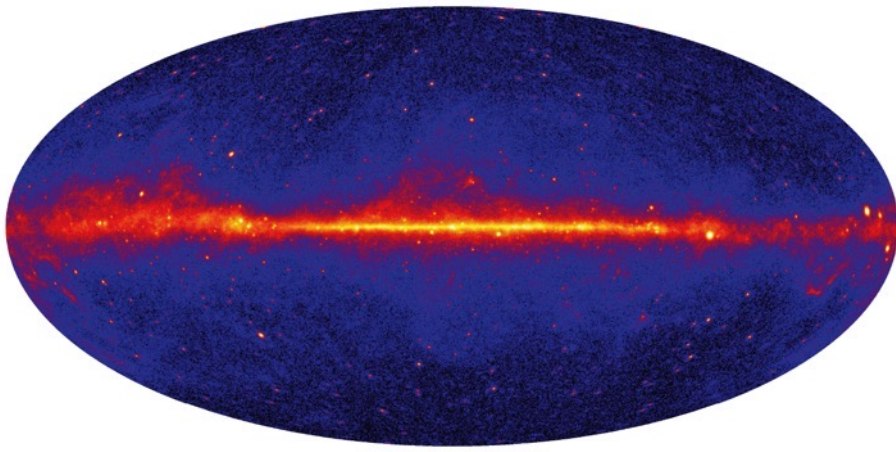


# Recenti ed attuali esperimenti per lo studio dei R.C. primari



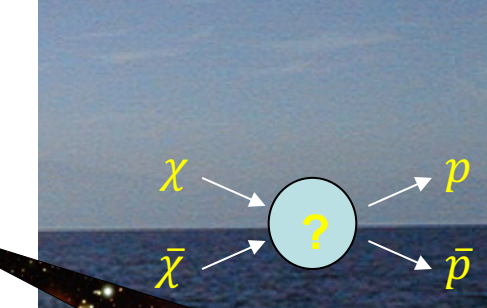
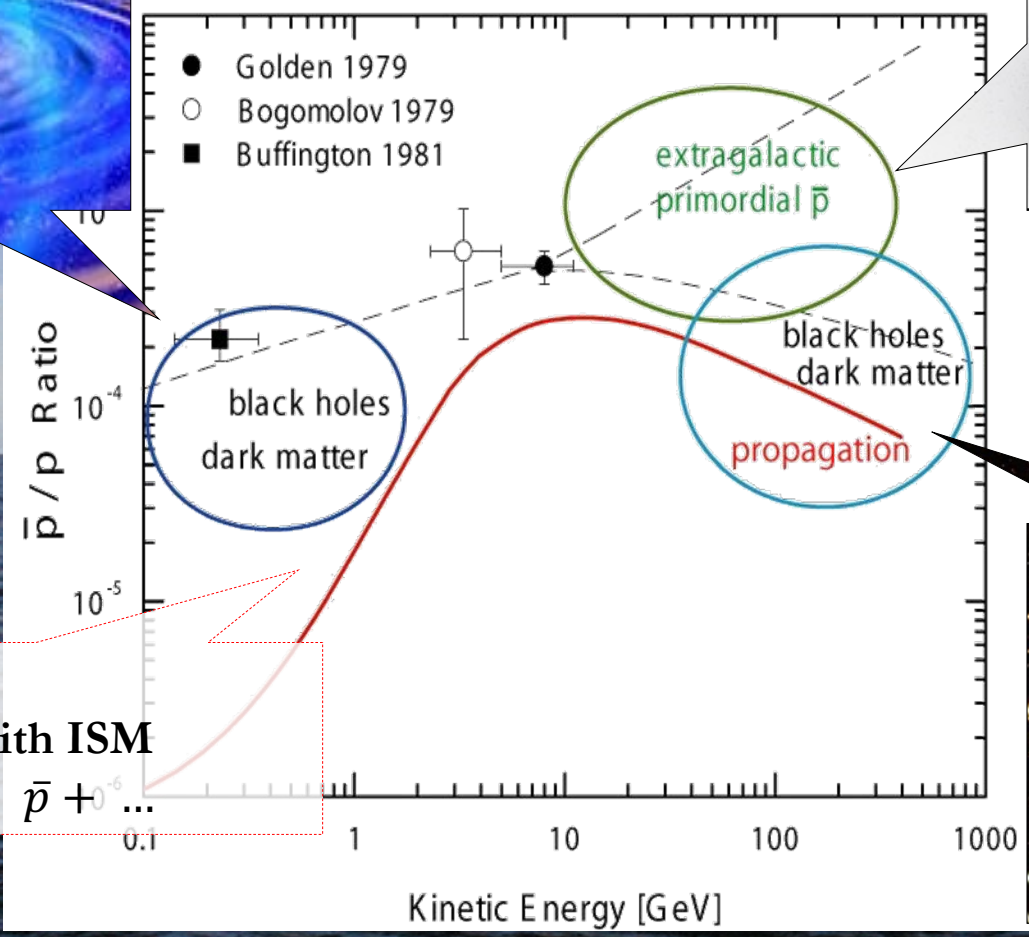
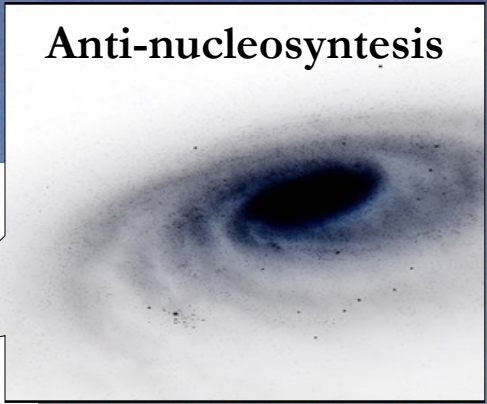


# Risultati selezionati da esperimenti nello spazio





# Possibili "sorgenti" di antimateria nei Raggi Cosmici



**Background:**  
CR interaction with ISM  
 $CR + ISM \rightarrow p + \bar{p} + \dots$

## MATERIA OSCURA ???

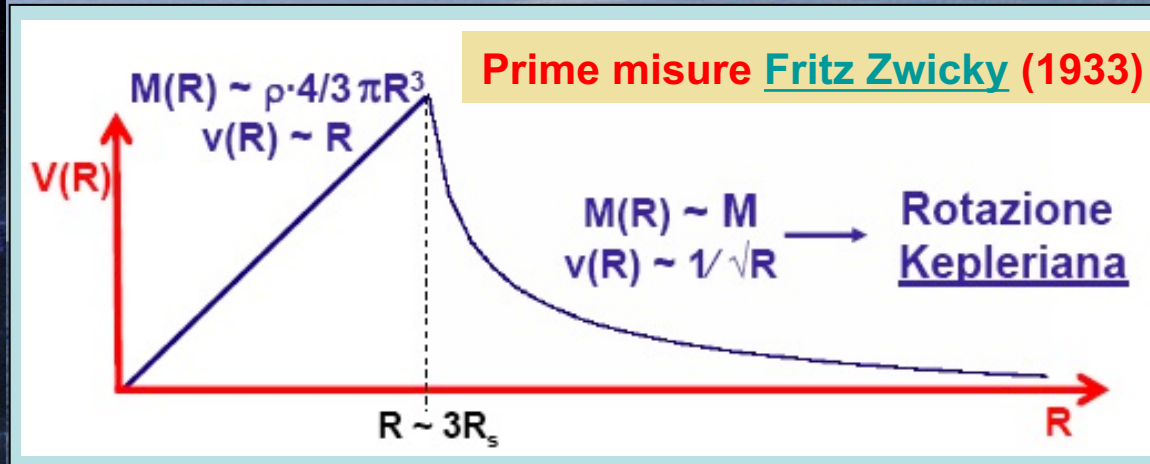


# Non tutto è ben compreso nell'Universo ....

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

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

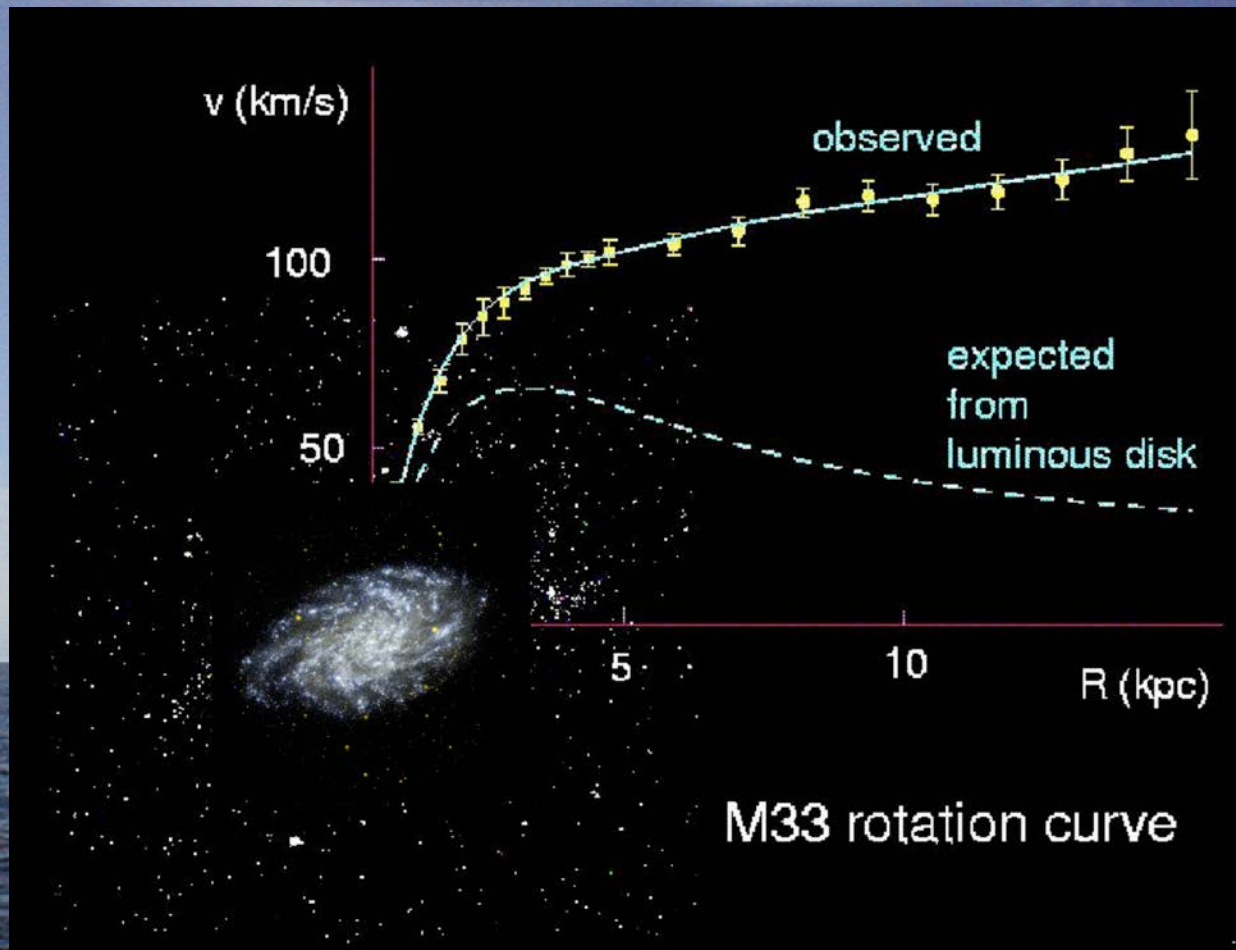
*acc. centripeta*                      *acc. gravitazionale*



*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.*



# Evidenza di Materia Oscura nelle Galassie

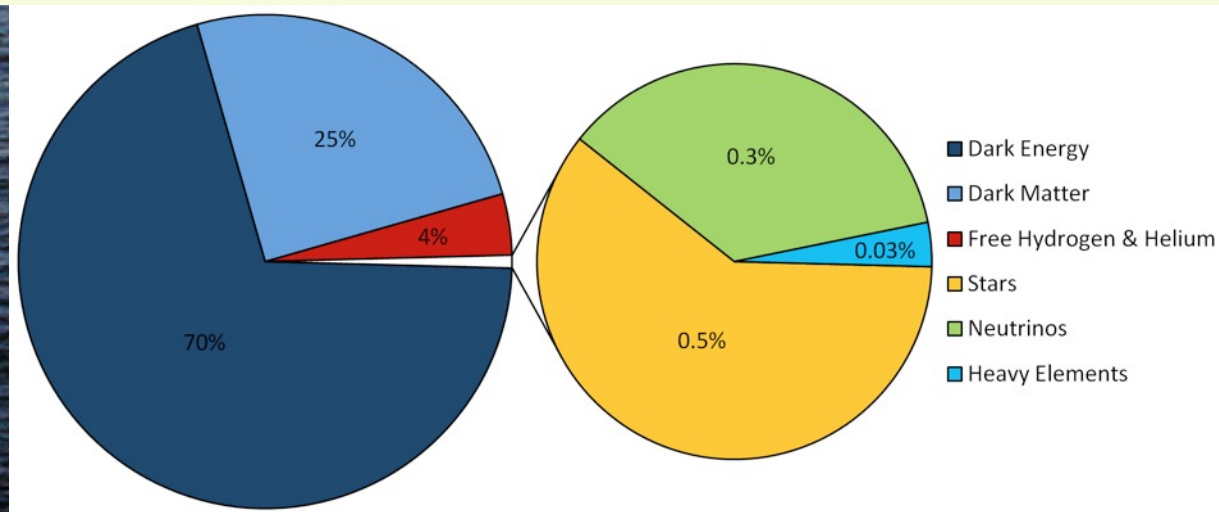


Le osservazioni evidenziano la presenza di un **alone di materia oscura** (“dark halo”). La materia oscura contenuta nell’alone contribuisce a determinare la “forza centripeta” e costituisce un “legame gravitazionale” che permette alle stelle della galassia, anche le più lontane, di conservare una velocità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

# Evidenza di Materia Oscura nelle Galassie

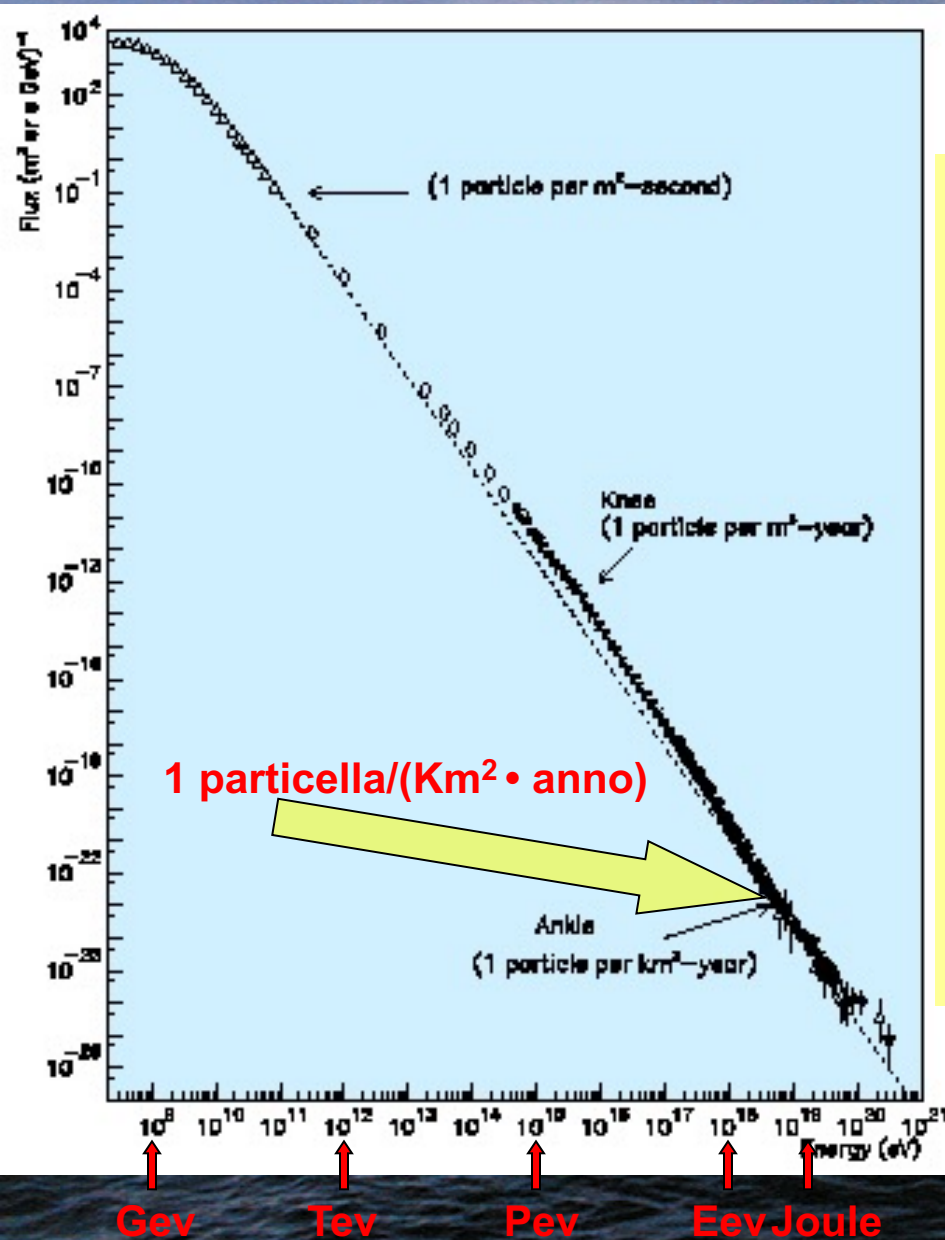
## Questioni aperte:

- 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 della **dark matter** e/o **dark energy**, tanti programmi sperimentali, agli acceleratori e non, cercano di acquisire informazioni sulla loro natura.





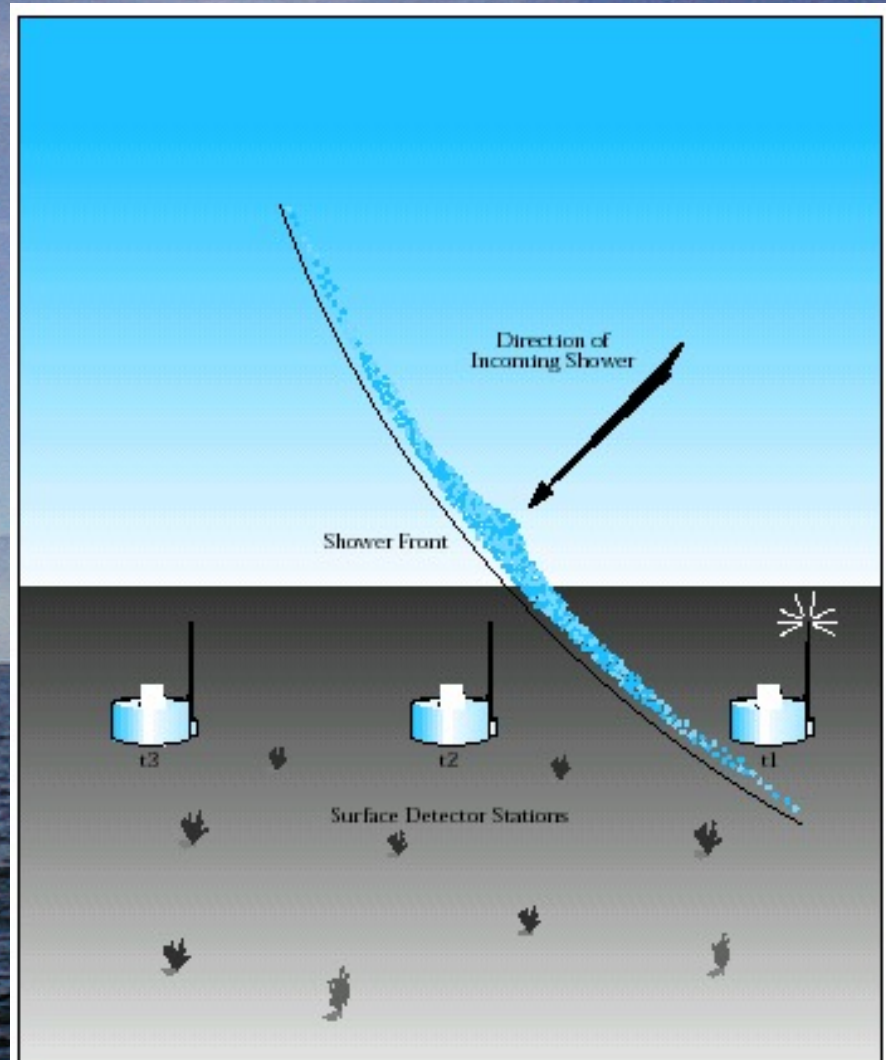
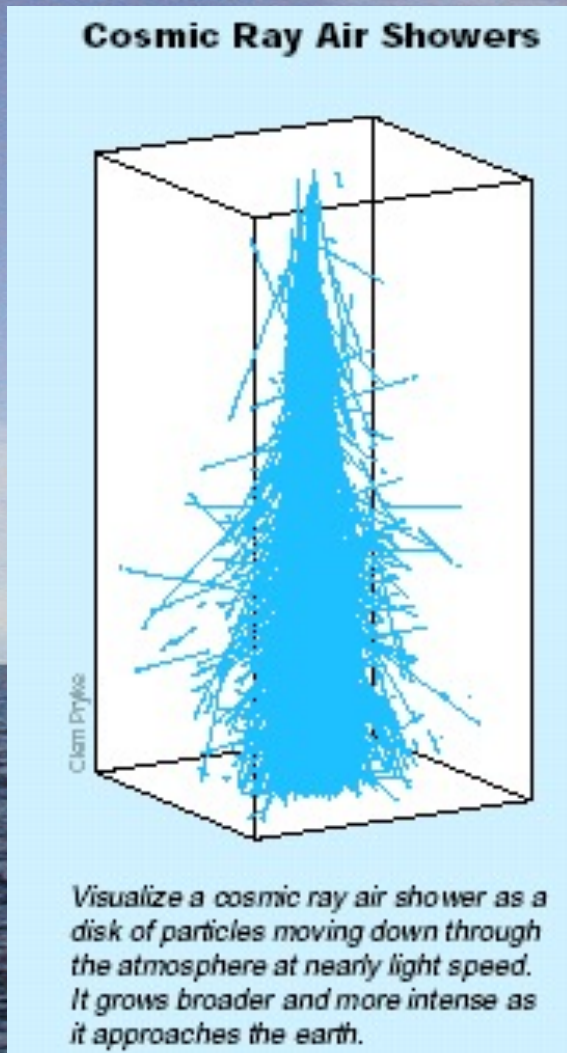
# Rivelazione di raggi cosmici di altissima energia ( $E > 100\text{TeV}$ )



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

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

# Rivelatori per sciami 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” ( $\gamma$ ,  $p$ , He, ...) del R.C. “padre”.

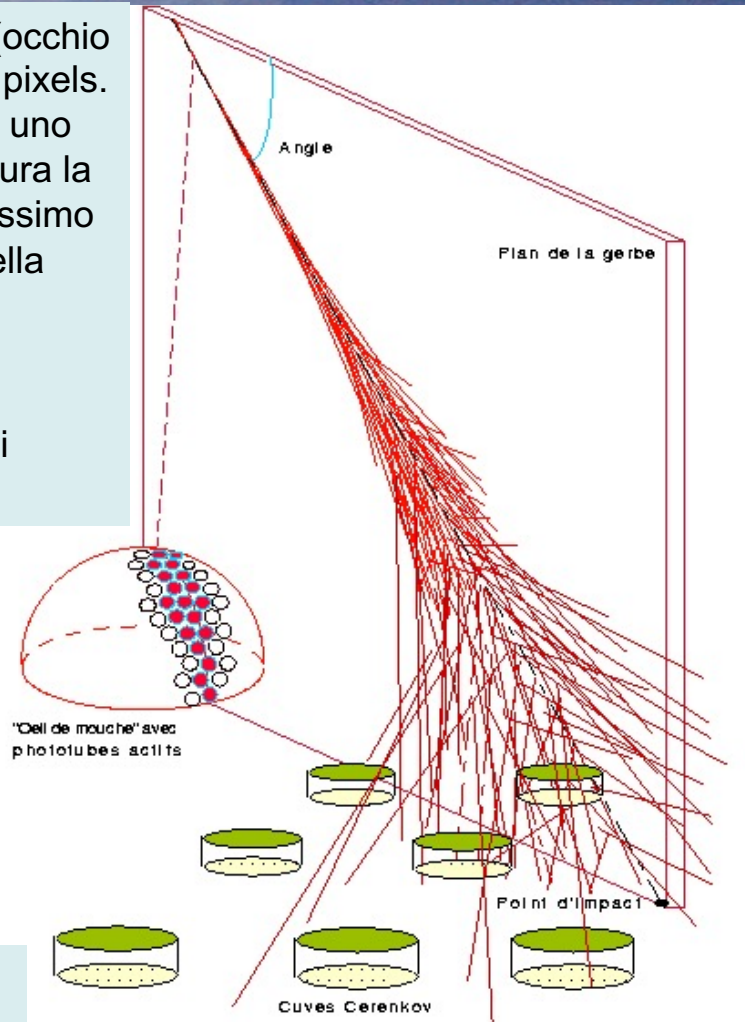
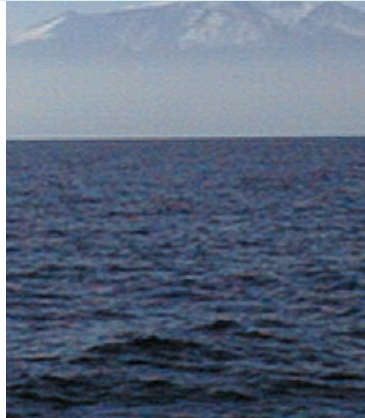
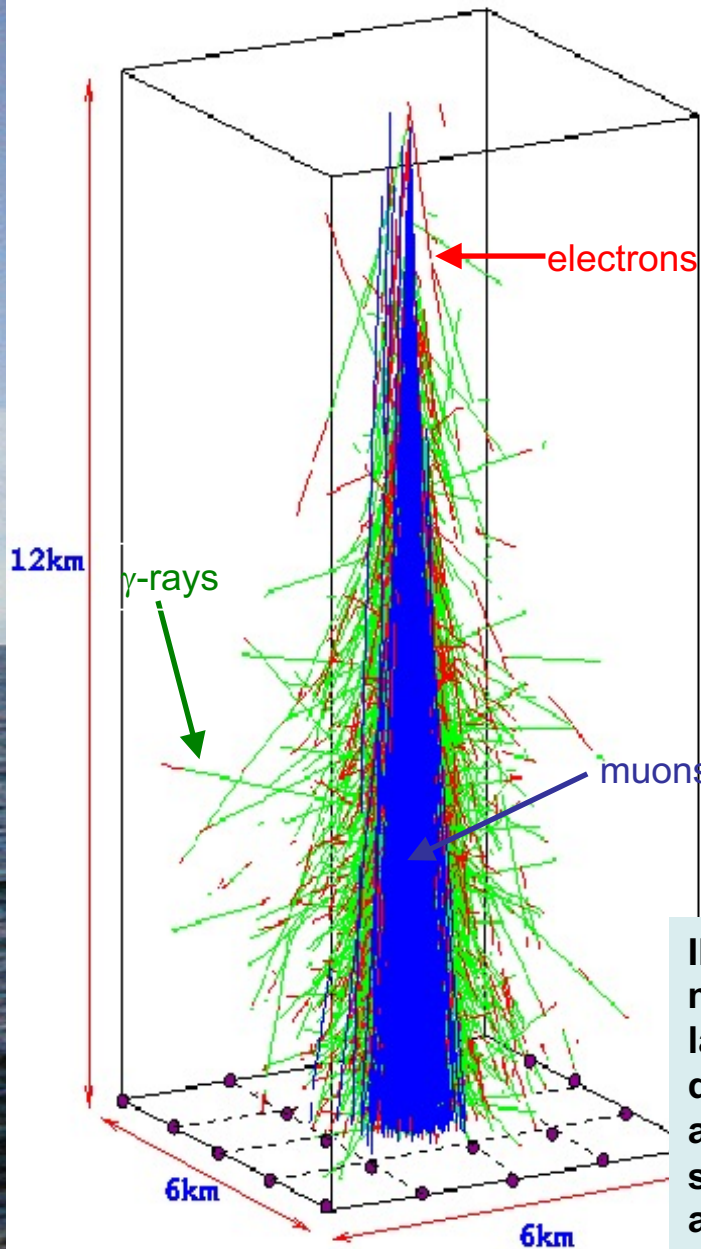


# Sciame di Alta energia nell'atmosfera e loro Rivelazione

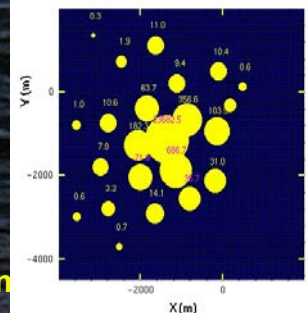
Il rivelatore tipo Fly's Eye (occhio di mosca) è composto da pixels. Ogni pixel riceve la luce in uno stretto angolo solido e misura la luce di fluorescenza. Il massimo dello sciame è funzione della energia del primario  $E_p$ .

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

dove  $X_0$  dipende dal tipo di primario

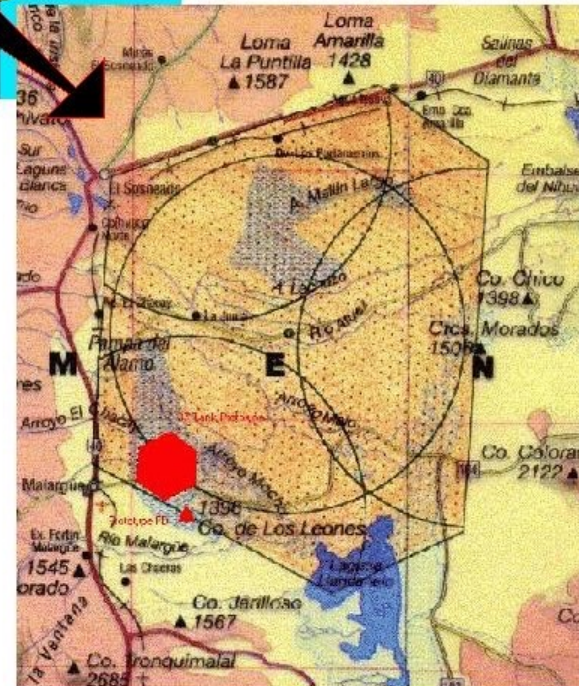
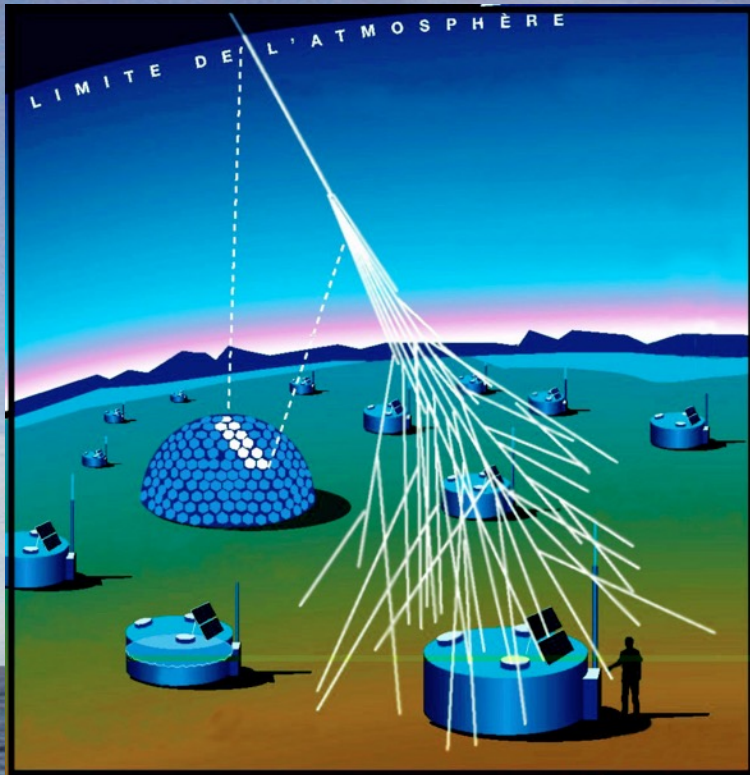


Il rivelatore di superficie misura la distribuzione laterale delle particelle. La densità di energia misurata a 600m dal centro dello sciame è proporzionale all'energia del primario  $E_0$





# L'Osservatorio Pierre Auger in Argentina.



Contour of site (3000 km<sup>2</sup>-sq)

In red: engineering array

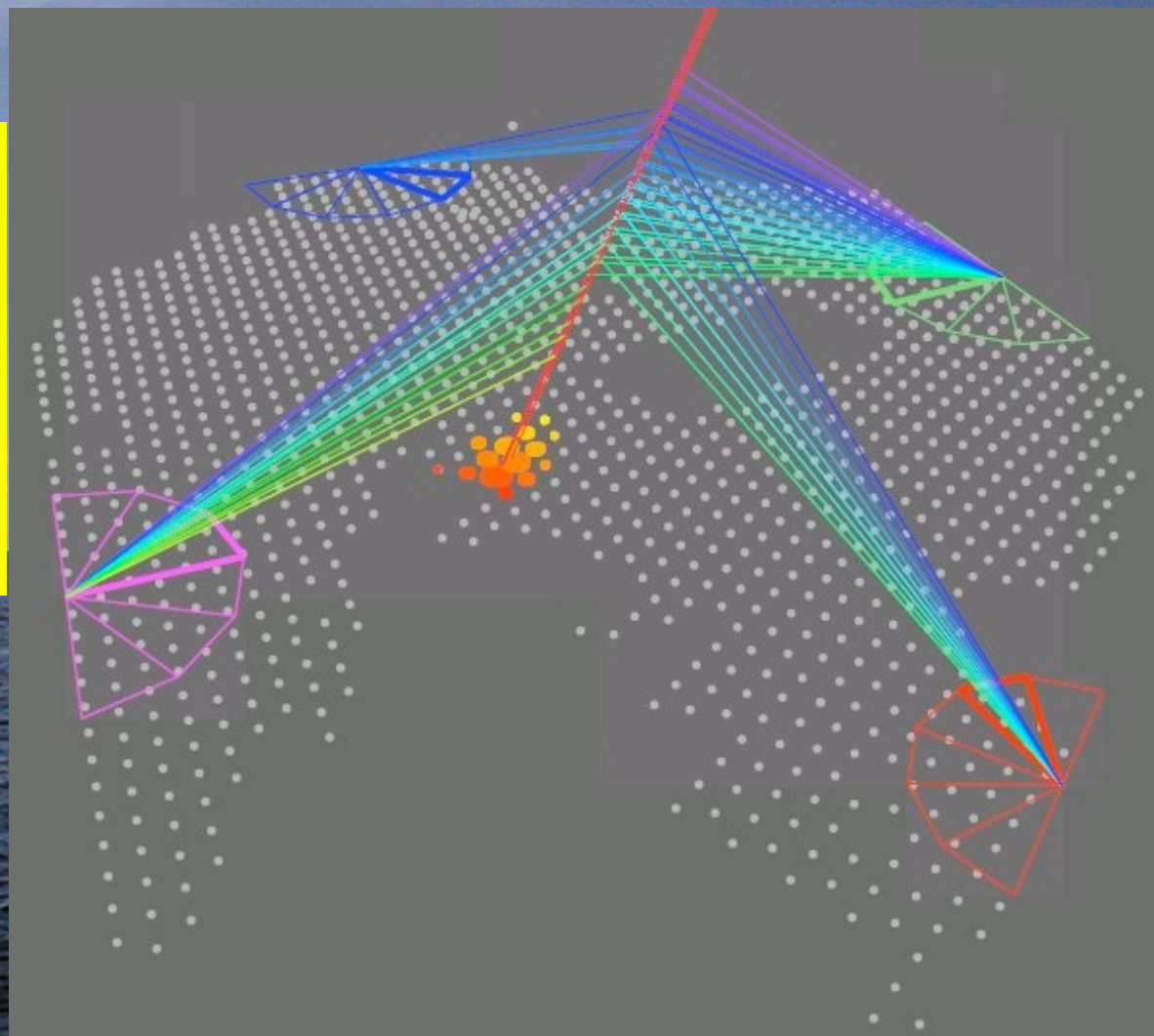
Circles: average range of the fluorescence det.

Dots: the 1600 detector stations (tanks)

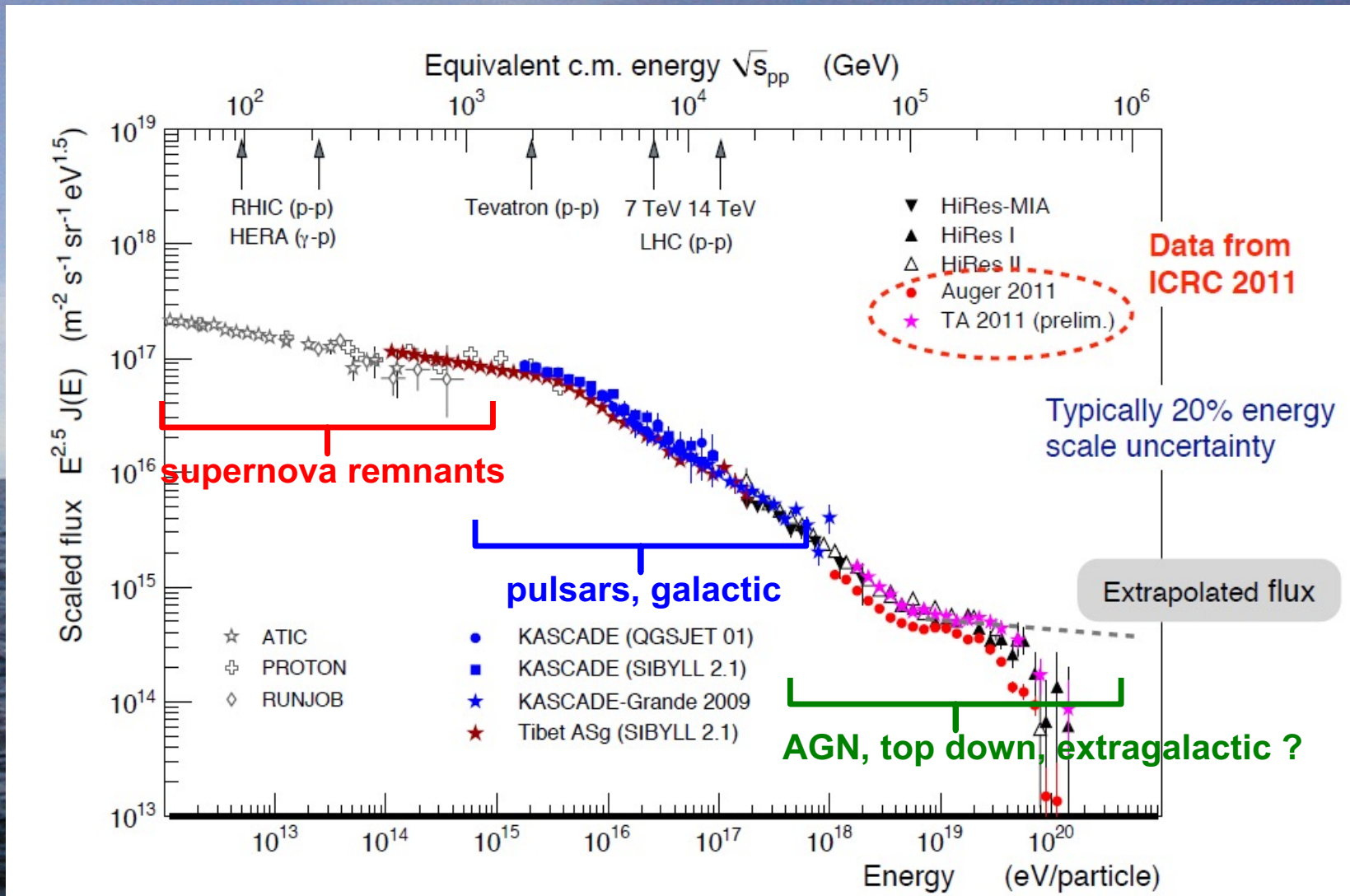


# Un "Golden Event" visto dall'Osservatorio Pierre Auger

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



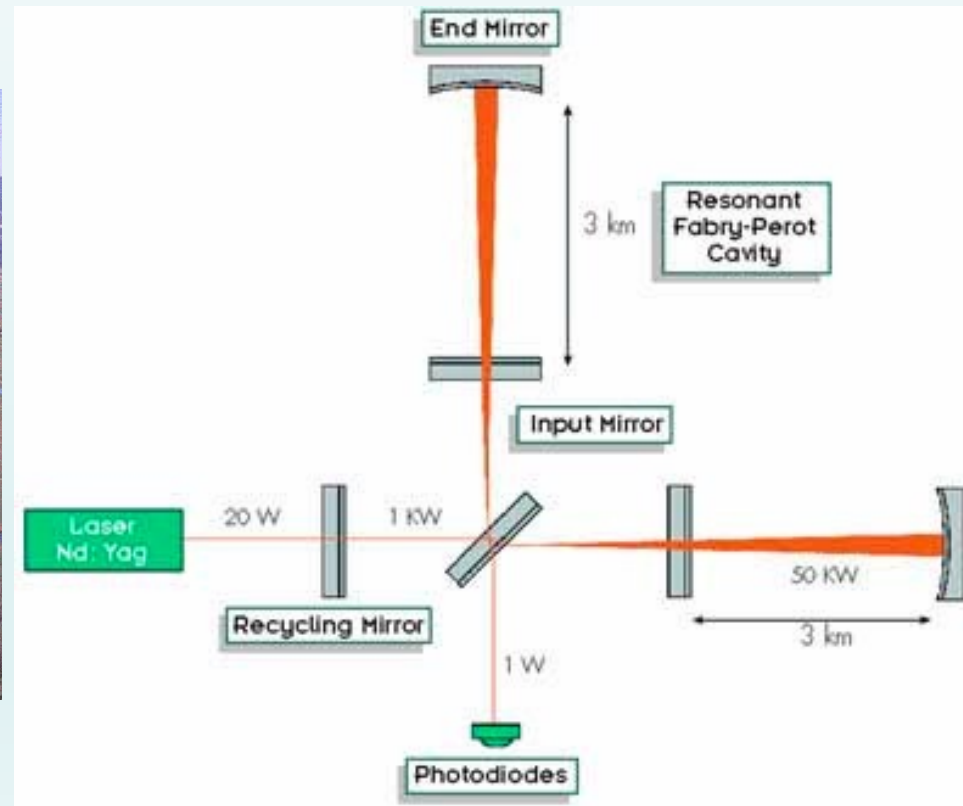


# Dal Cosmo ci aspettiamo anche le onde gravitazionali

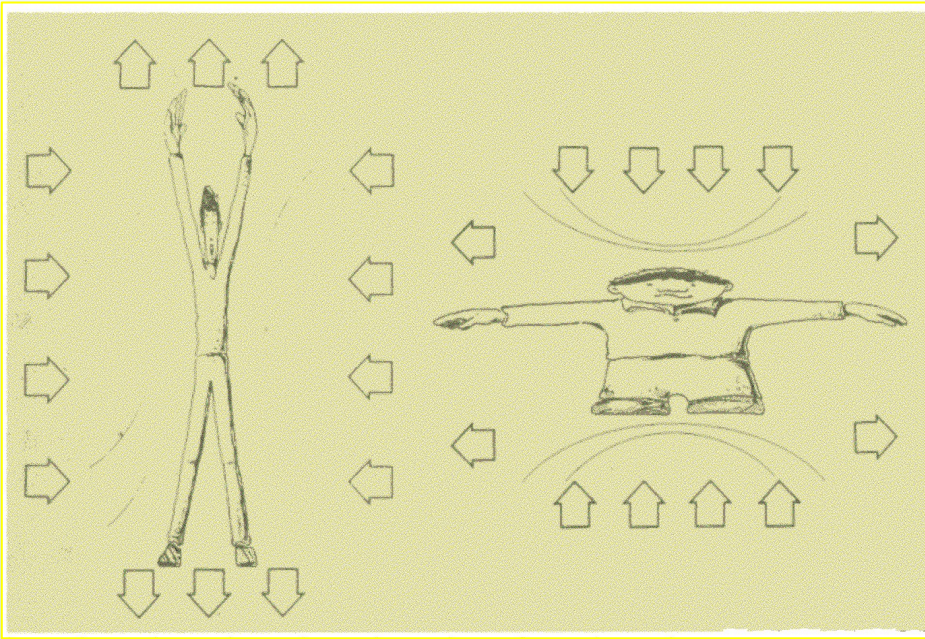
**Interferometro di Michelson:** due fasci di luce laser, provenienti dai due "bracci", vengono ricombinati in opposizione di fase su un rivelatore di luce in maniera che, normalmente, non arrivi luce sul rivelatore. Un'onda gravitazionale varia la lunghezza dei "bracci". La variazione del cammino ottico, 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.



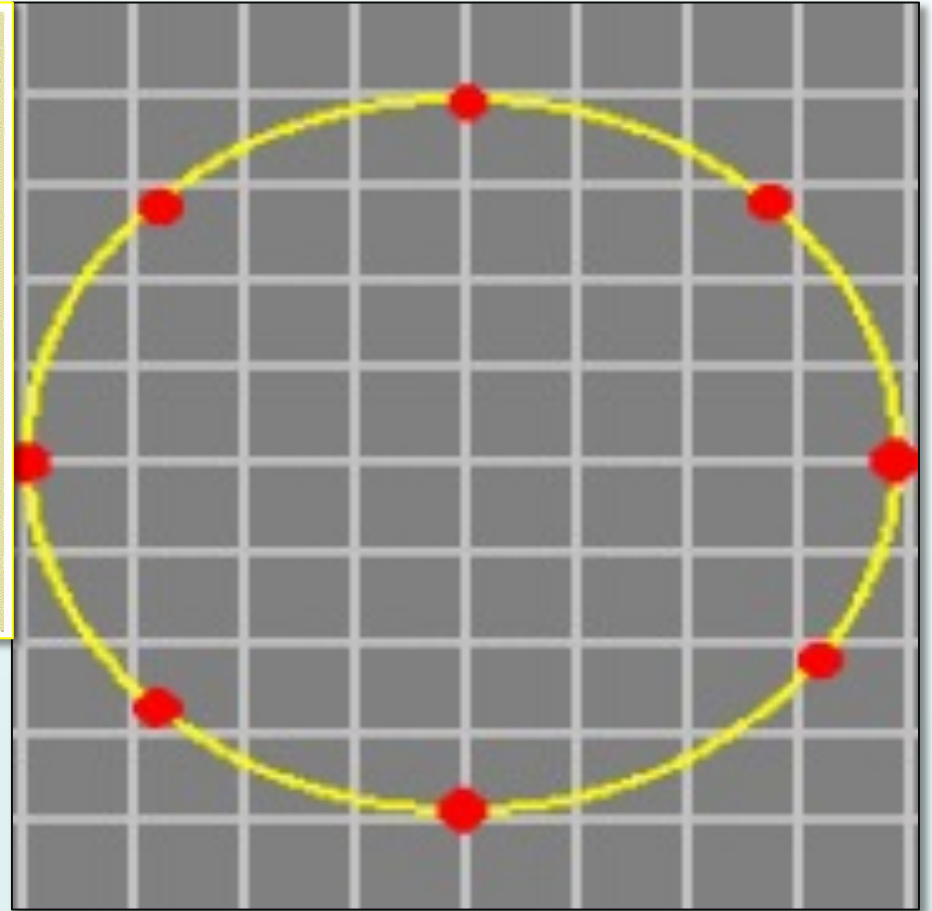
Interferometro Virgo, costruito a Càscina, nei pressi di Pisa.



# Deformazioni da ... onde gravitazionali

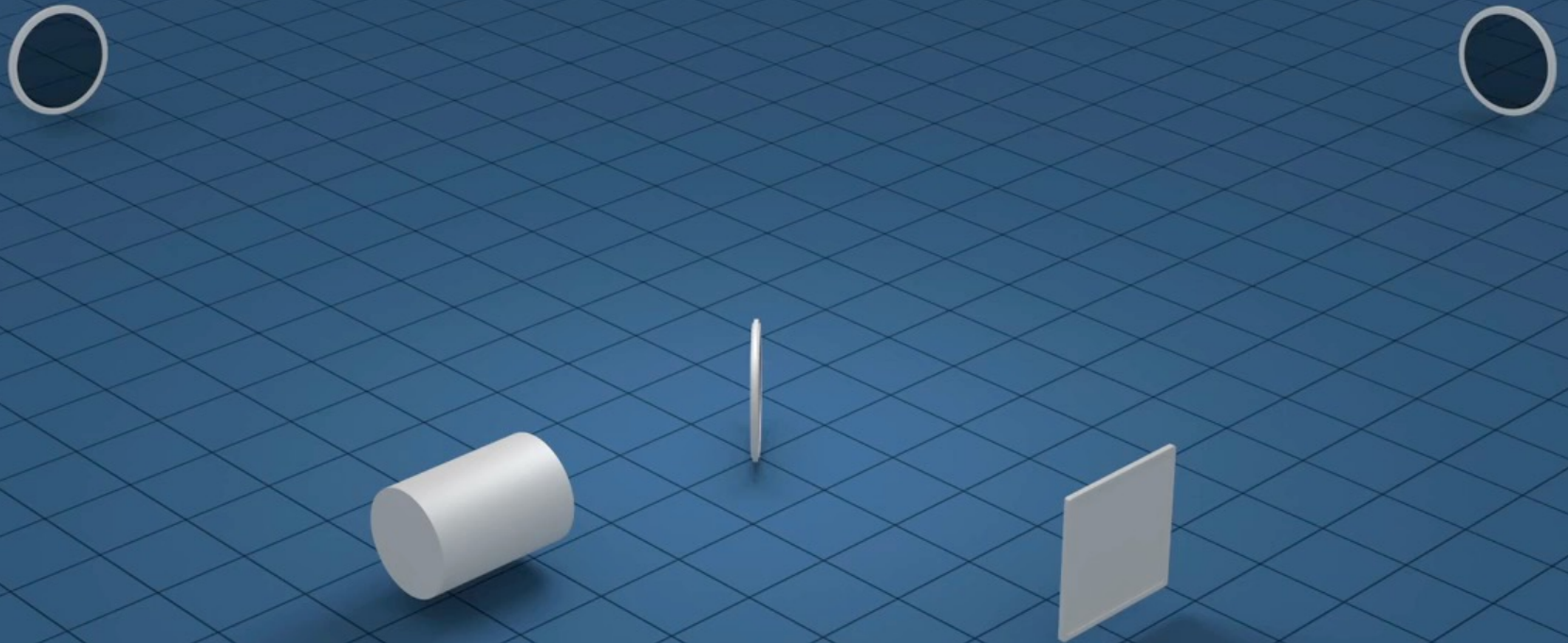


La deformazione potrebbe essere molto piccola  $\Delta L/L \sim 10^{-23}$  !

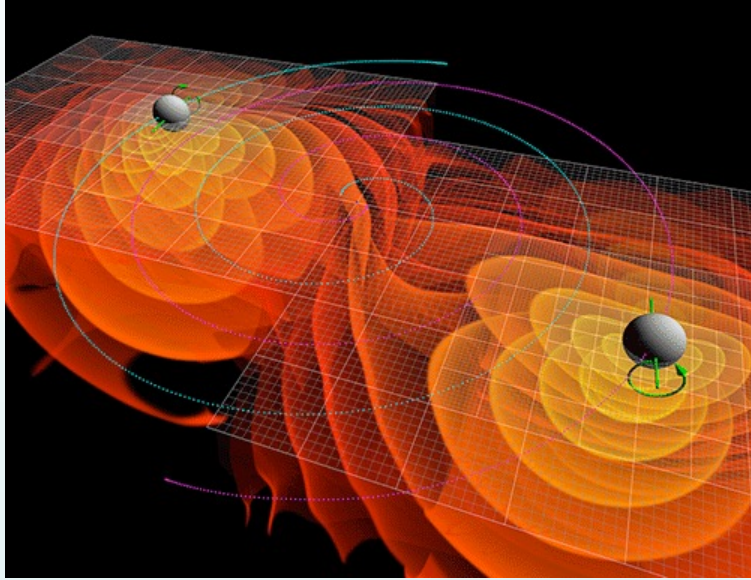




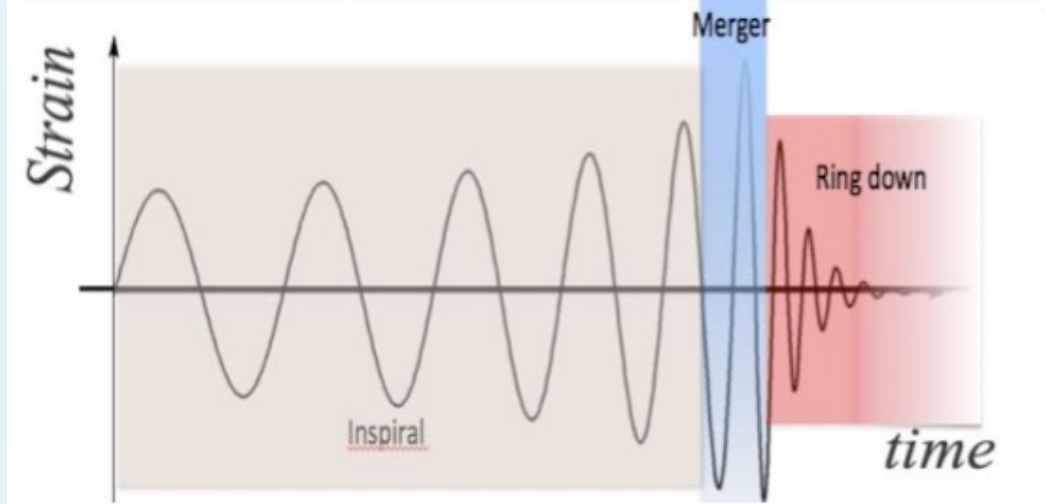
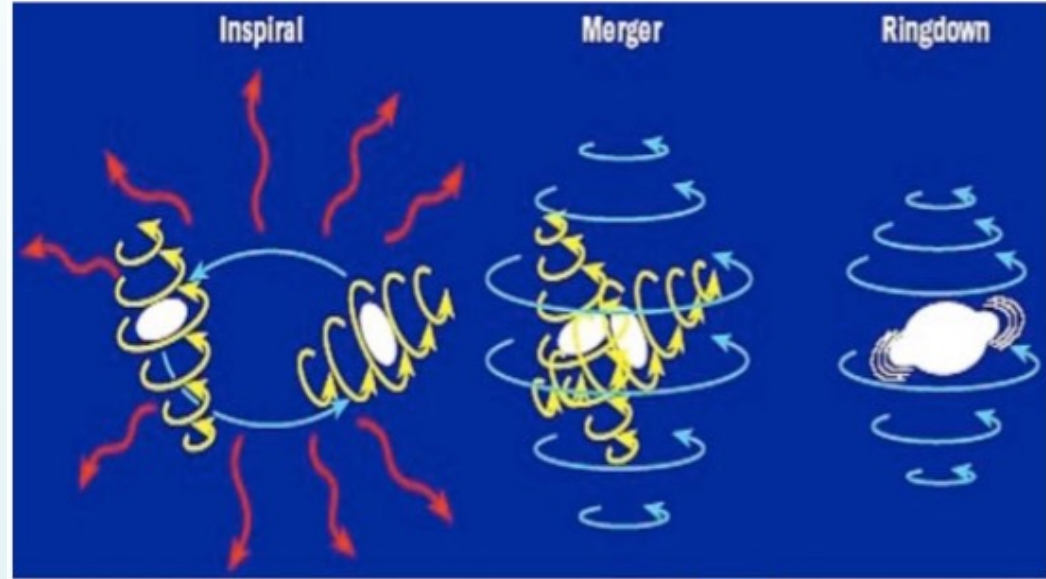
# Deformazioni da ... onde gravitazionali



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



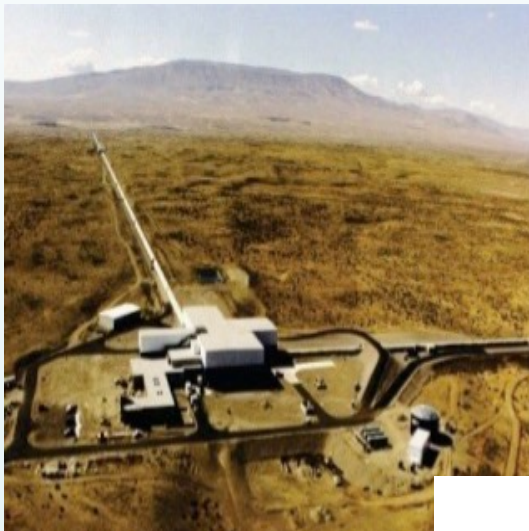
Avvicinamento, e mescolamento di due "buchi neri": la rivelazione dell'onda gravitazionale così generata ha aperto la strada ad una nuova epoca di osservazioni astronomiche



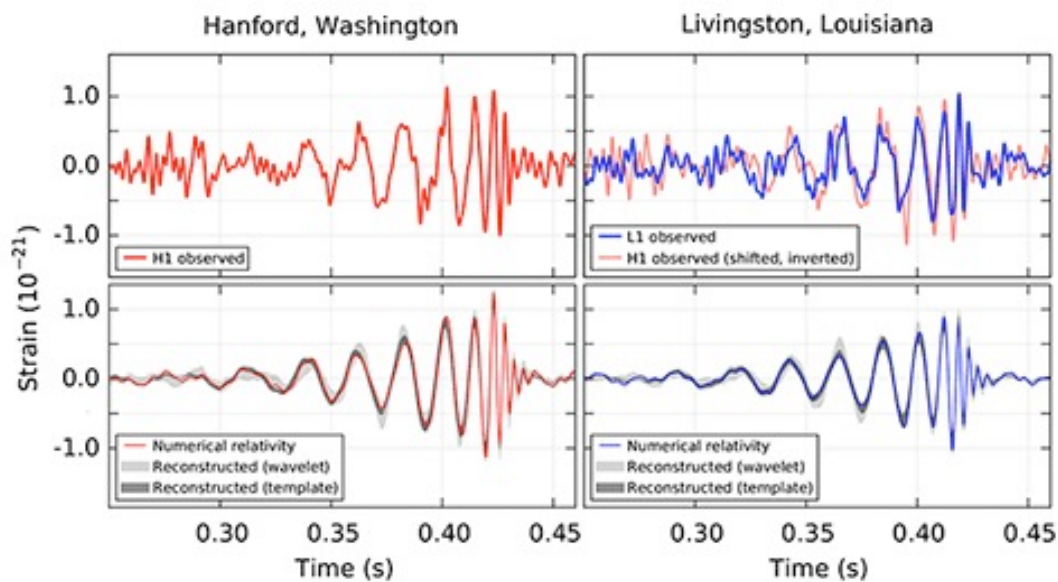


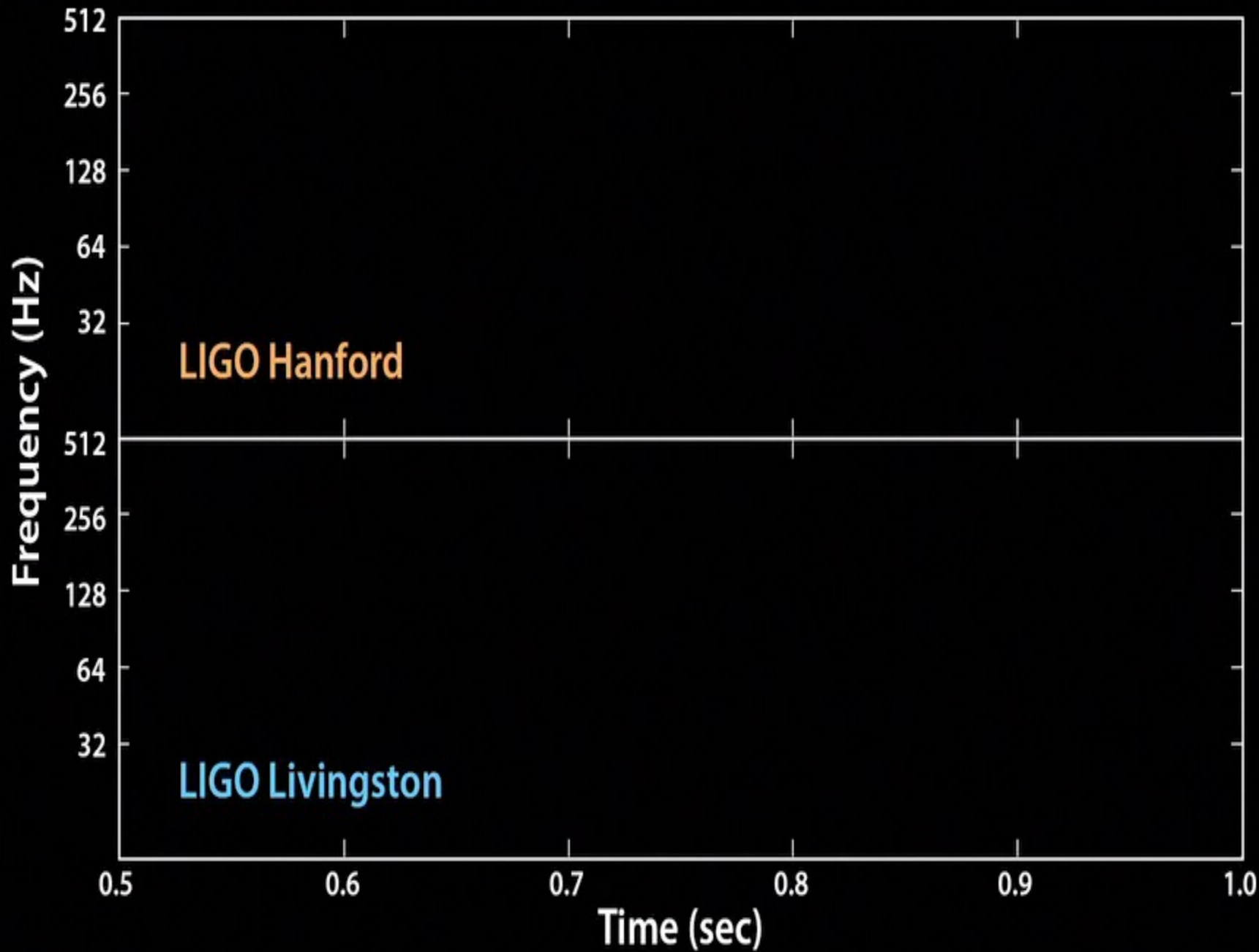
# Il primo evento "GW" osservato

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**

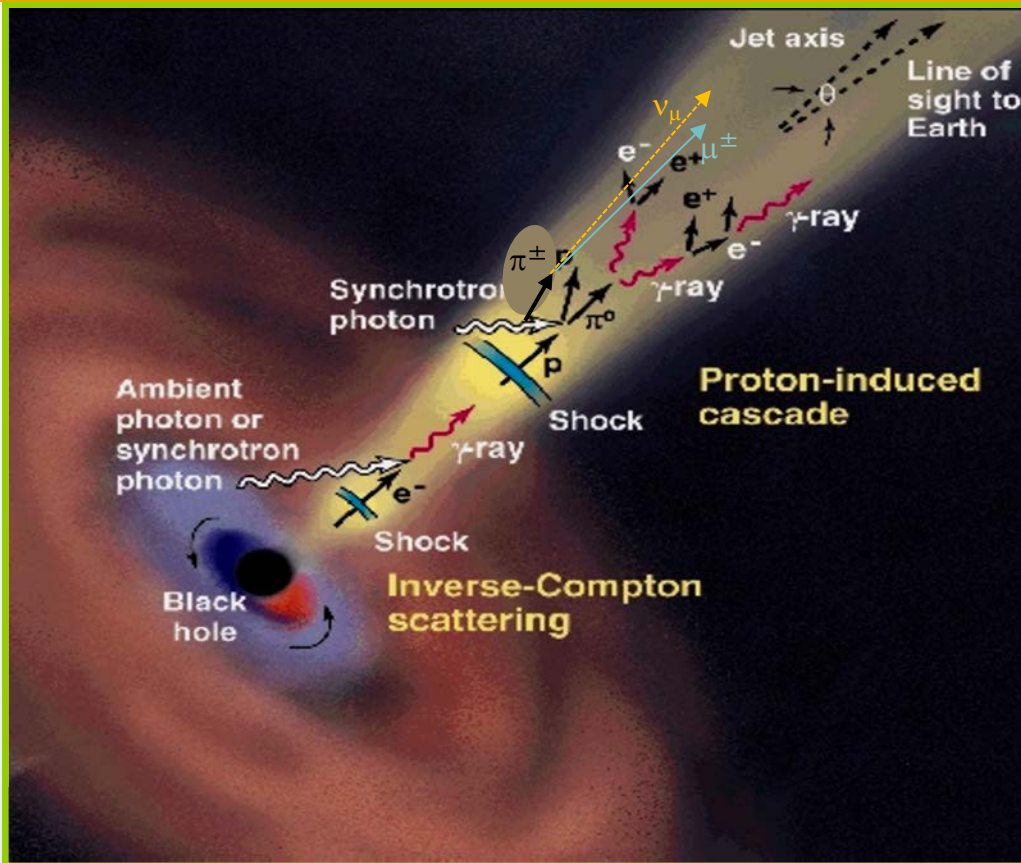






# 17 agosto 2017: coalescenza fra due Stelle di neutroni

# Quali processi di accelerazione?, Dove ?



## “Acceleratori” di particelle di altissima energia:

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

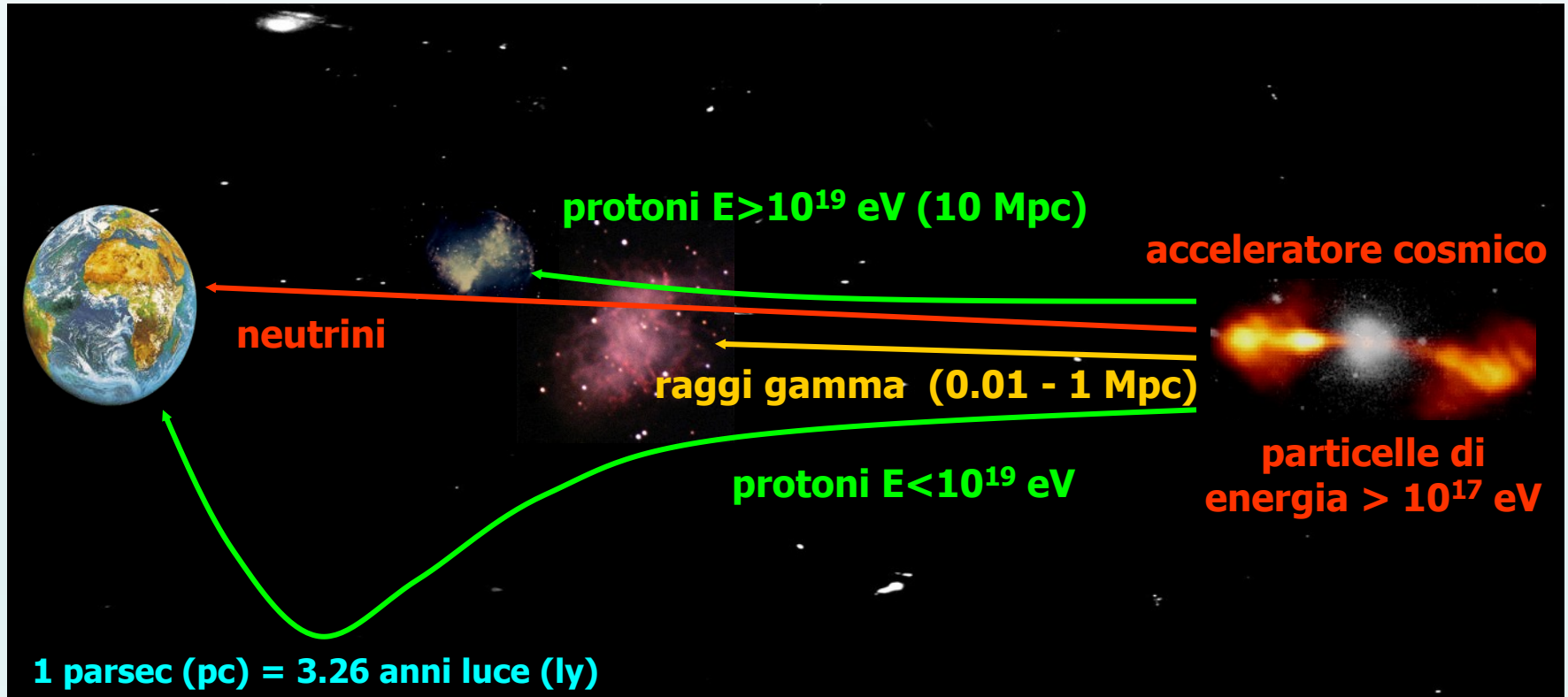


Sorgenti di particelle di altissima energia che emettono continuamente, molto lontane dalla Terra, al di fuori della nostra Galassia ...  
**Come osservarle ???**



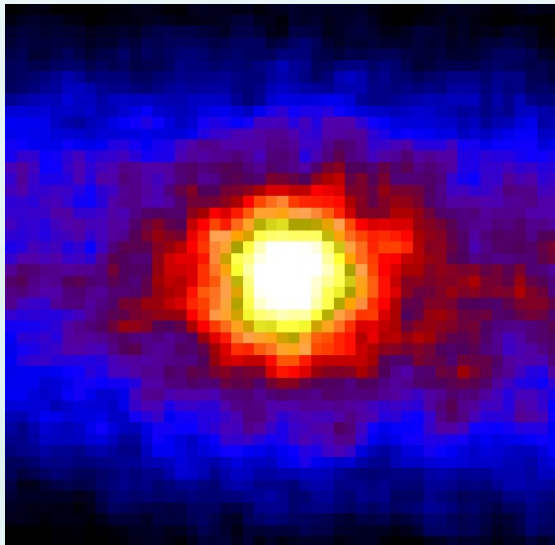
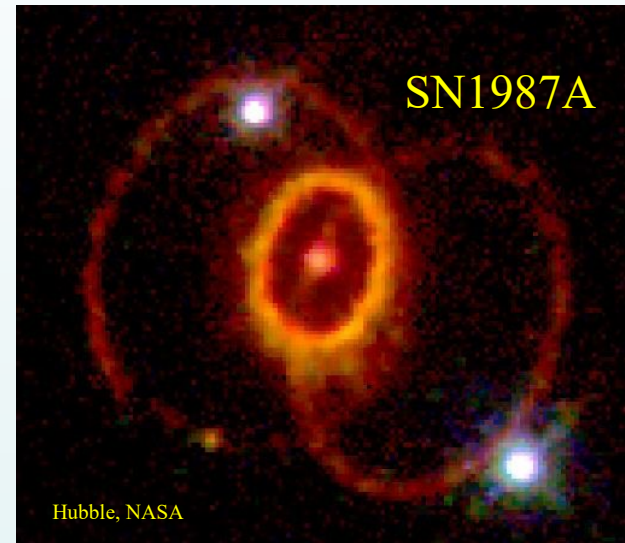
# Diverse particelle, diversi orizzonti ...

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



# L'astronomia con $\nu$ è già cominciata ...

**1987: rivelati  $\nu$  prodotti  
da una SuperNovae**



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



# Telescopi per neutrini: programma scientifico

- **Astrofisica con  $\nu$  di alta energia:**

- $\nu$  da sorgenti diffuse nell'Universo
  - $\nu$  da **collassi stellari, AGN, GRB, ... sorgenti non altrimenti note**

Misura di energia e flusso dei neutrini

- $\nu$  da sorgenti puntiformi galattiche/extra-galattiche

Misura di direzione, energia e flusso di  $\nu$

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

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

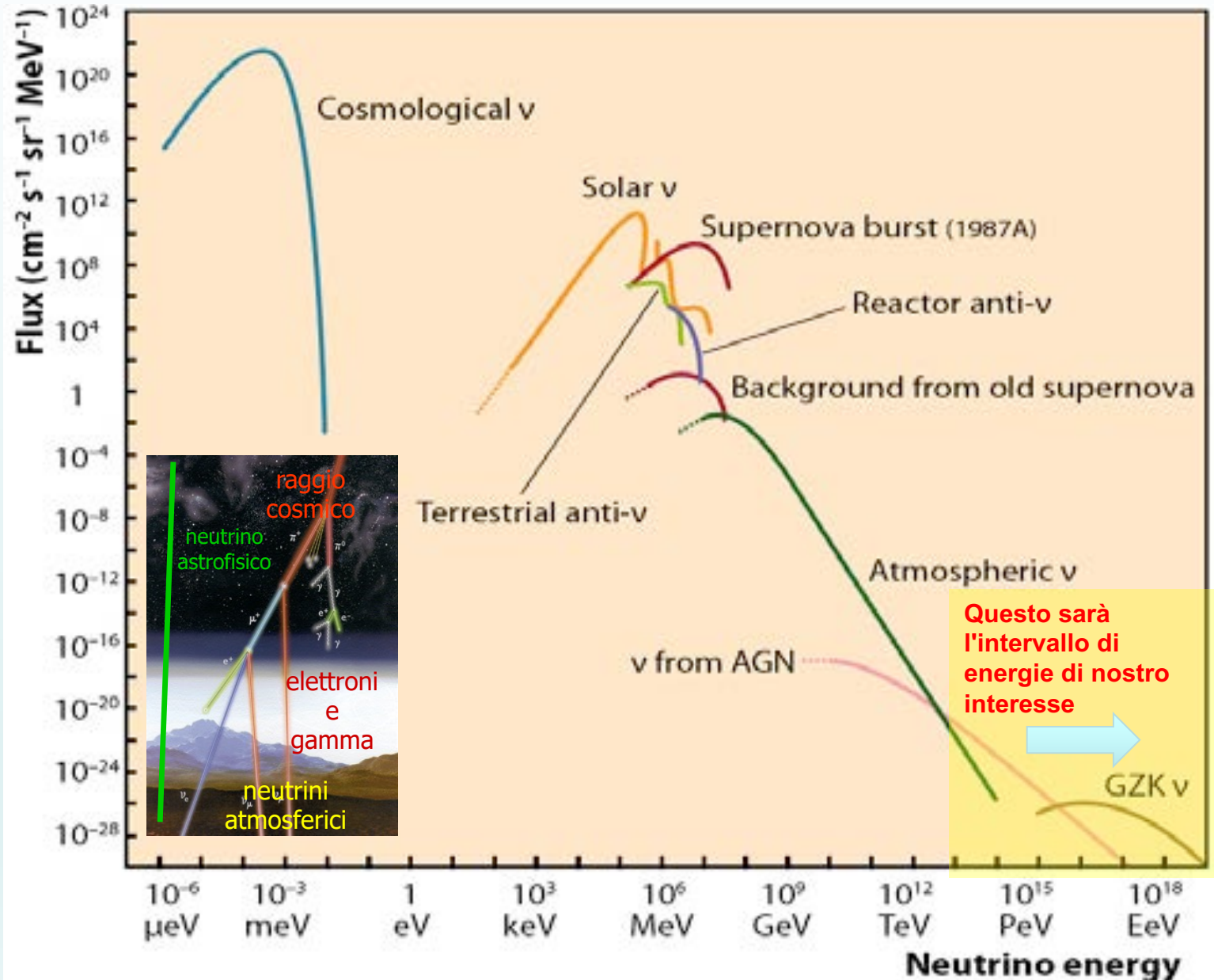
Misura di direzione, energia e flusso di  $\nu$

- **Fisica delle alte energie:**

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

- **Interdisciplinarietà**

# Flussi di neutrini sulla Terra: cosa sappiamo oggi





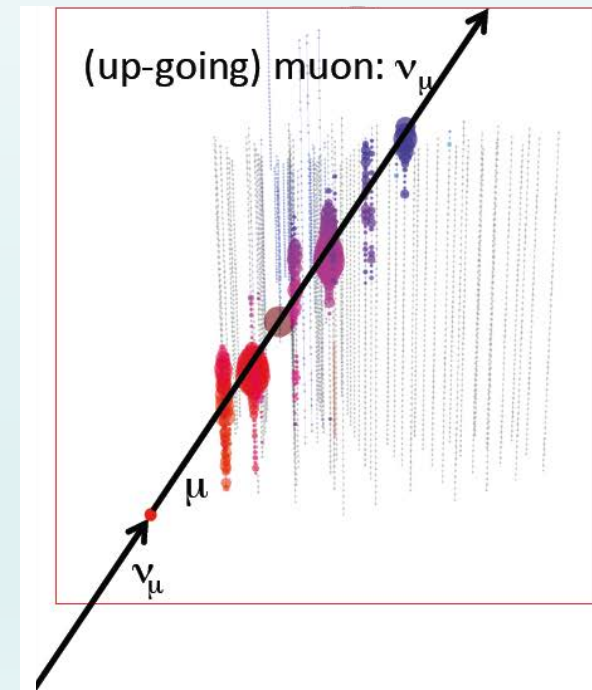
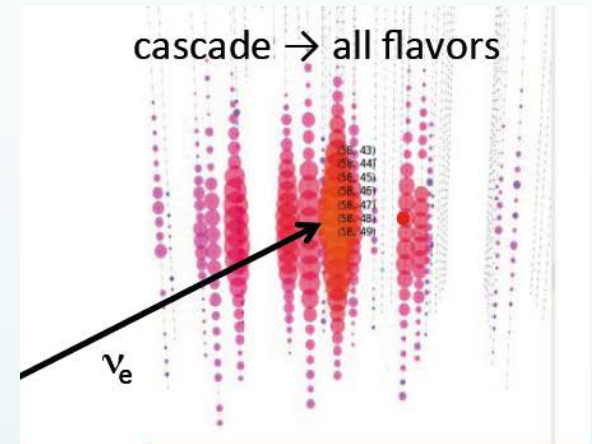
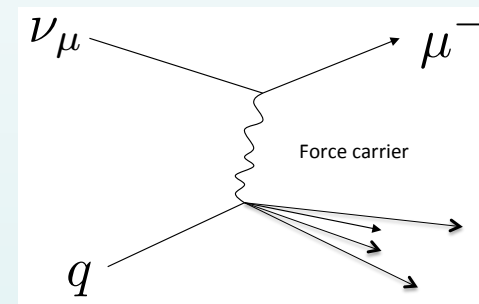
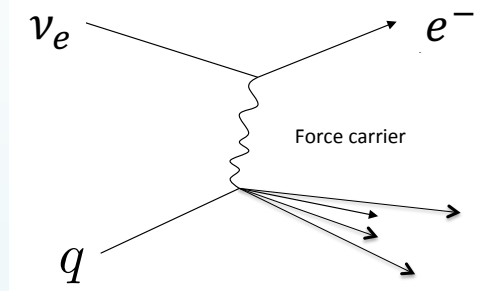
# Come rivelare i neutrini ???

**Elementary Particles**

<b>Quarks</b>	<i>u</i> up	<i>c</i> charm	<i>t</i> top	<b>Force Carriers</b>
	<i>d</i> down	<i>s</i> strange	<i>b</i> bottom	
<b>Leptons</b>	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	<i>g</i> gluon
	<i>e</i> electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	<i>Z</i> Z boson
				<i>W</i> W boson

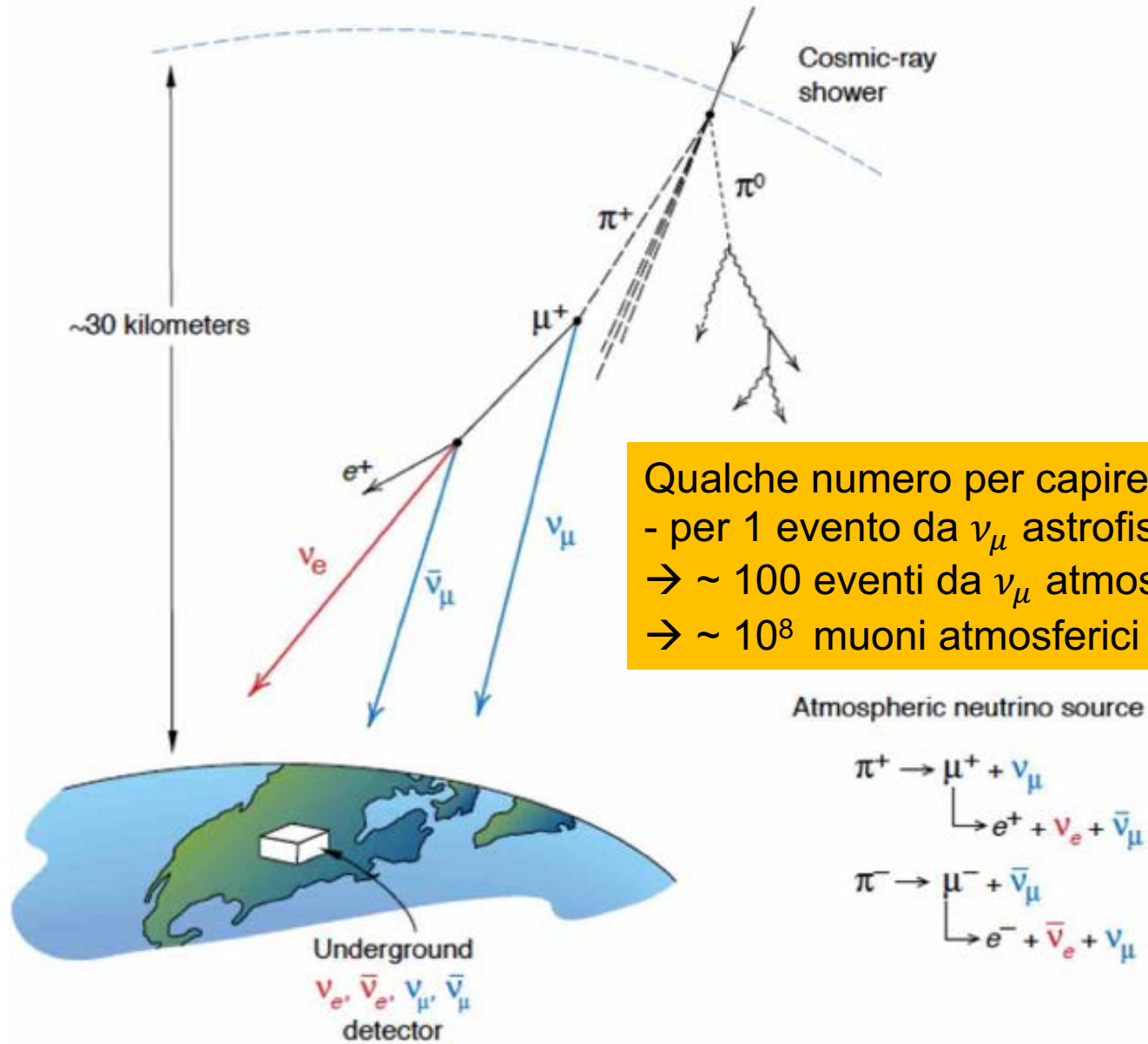
I      II      III

**Three Families of Matter**



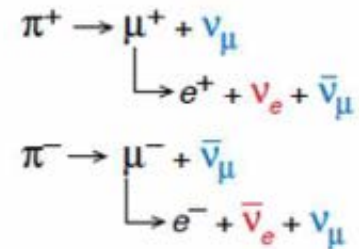
Solo rivelando le particelle cariche prodotte in seguito alla loro interazione con la materia: i muoni permettono di ricostruire la direzione di volo dei neutrini interagenti e permettono di fare "astronomia"

# Intensi flussi di muoni provengono dalla atmosfera ...



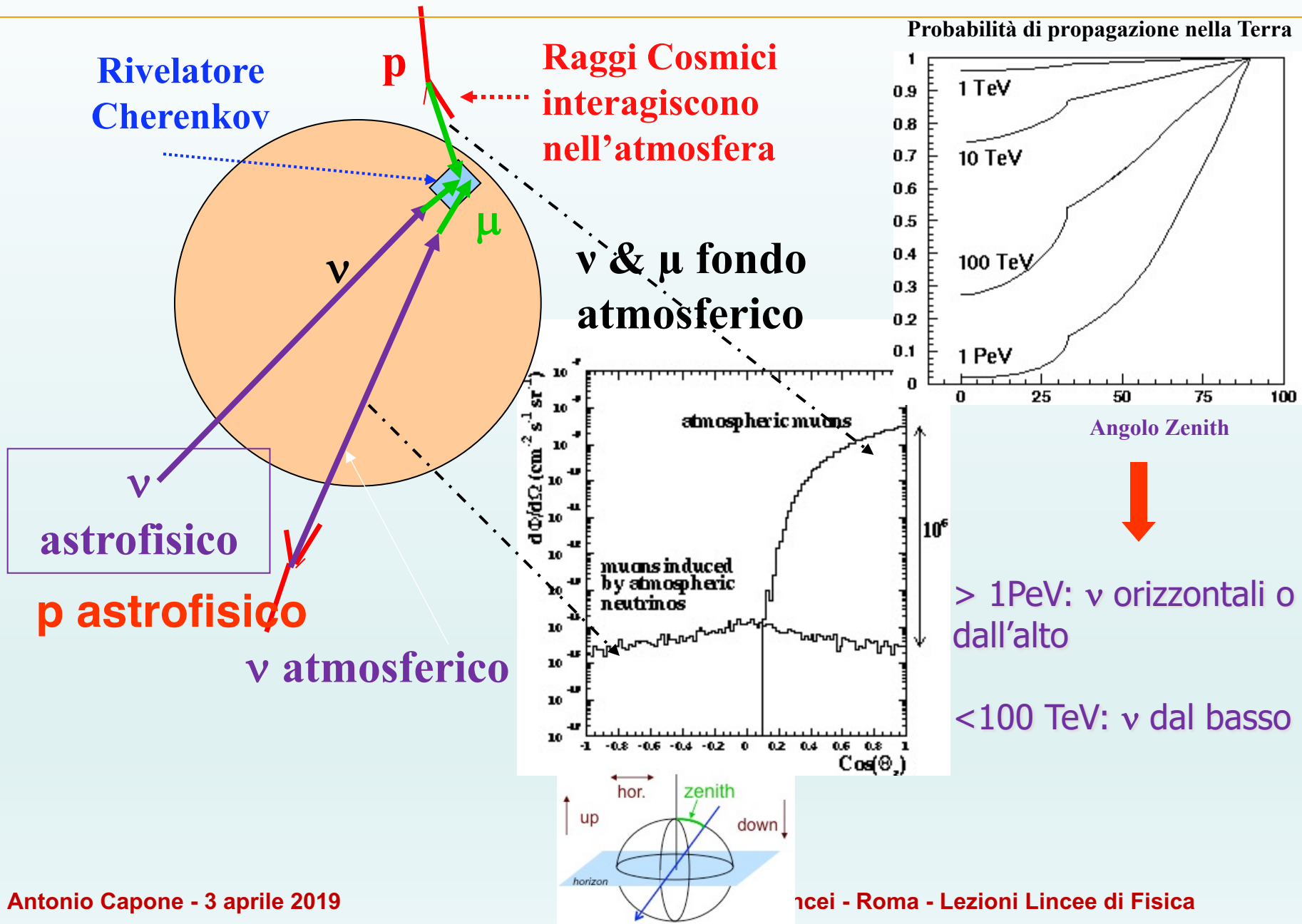
Qualche numero per capire ...  
 - per 1 evento da  $\nu_\mu$  astrofisico  
 → ~ 100 eventi da  $\nu_\mu$  atmosferico  
 → ~  $10^8$  muoni atmosferici

Atmospheric neutrino source

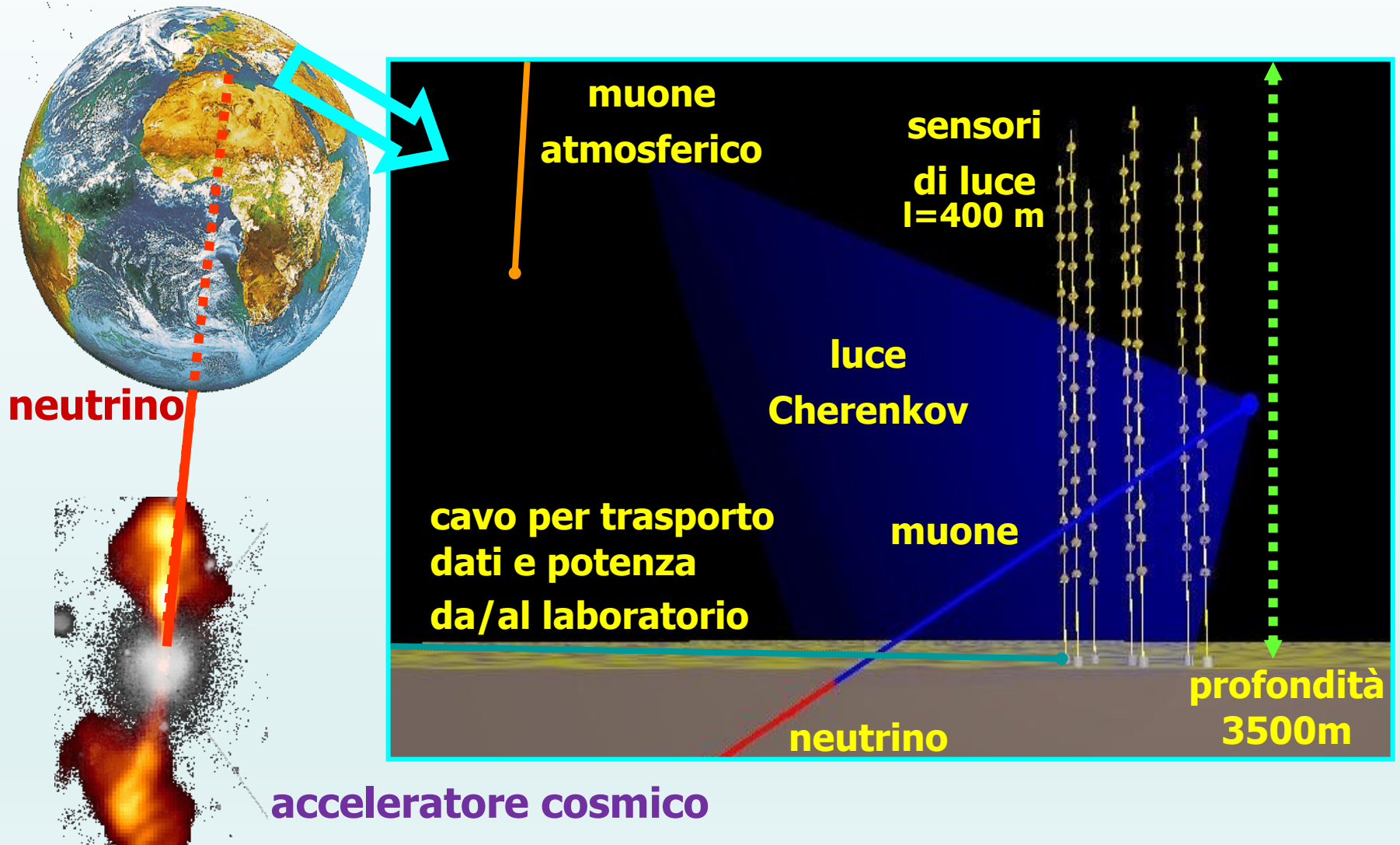




# Necessità di un rivelatore sottomarino

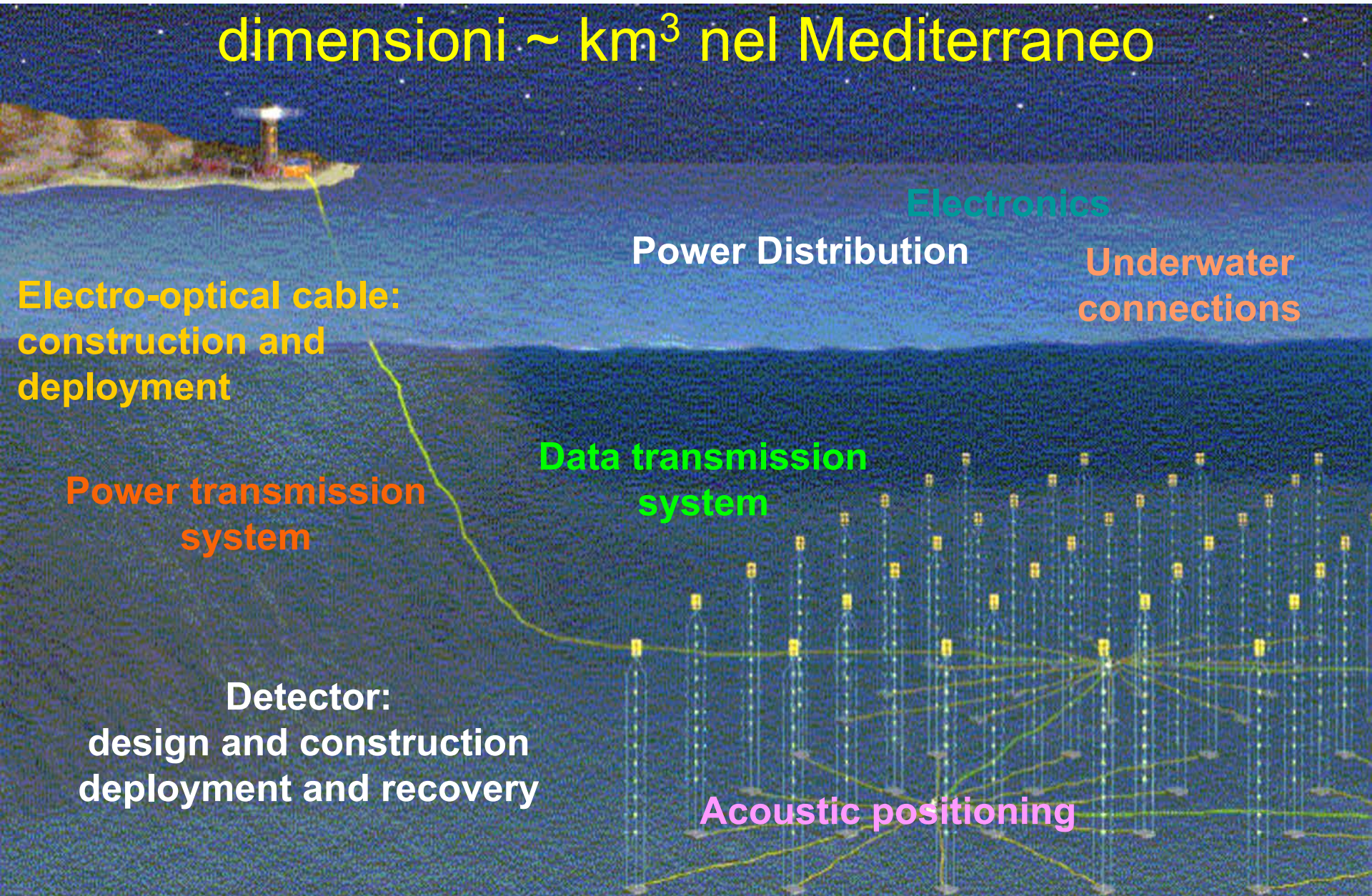


# Un rivelatore Cerenkov sottomarino





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









# Quali caratteristiche deve avere il sito abissale ?

---

- Vicino 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.

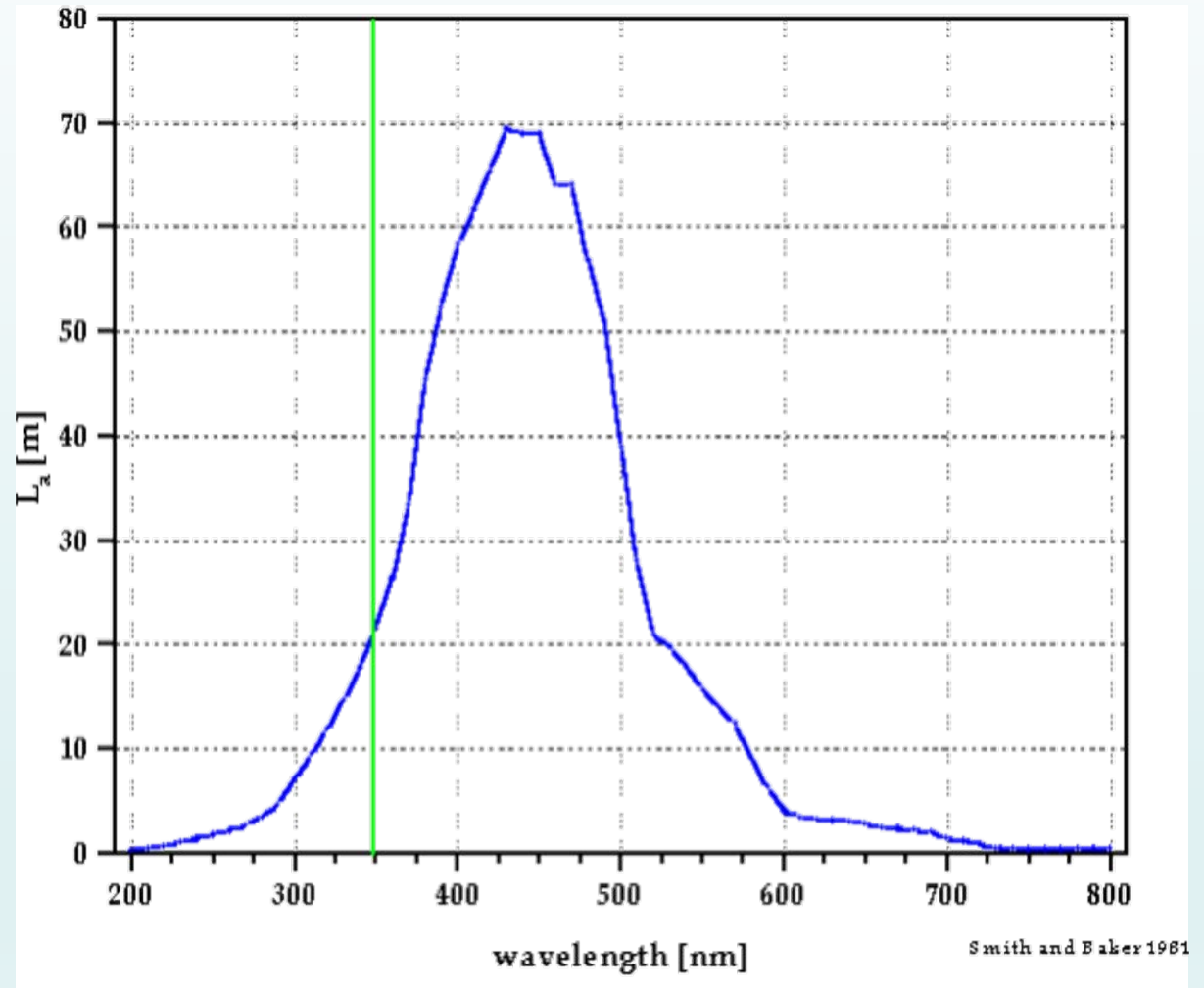
# Propagazione della luce in acqua

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

$$L_a = 1/a$$

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

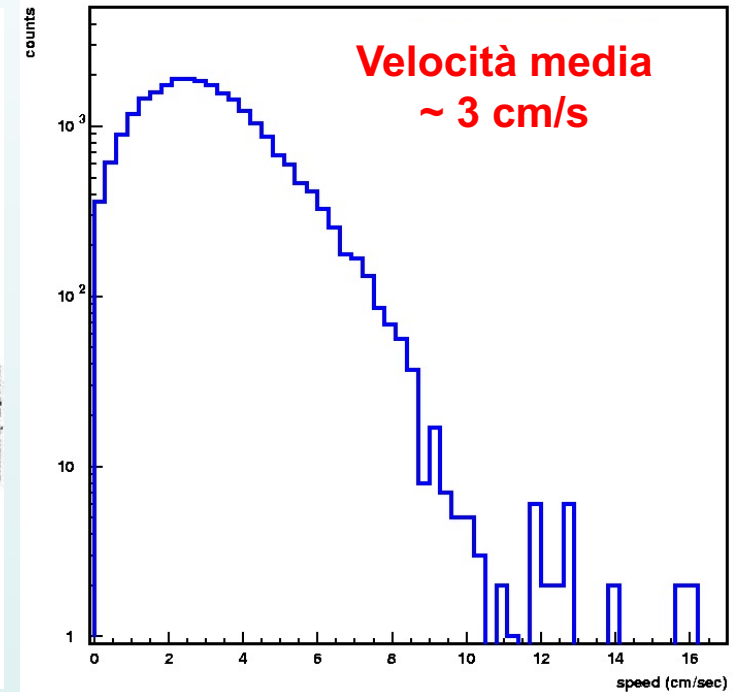
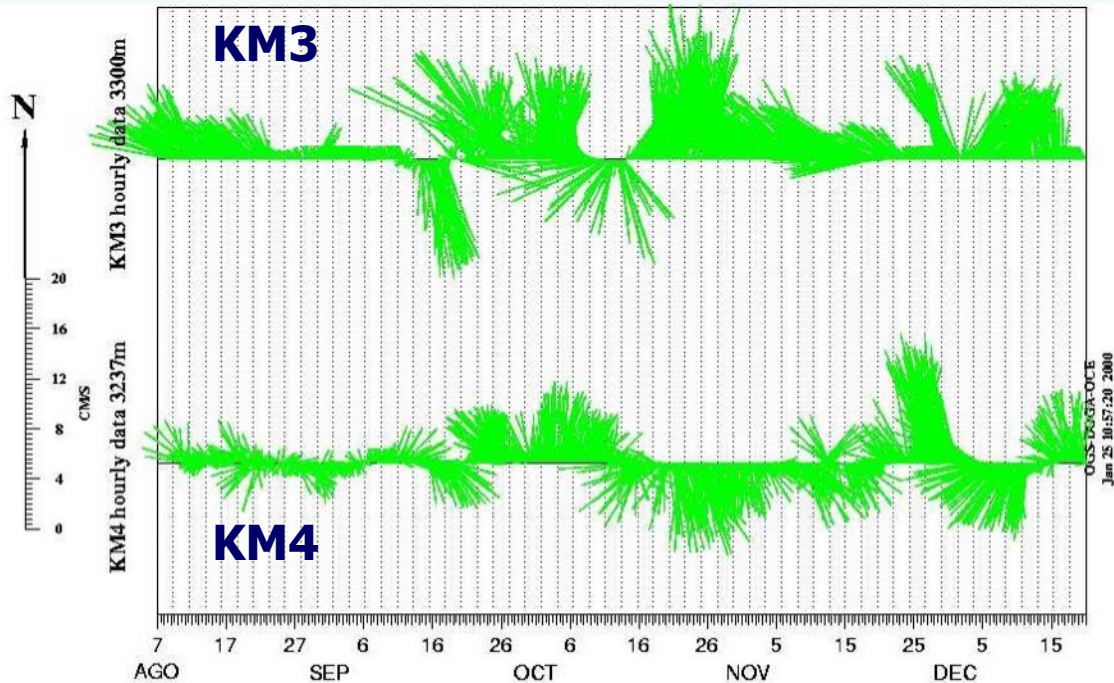
glass cutoff < 350nm





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

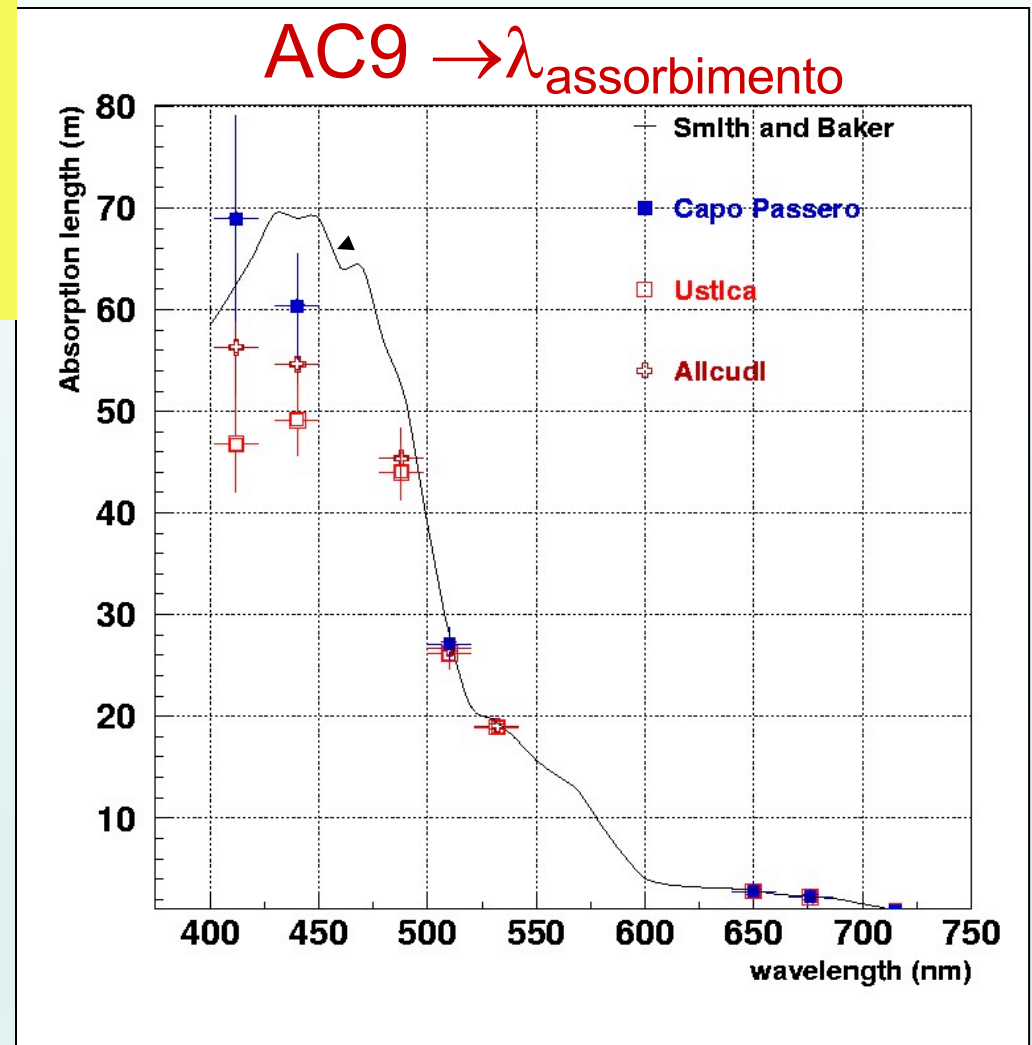
Enormi masse d'acqua (~10-100 km) si spostano/ruotano lentissimamente



Capo Passero Current Intensity  
@3300 m depth

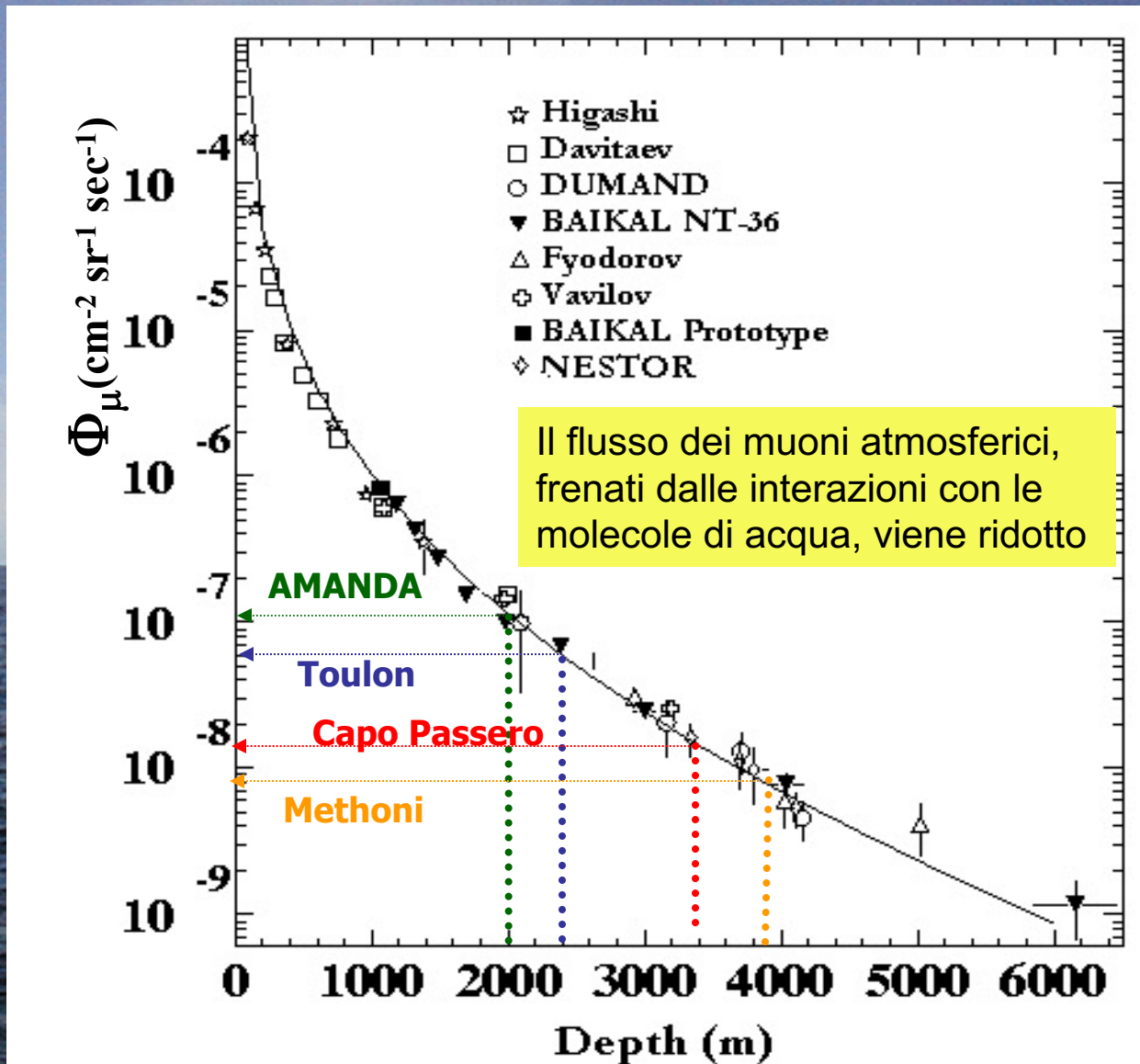
# Proprietà ottiche dell'acqua marina abissale

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





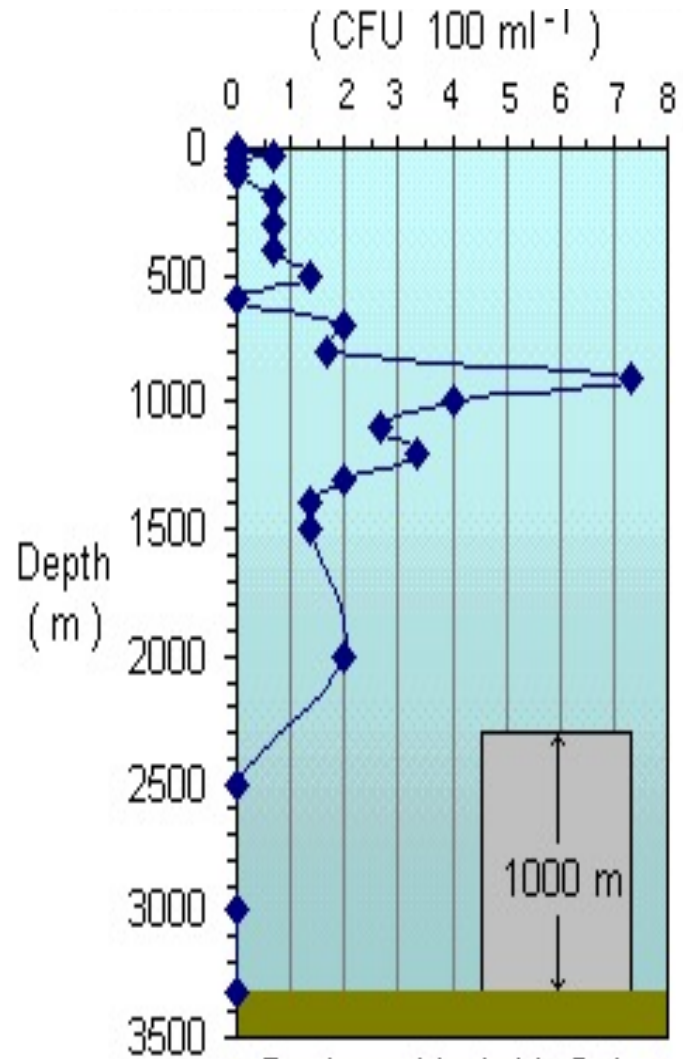
# Capo Passero Site: depth 3350m



# Rumore ottico negli abissi marini: bioluminescenza e $^{40}\text{K}$

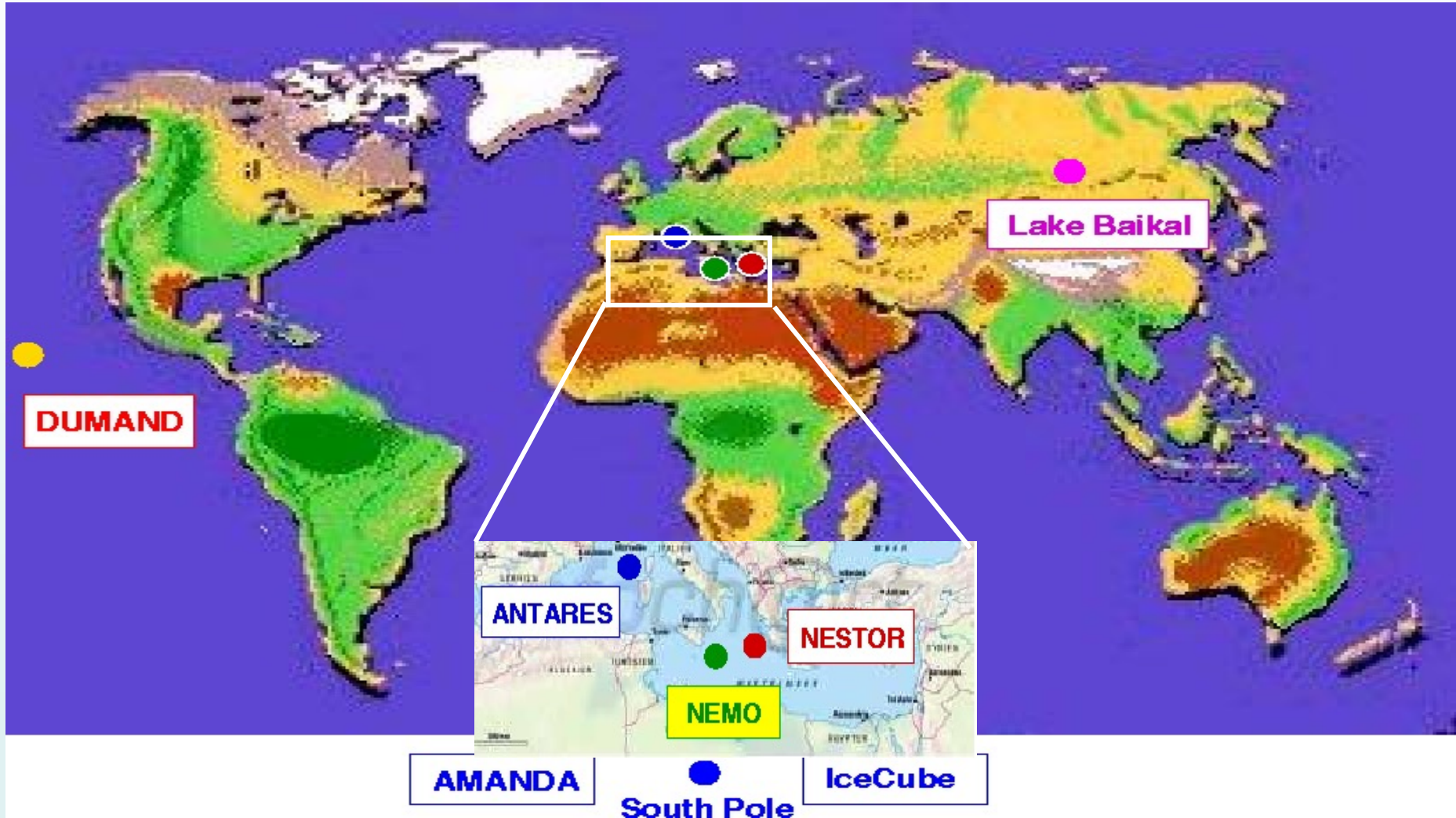


No luminescent bacteria have been observed in Capo Passero below 2500 m





# Mappa mondiale dei Telescopi per Neutrini

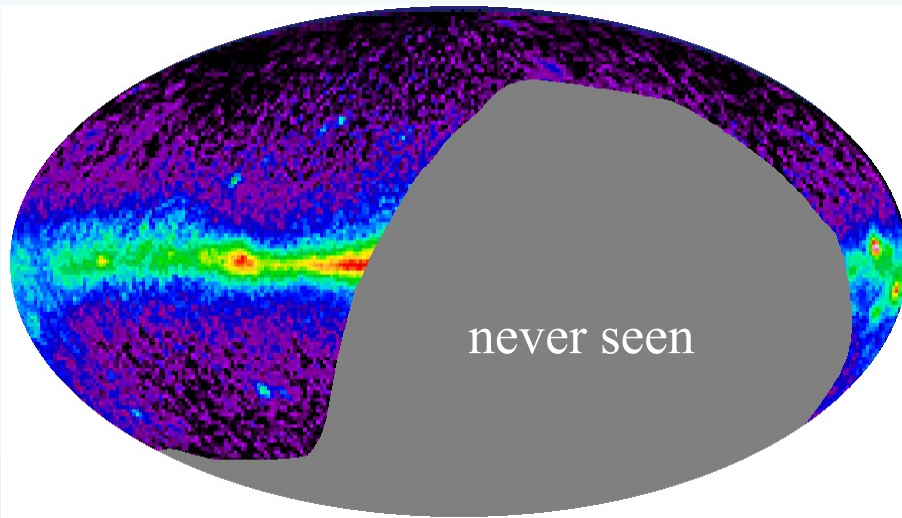


ANTARES + NEMO + NESTOR hanno unito gli sforzi per costruire un Telescopio Cherenkov sottomarino da  $\sim 1 \text{ km}^3$  nel Mediterraneo  $\rightarrow$  la Collaborazione KM3NeT

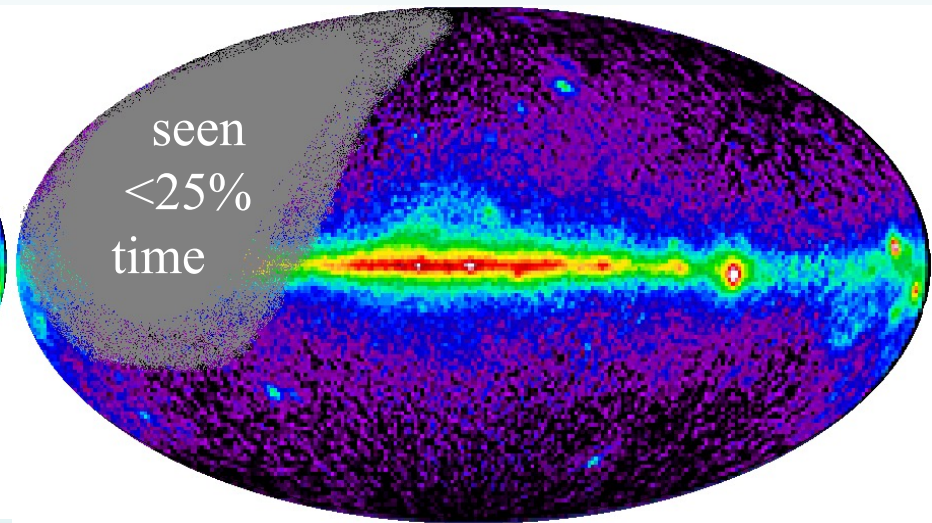
# Quanti Telescopi per neutrini ??

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

Gamma ray flux  $>100$  MeV observed by EGRET



**AMANDA, ICECUBE**



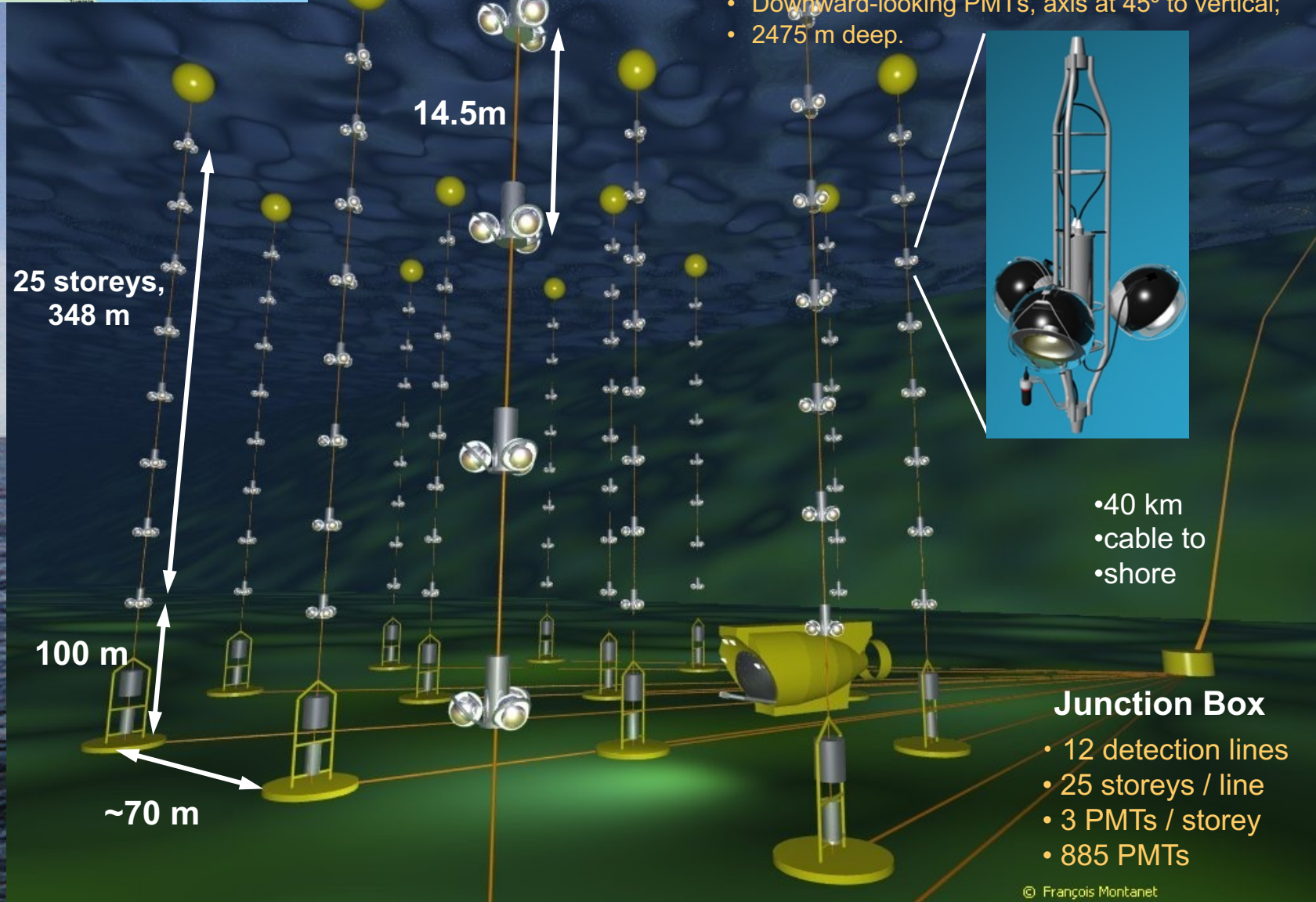
**ANTARES, Baikal, KM3NeT**





# L'esperimento ANTARES

- String-based detector;
- Underwater connections by deep-sea submersible;
- Downward-looking PMTs, axis at 45° to vertical;
- 2475 m deep.



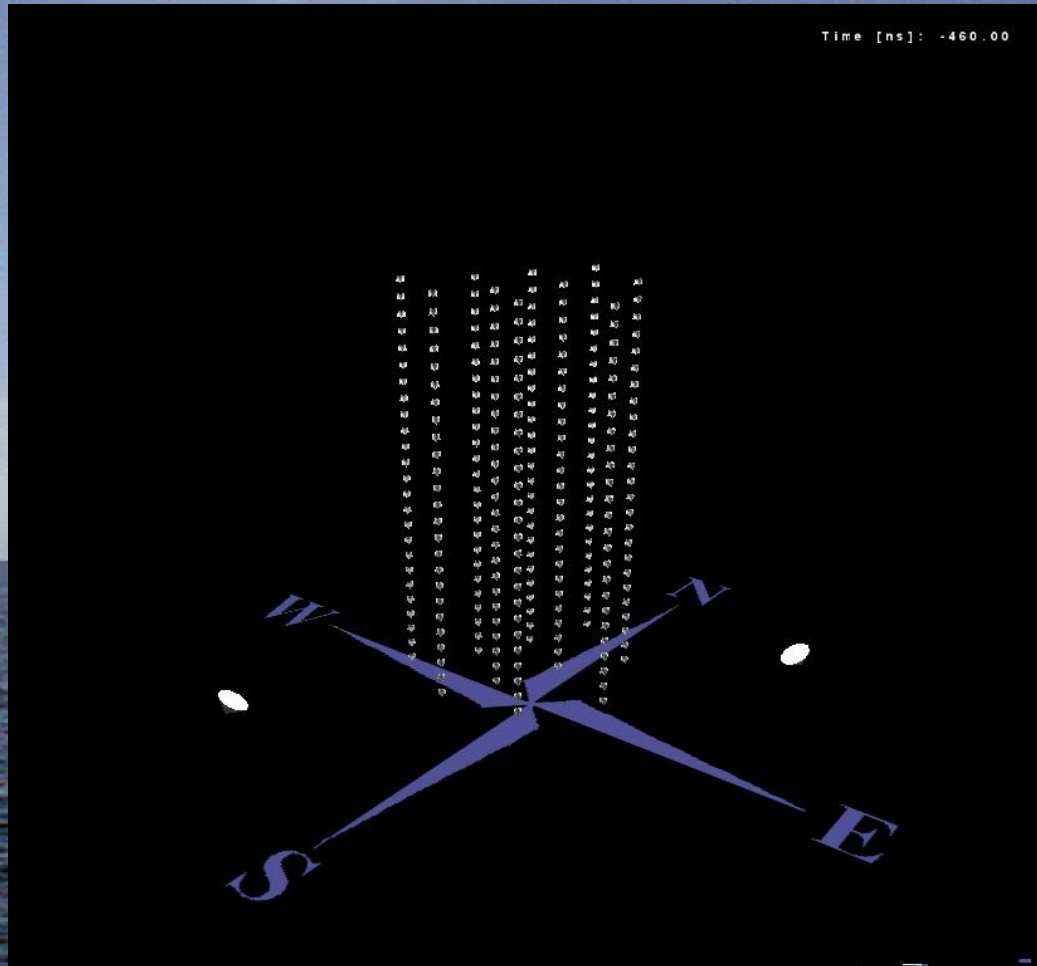


# ANTARES: traccia "dall'alto": un muone atmosferico



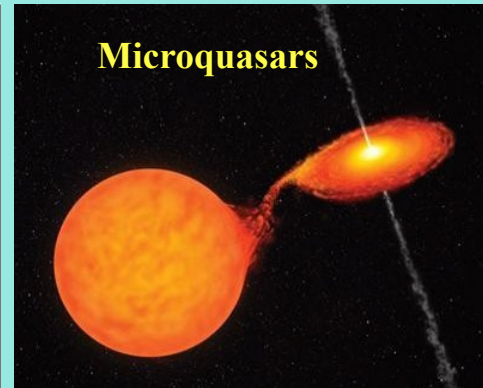
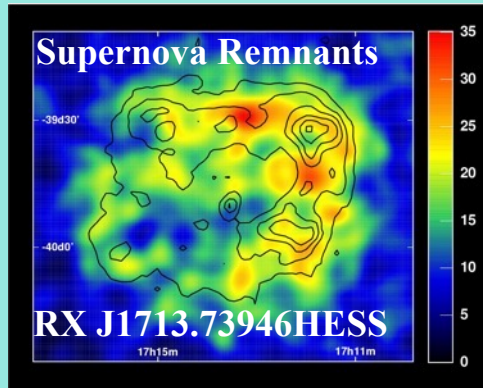


# ANTARES traccia "verso l'alto": un "candidato" neutrino

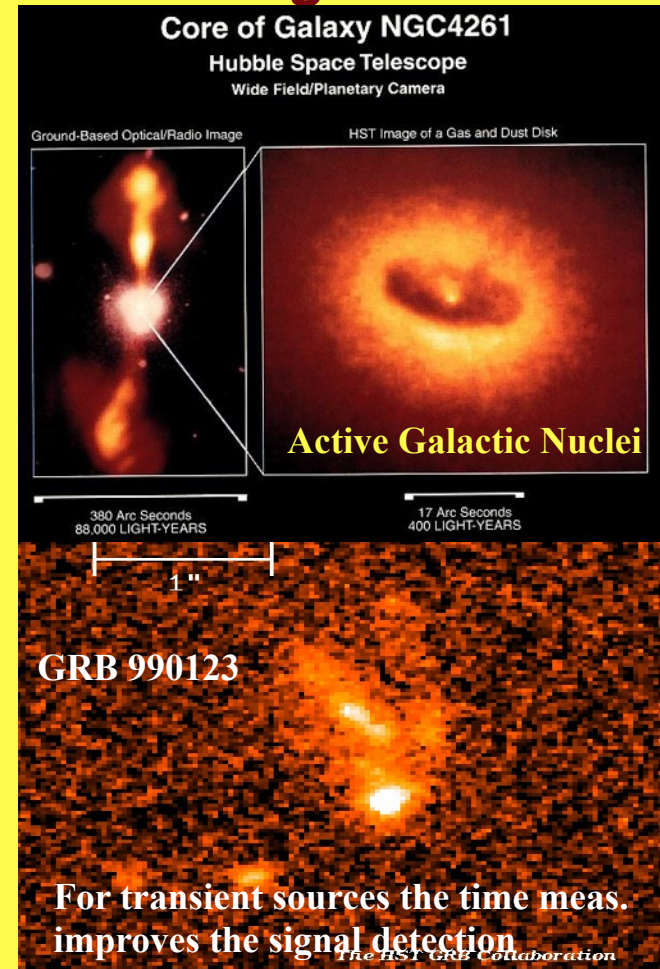


# Obiettivi della ricerca: individuare sorgenti "puntiformi di neutrini"

## Galactic



## Extragalactic

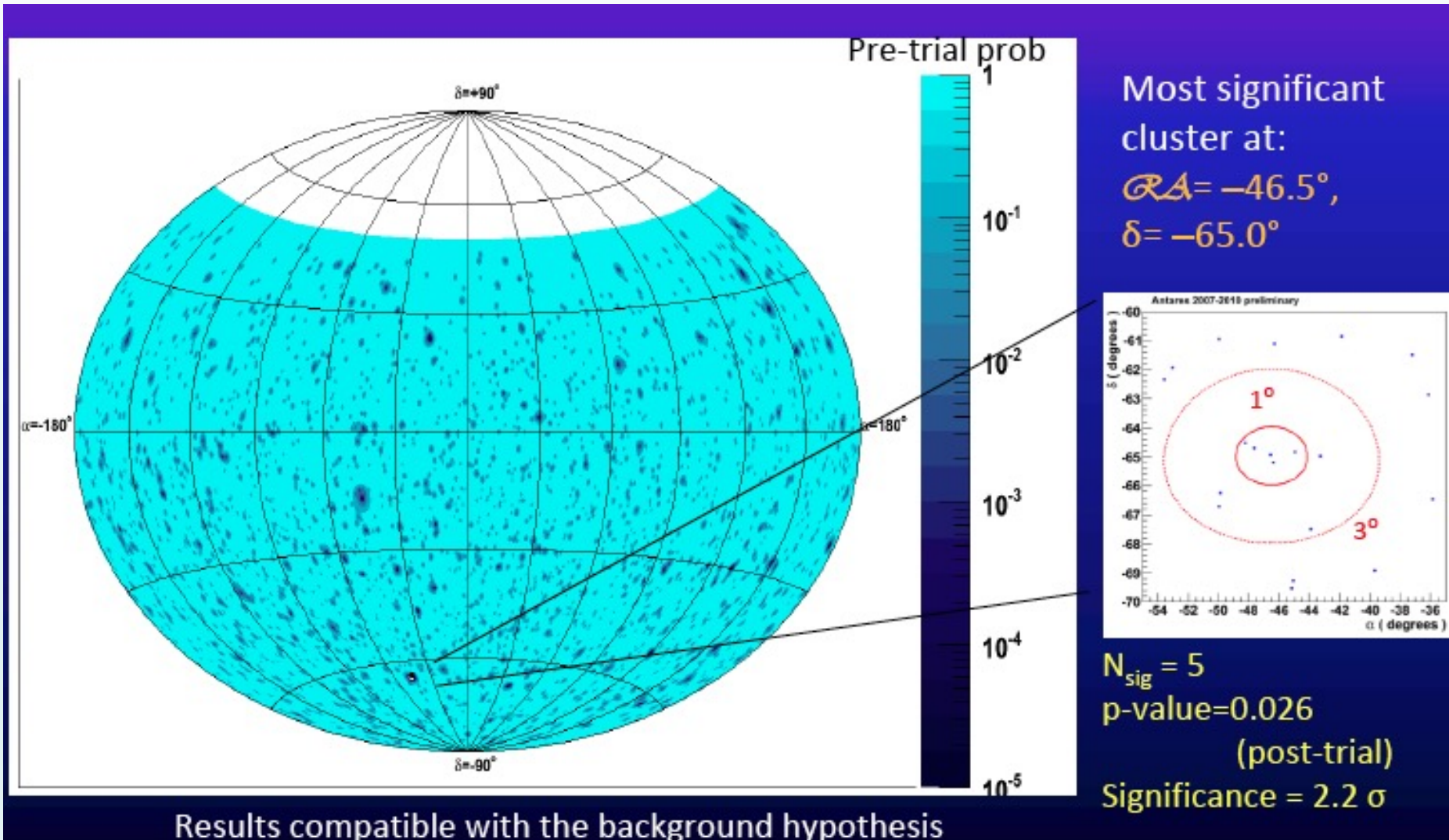


Il segnale cercato: un eccesso di tracce, in un cono centrato attorno ad una posizione nel cielo, rispetto al fondo uniforme dei neutrini atmosferici. Diminuendo l'apertura del "cono di ricerca" si riduce il numero di neutrini atmosferici e si rende più efficiente la ricerca del segnale. Importantissima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

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



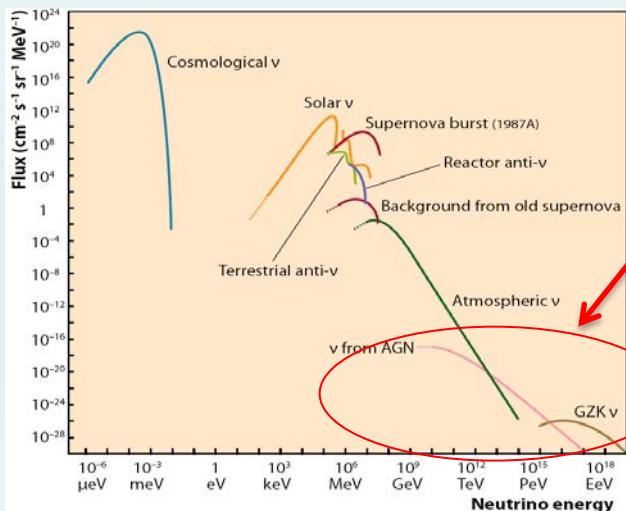
# Un esempio: la ricerca di sorgenti puntiformi dell'esperimento ANTARES



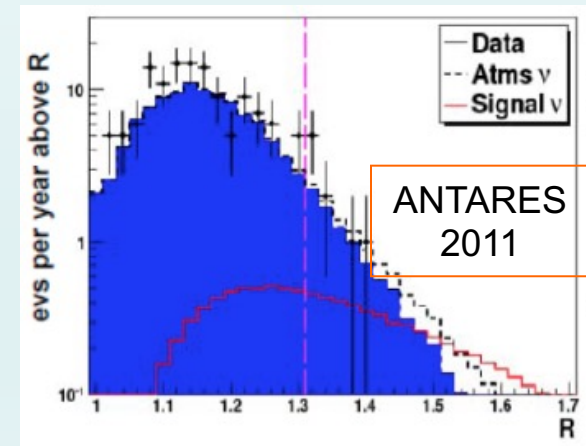
# Un altro obiettivo: identificare un flusso di neutrini oltre quello di origine atmosferica

- 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.

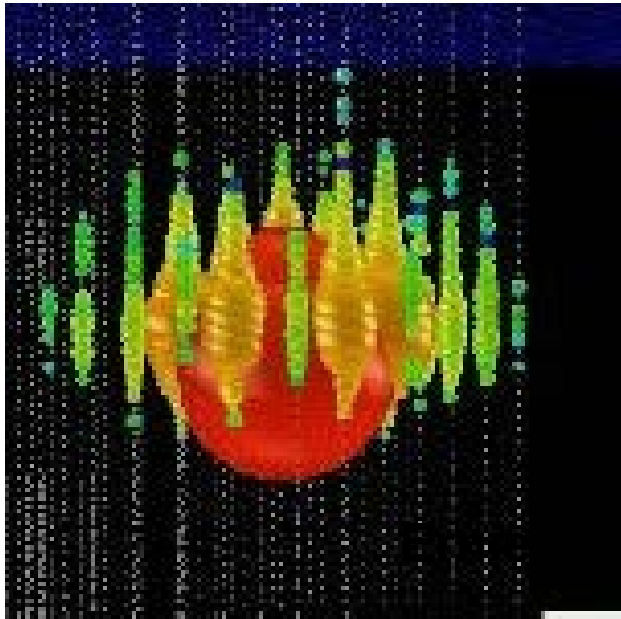


Search here !!!

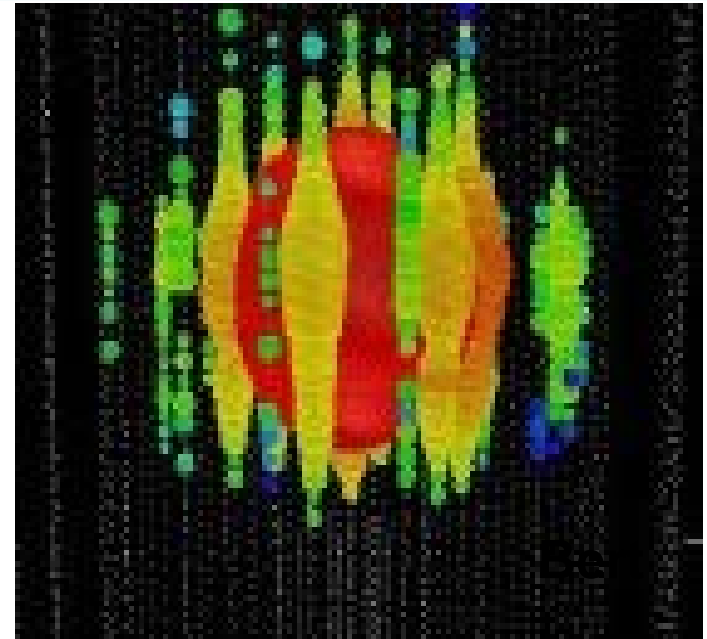




# SCOPERTA !!!: i primi due eventi di neutrini astrofisici di altissima energia identificati da IceCube (2012) !!!



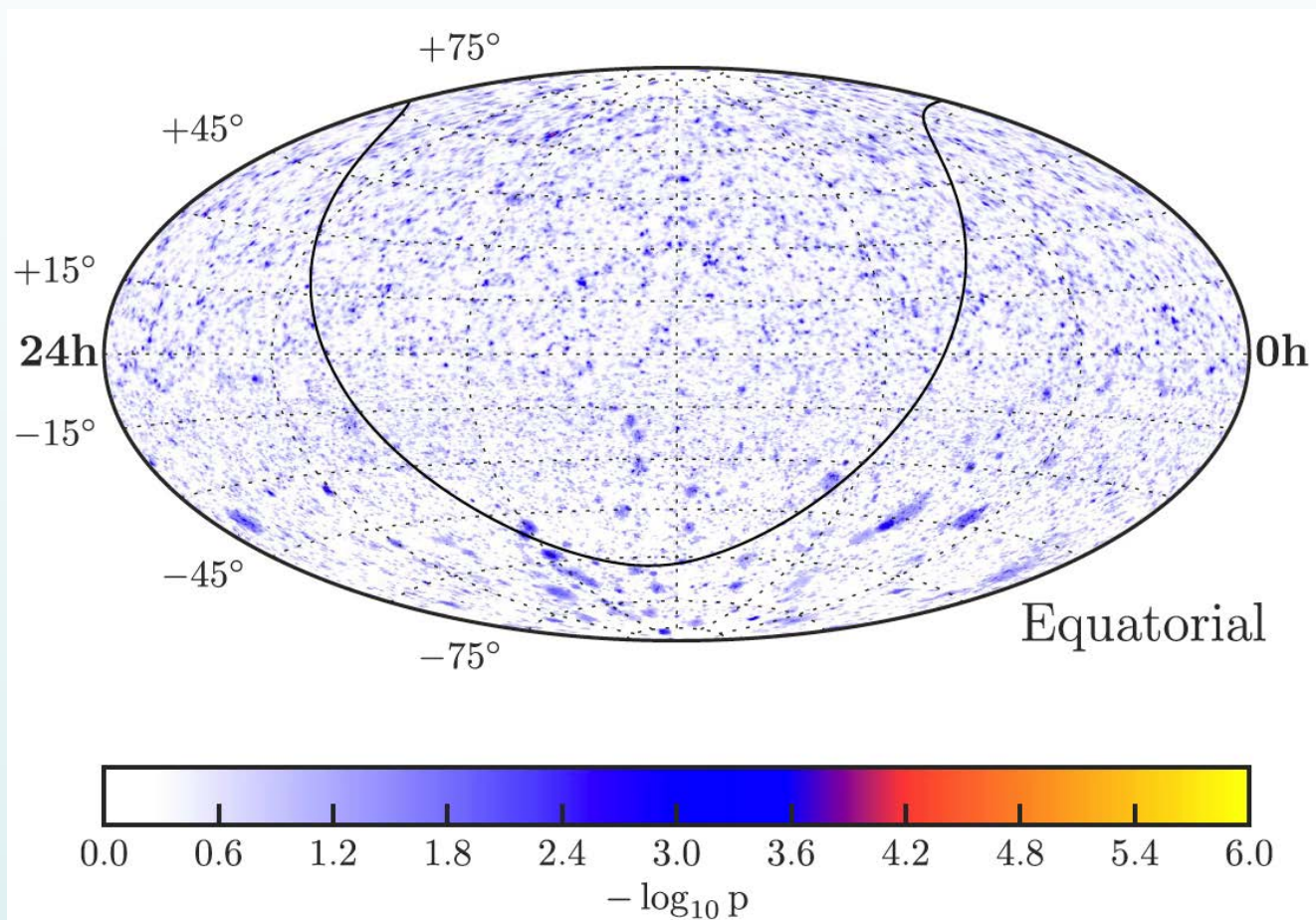
312 DOMs



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."

# Continua la ricerca di "sorgenti astrofisiche puntiformi di neutrini"



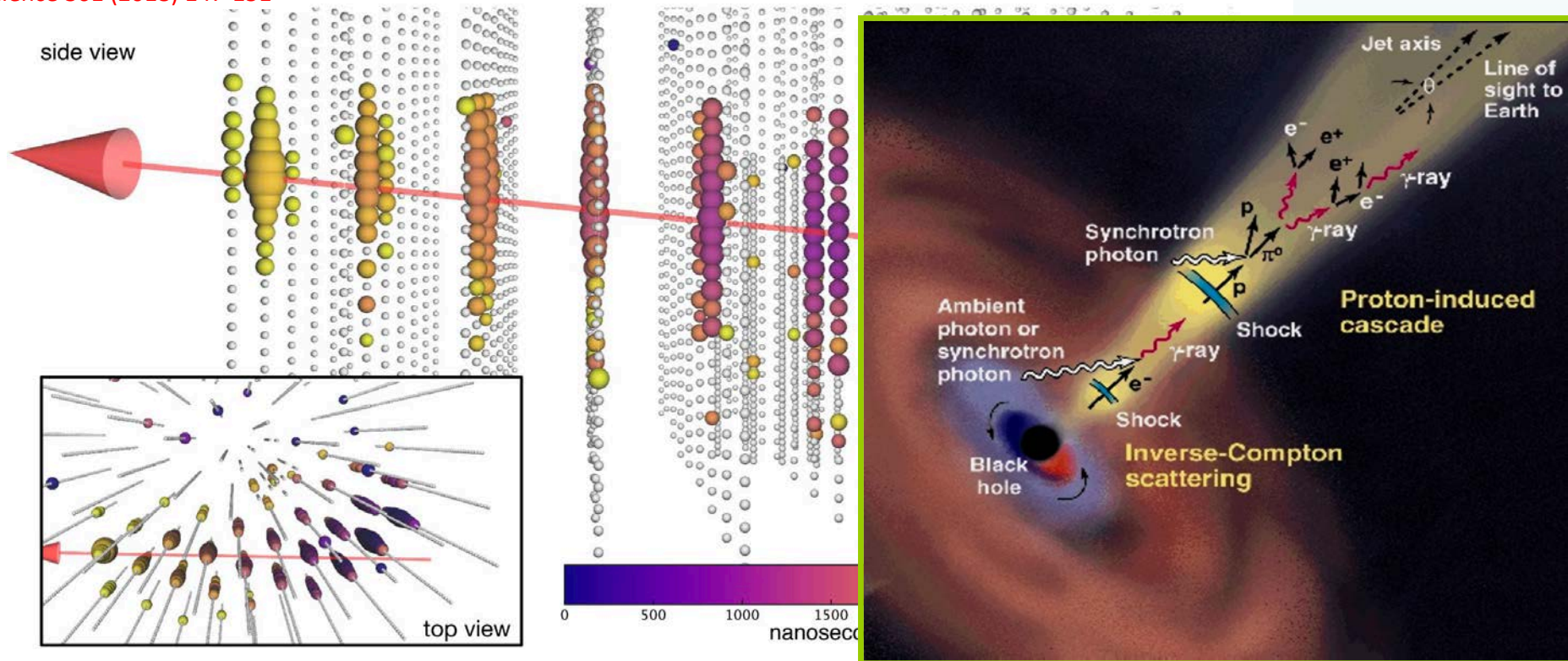
Moltissimi i neutrini rivelati, alcuni sembrano "addensarsi" in particolari posizioni nel cielo ma ancora la probabilità che non siano "da sorgente puntiforme" è alta.  
→ Si ricorre alla rivelazione a multi-messaggeri: si cercano direzioni nel cielo da cui provengono neutrini, raggi gamma, protoni etc...



# IceCube e FERMI: la scoperta di una possibile sorgente di $\nu$ e $\gamma$

Science 361 (2018) eaat1378

Science 361 (2018) 147-151



All'annuncio di IceCube di aver osservato questo evento di altissima energia FERMI e MAGIC hanno replicato annunciando di aver osservato "in coincidenza" spaziale e temporale un "getto di fotoni" dalla stessa sorgente: il Blazar TXS 0506+056

# 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

( $\nu$  emission from  $\gamma$ -flaring blazars)

**ANTARES ↔ FERMI**  
S. Adrián-Martínez et al.  
Astropart. Phys. 35 (2012) 634



## TATo

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



Un Consorzio internazionale  
che coinvolge molti Paesi (CY,  
DE, ES, FR, GR, IE, IT,  
Morocco, NL, PO, RO, UK)

> 40 Istituti

> 200 Scienziati

Comune obiettivo: costruire il  
più sensibile Telescopio per  
Neutrini Astrofisici di Alta  
Energia nell'emisfero NORD



# KM3NeT





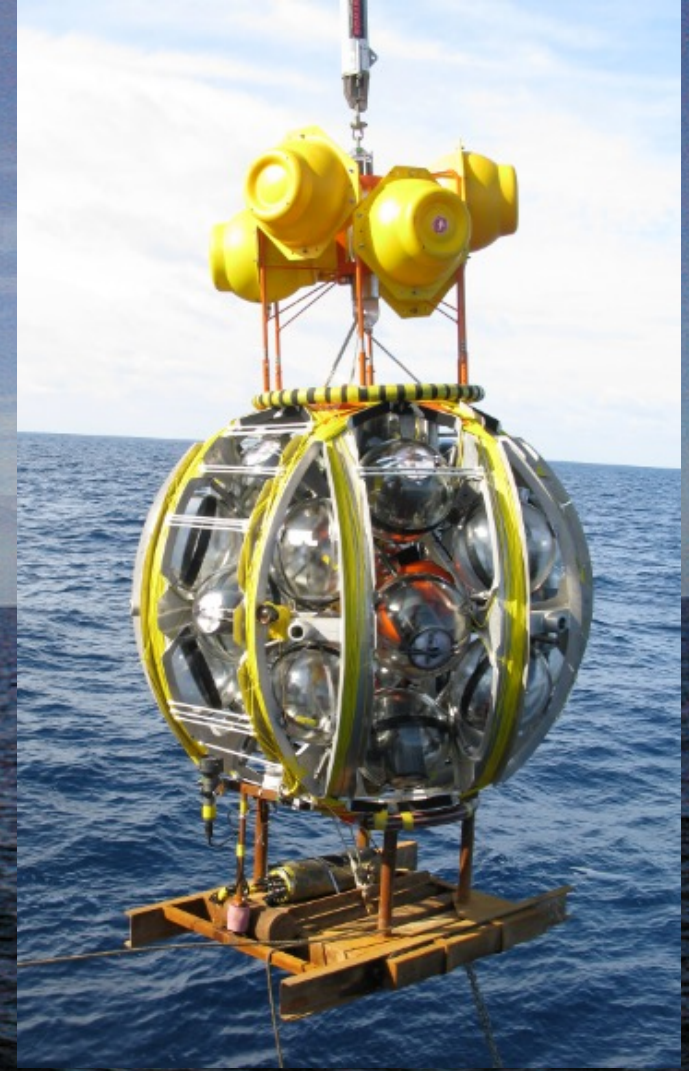
# The String Technology



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

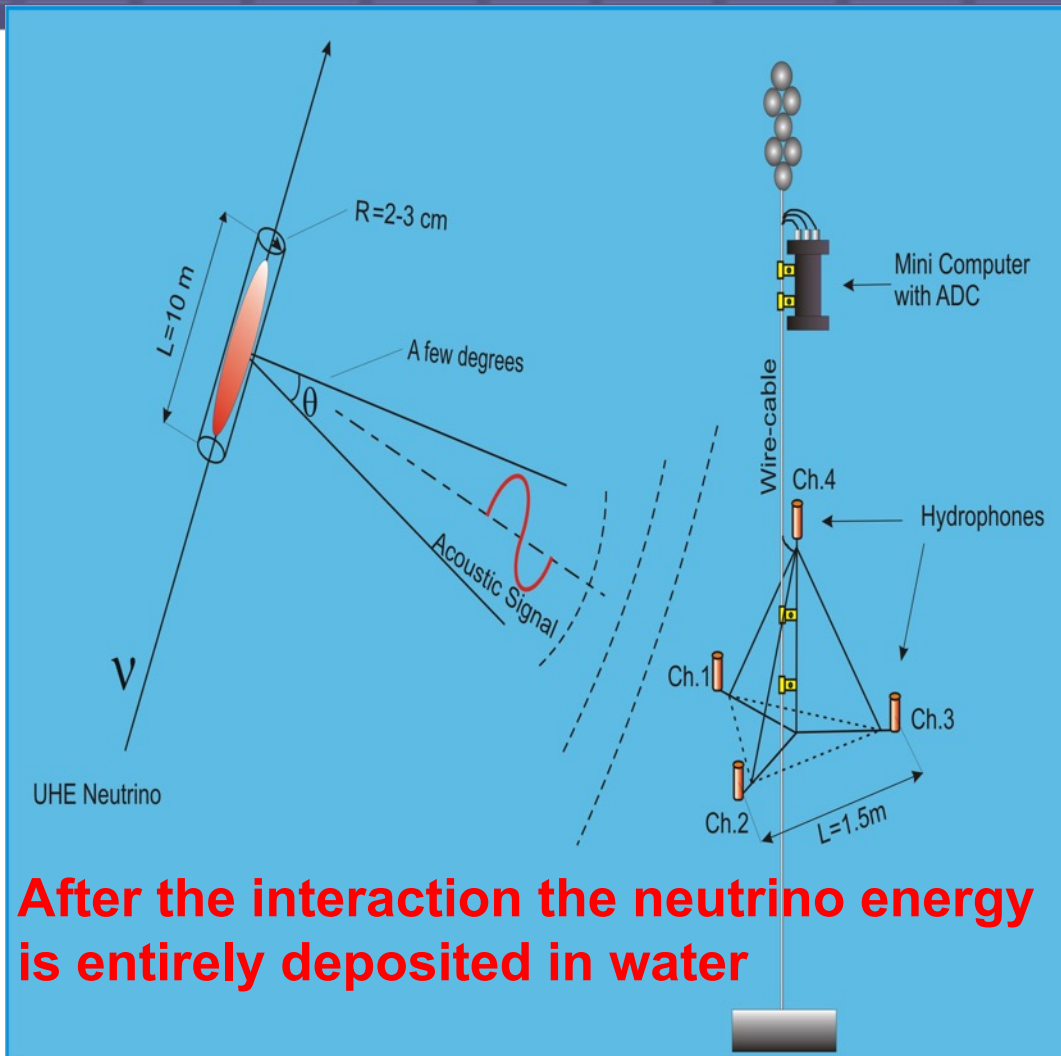
Detection Unit with 18 storeys  
36 m inter-storey distance  
Compact deployment

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





# 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

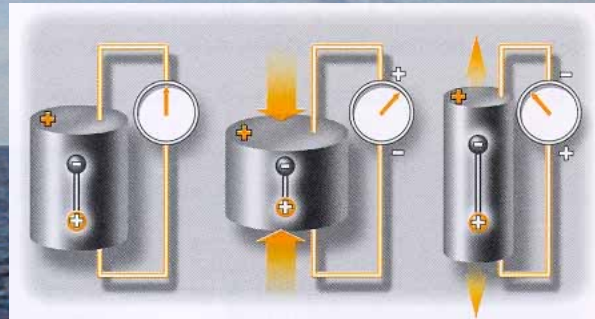


# Acoustic Signal Detection

## 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

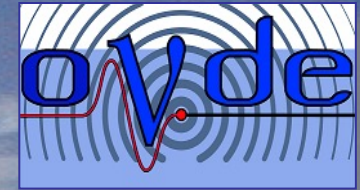




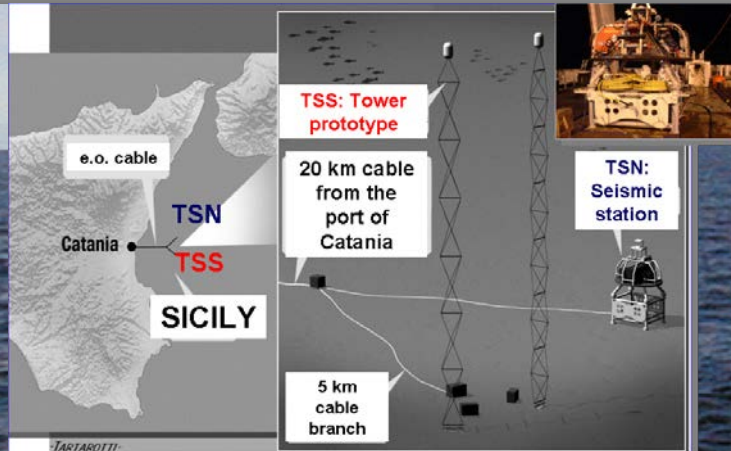
# Acoustic detection by NEMO site: OvDE



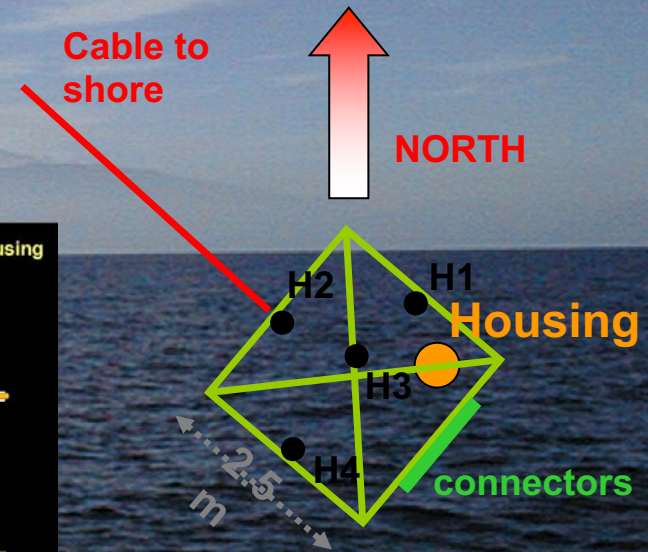
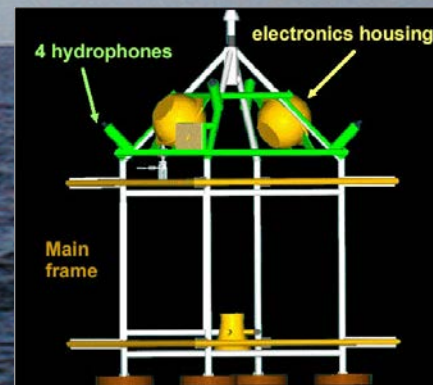
Neutrino Mediterranean Observatory  
ONDE – Ocean Noise Detection Experiment



## NEMO Test Site



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

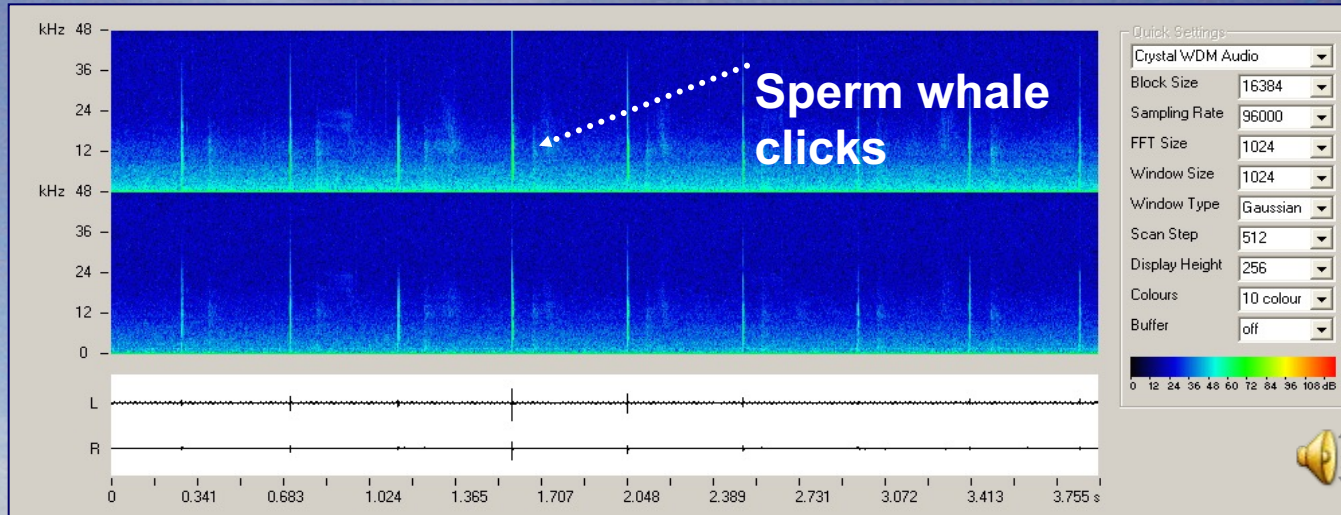


Height from seabed :  
H1, H2, H4 ~ 2.6 m  
H3 ~ 3.2 m

First noise spectra  
Whales&Dolphins signals



# Bioacustica: rivelati segnali di capodogli nel Golfo di Catania

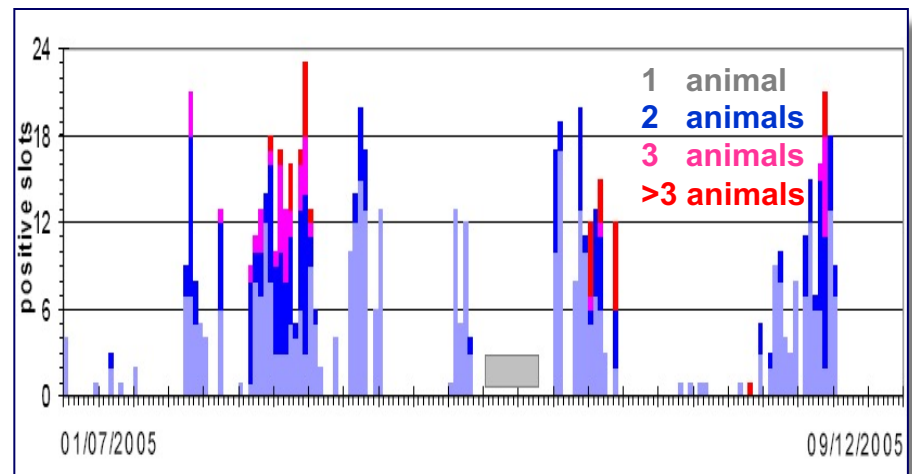


OvDE sensitivity allowed cetaceans detection over >40 km range. The results indicate presence of sperm whales more frequent than previously observed.

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

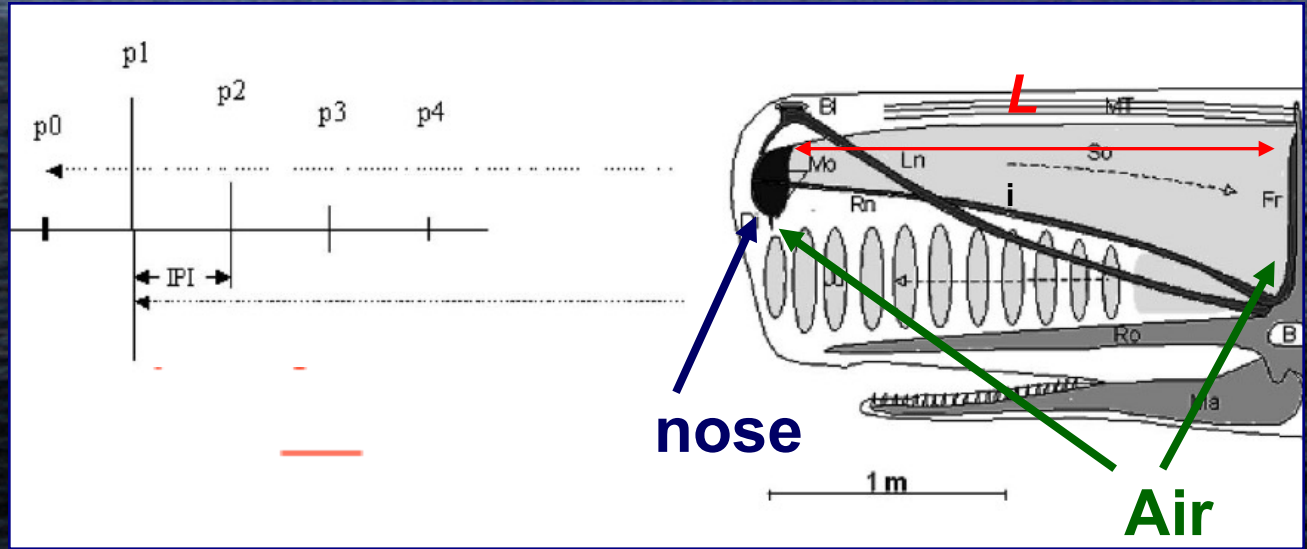
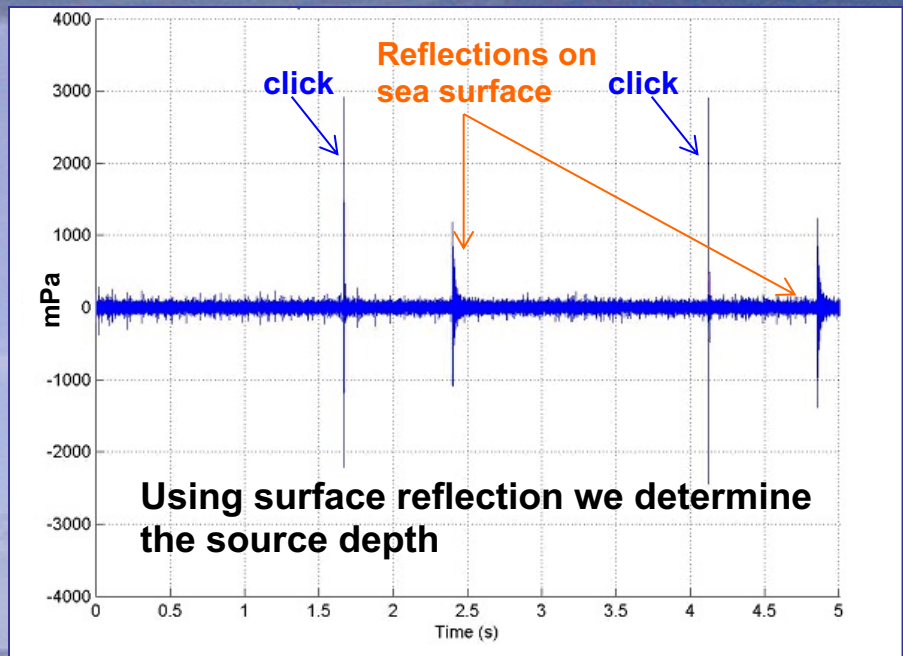
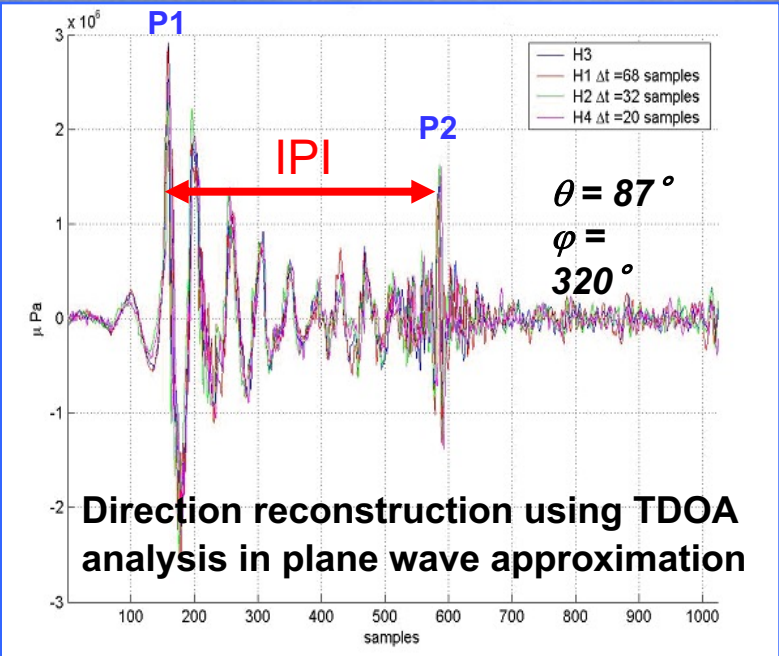
**INFN and  
CIBRA**

Science, March 2, 2007





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

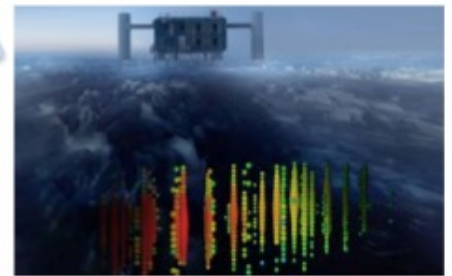
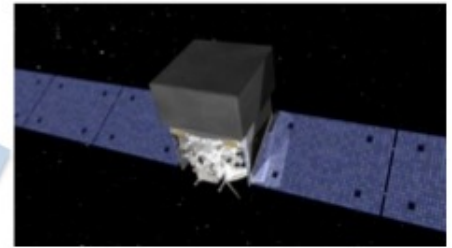
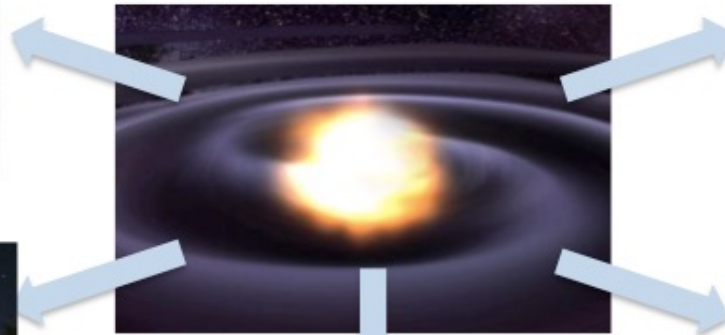


**Depth =  $560 \pm 5$  m**  
**L =  $3.41 \pm 0.05$  m**  
**Size = 9.72 - 10.50 m**  
**Young male or female**

# Il futuro ???

## L'astronomia Multi-Messenger !!!

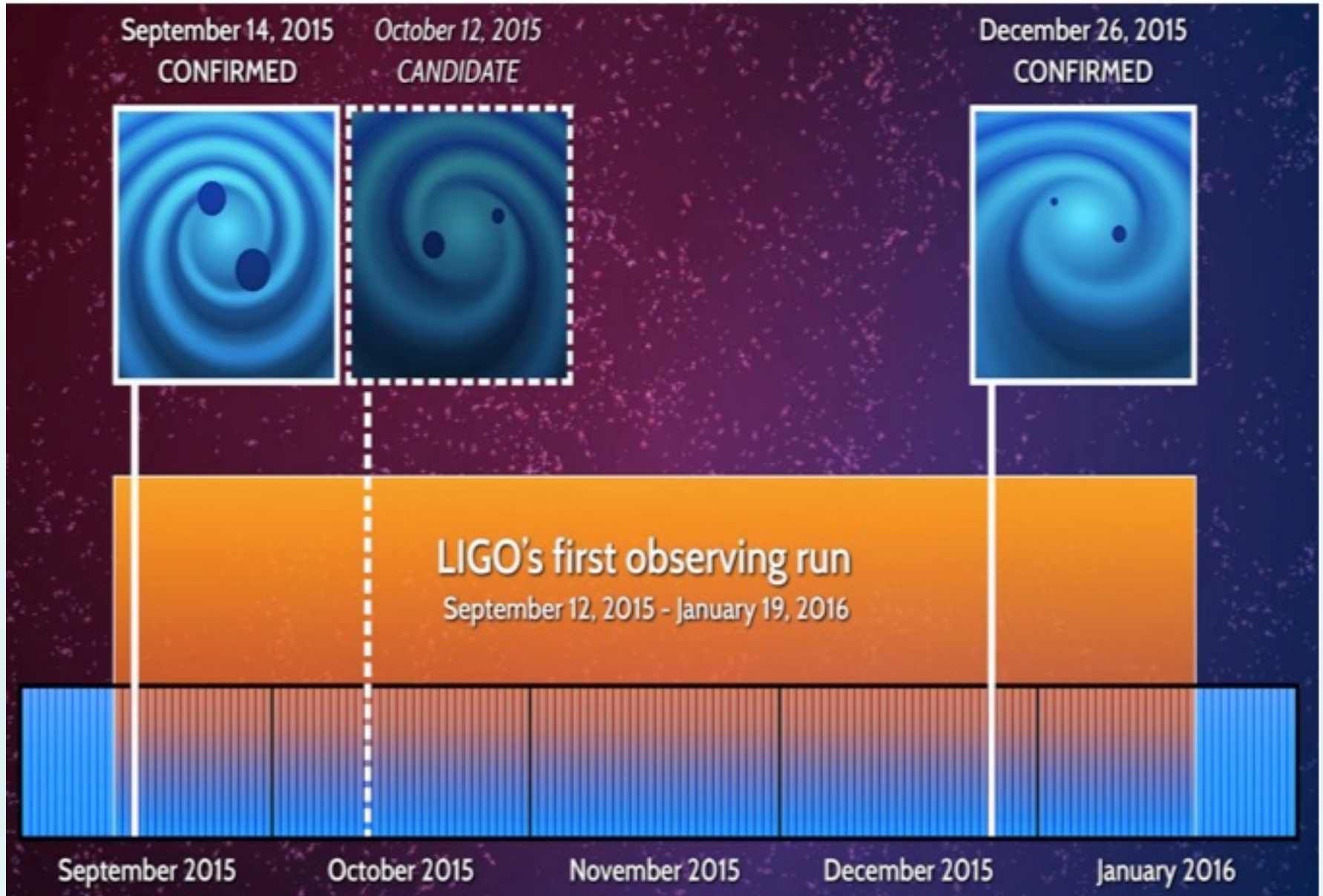
### Multi-Messenger Astronomy: Gravitational Wave + Electromagnetic + Neutrinos





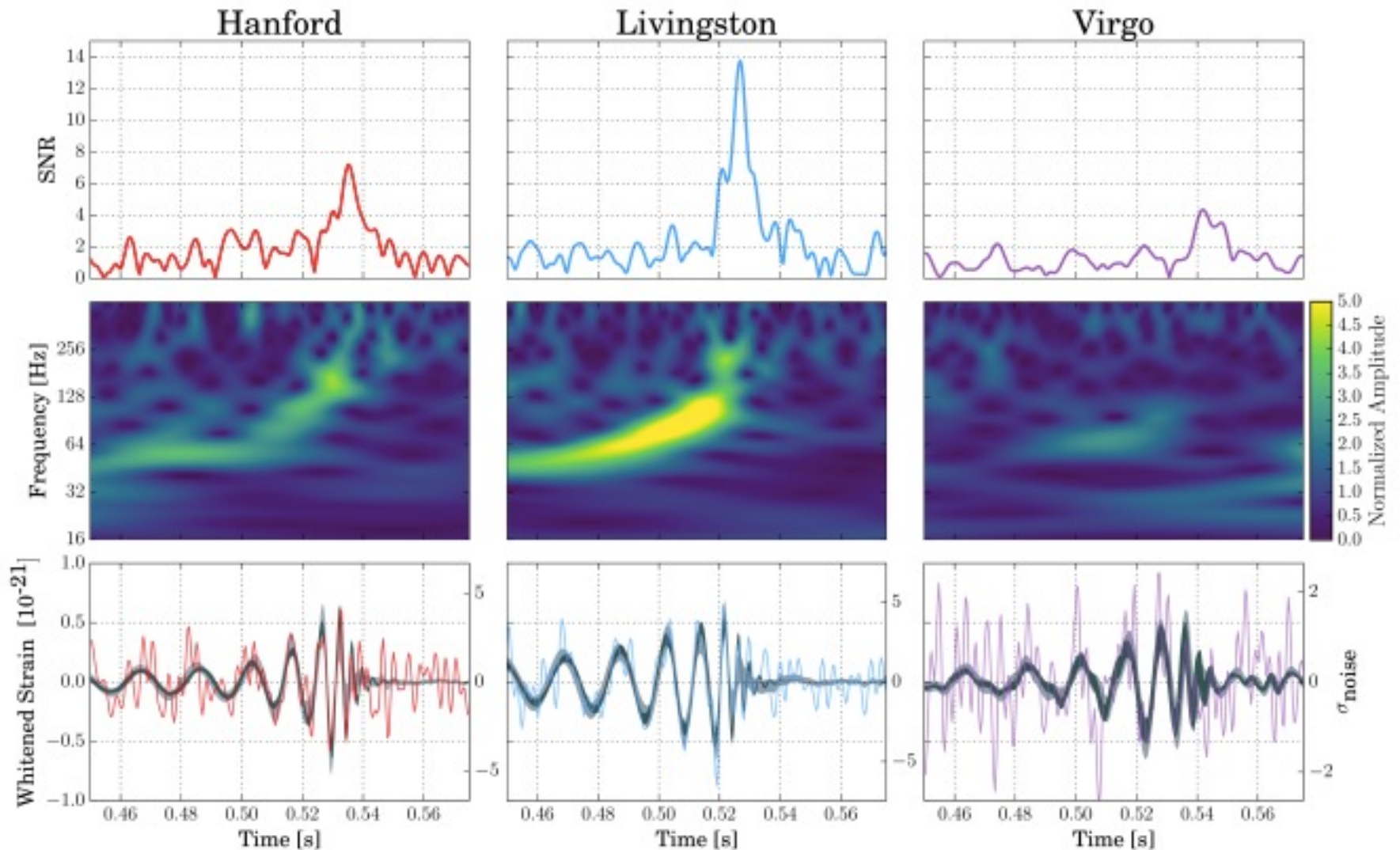
Grazie per l'attenzione !!

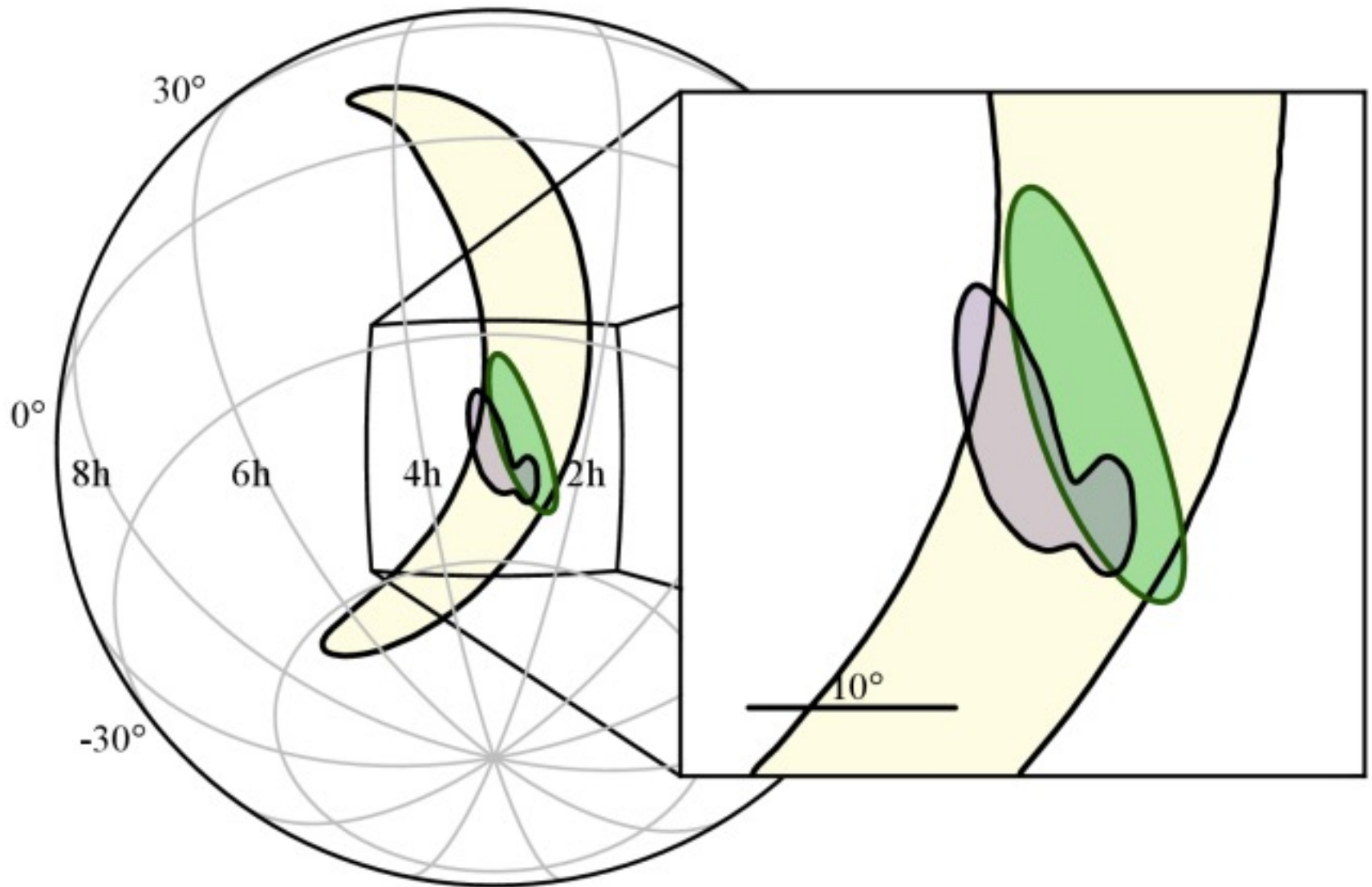
# 3 eventi "GW" osservati: grandi aspettative





# GW170814—Enter Virgo





If we only had the two LIGO detectors, we'd have an uncertainty on the source's sky position of over 1000 square degrees (yellow), but adding in Virgo, we get this down to 60 square degrees (green). The purple map is the final localization from our full parameter estimation analysis. That's still pretty large by astronomical standards (the full Moon is about a quarter of a square degree), but a fantastic improvement!



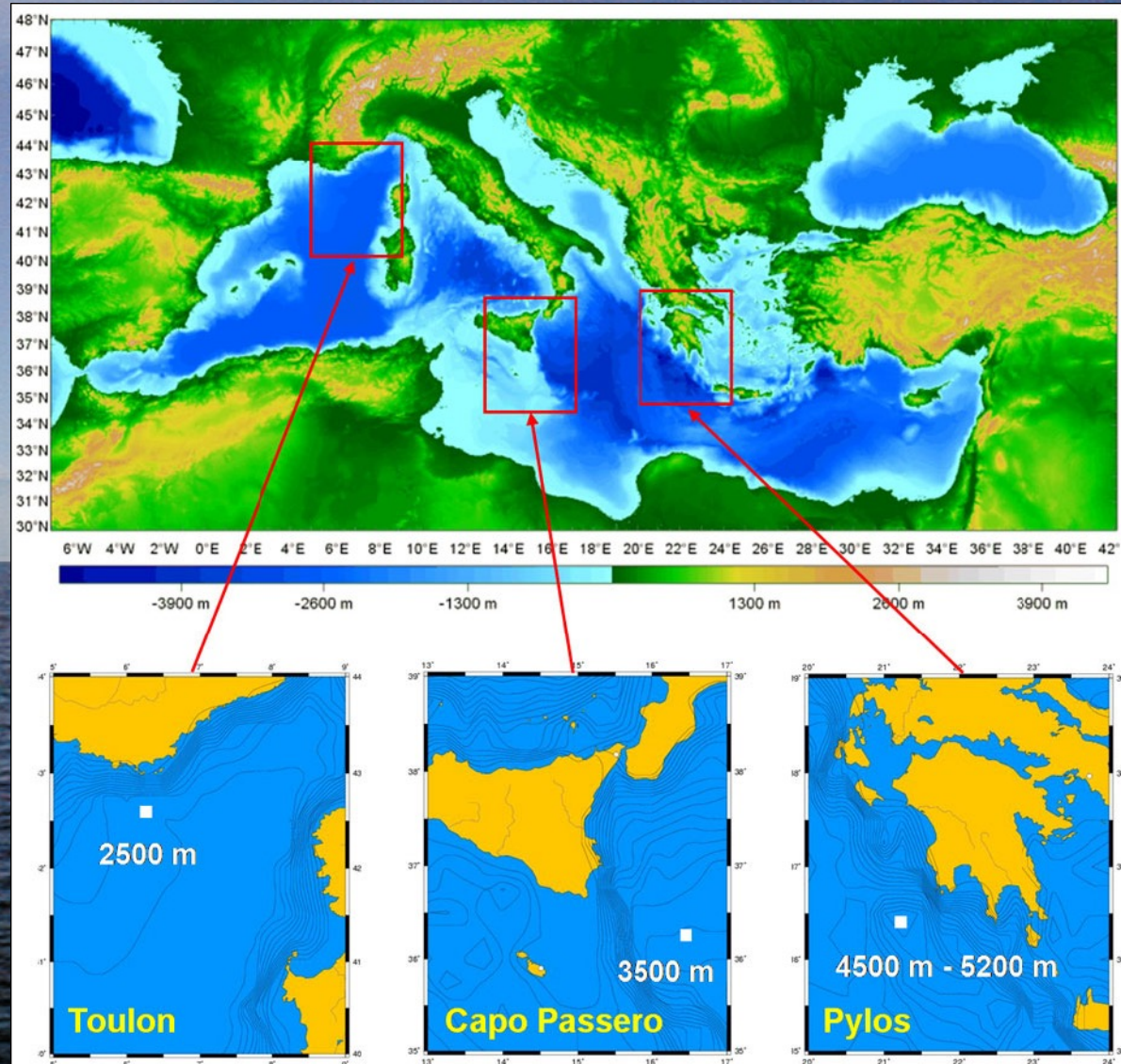
## Altri obiettivi di ricerca: non solo astrofisica ma studio delle proprietà fondamentali delle particelle elementari

... 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
- ...

# 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 Tower technology

## NEMO – Phase2

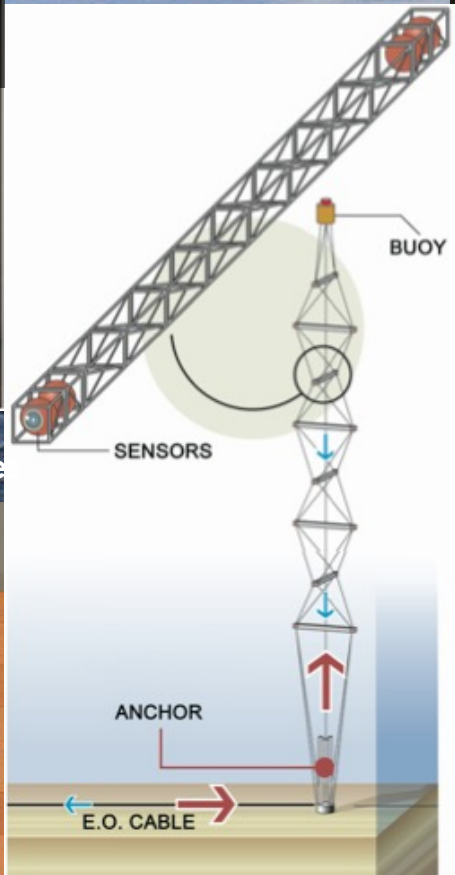
8 floors, 4PMTs/Floor, 2 hydrophones/Floor  
8 m bars, vertical dist. = 40 m,  $H_{tot} = 450$  m  
oceanographic instruments  
Deployed at 3500m depth in March 2013

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

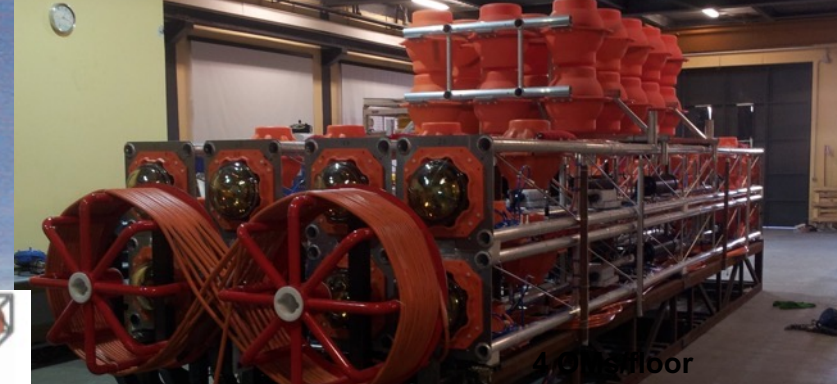


32 OMs, all fully tested and calibrated.  
2 OMs equipped with piezo-hydrophone

Hydrophones: acoustic positioning and bioacoustics

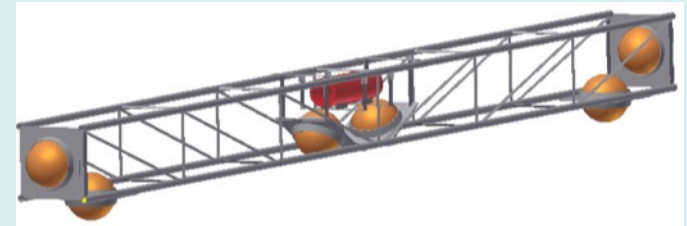


NEMO-Phase2 Tower before deployment



## KM3NeT – Italy Towers

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



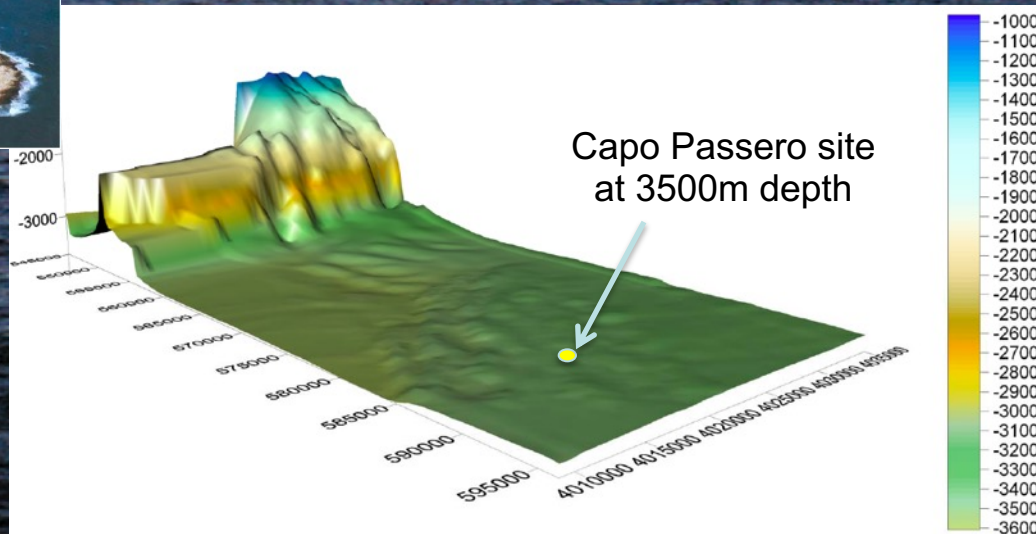
6 OMs + 2 hydrophones / Floors

Oceanographic Instruments  
Towers at  $\sim 100$  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

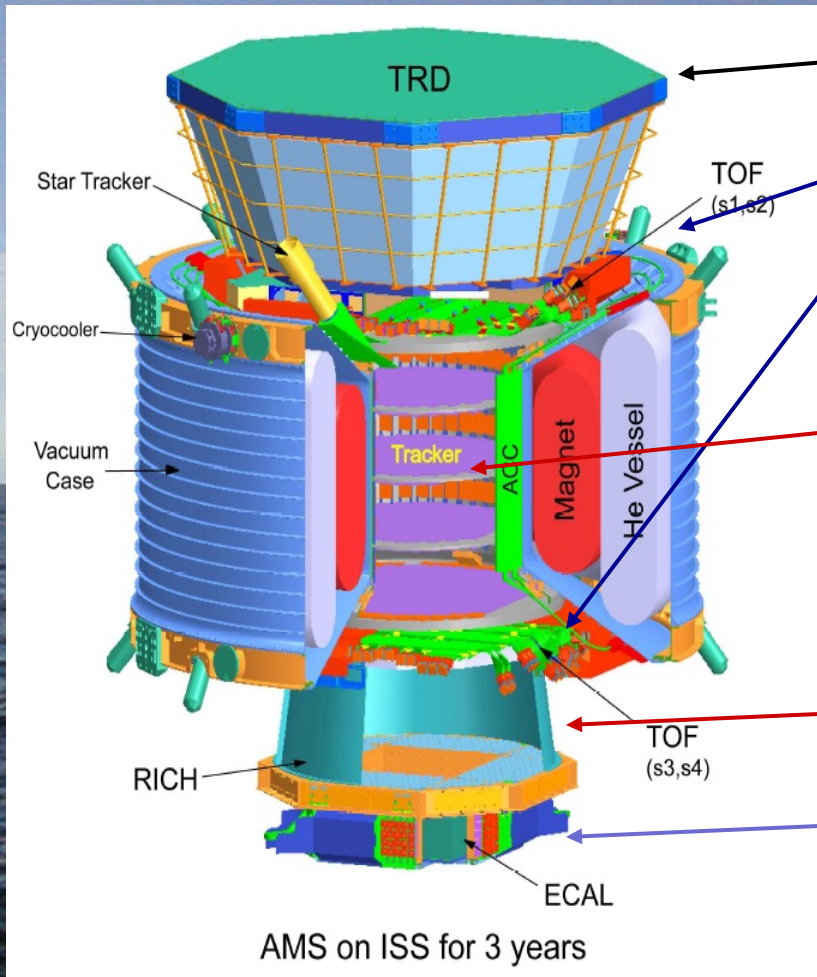




# Perché studiamo ancora oggi i Raggi Cosmici ??

- 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 ??

# 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

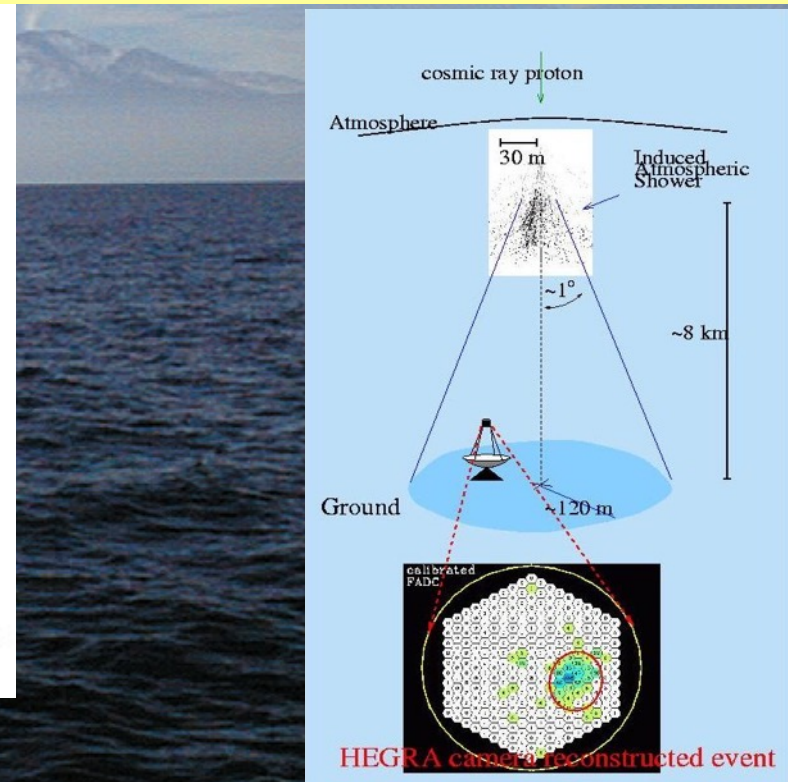
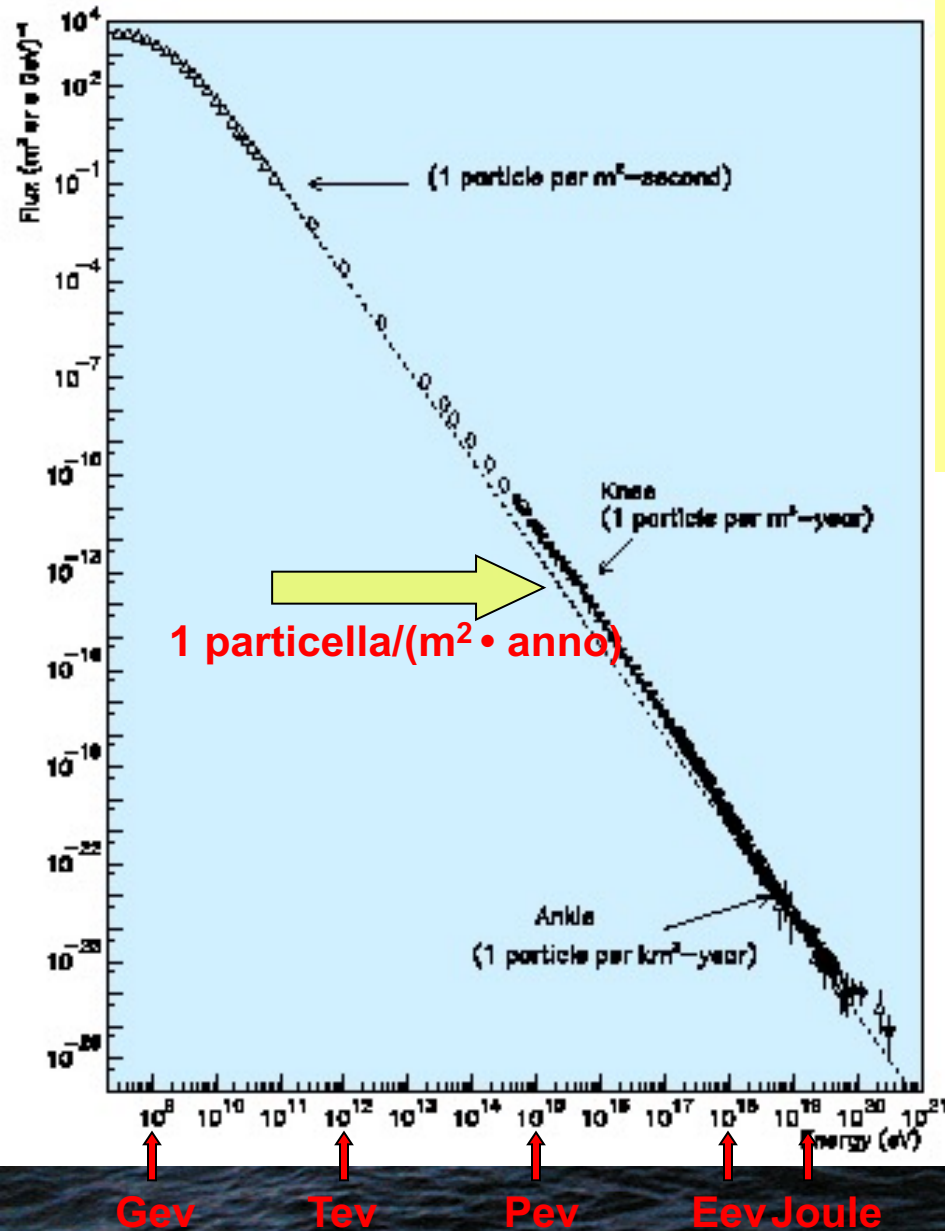
calorimetro elettromagnetico



# 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:

- ⇒ ApparatI con grandi superfici di rivelazione (apparatI a scintillatore, telescopi Cherenkov Imaging, 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”

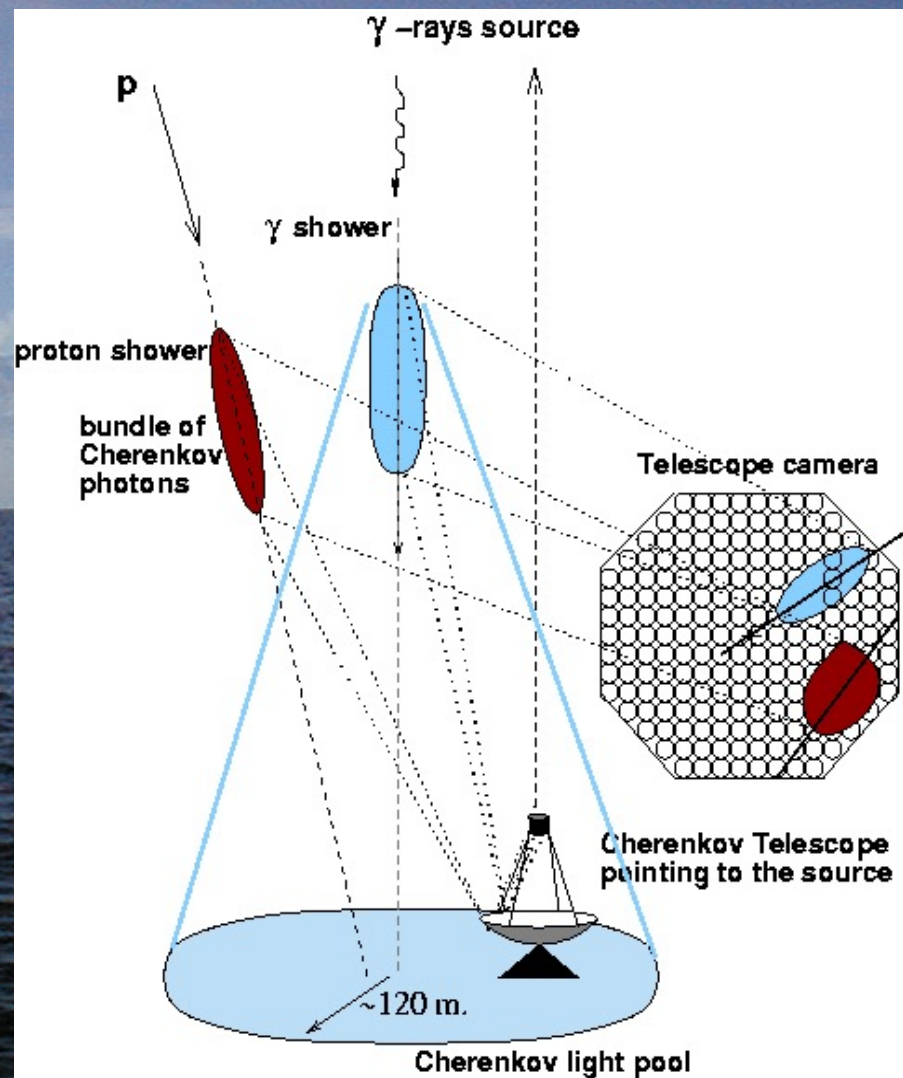




# La rivelazione “IACT”:

## 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.

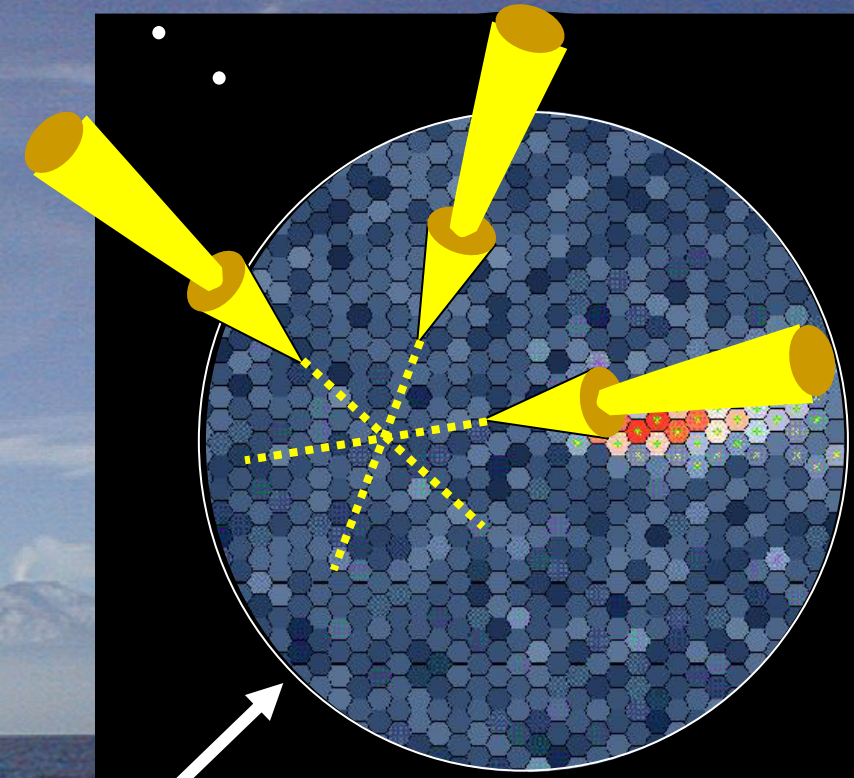




Imaging  
Atmospheric  
Cherenkov  
Technique

10km

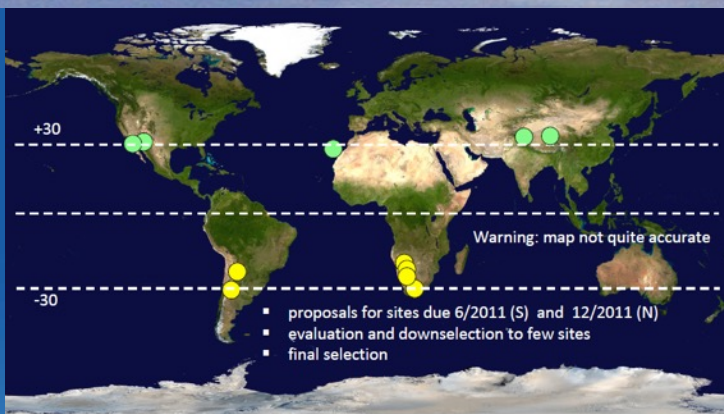
~50km<sup>2</sup>



- (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)

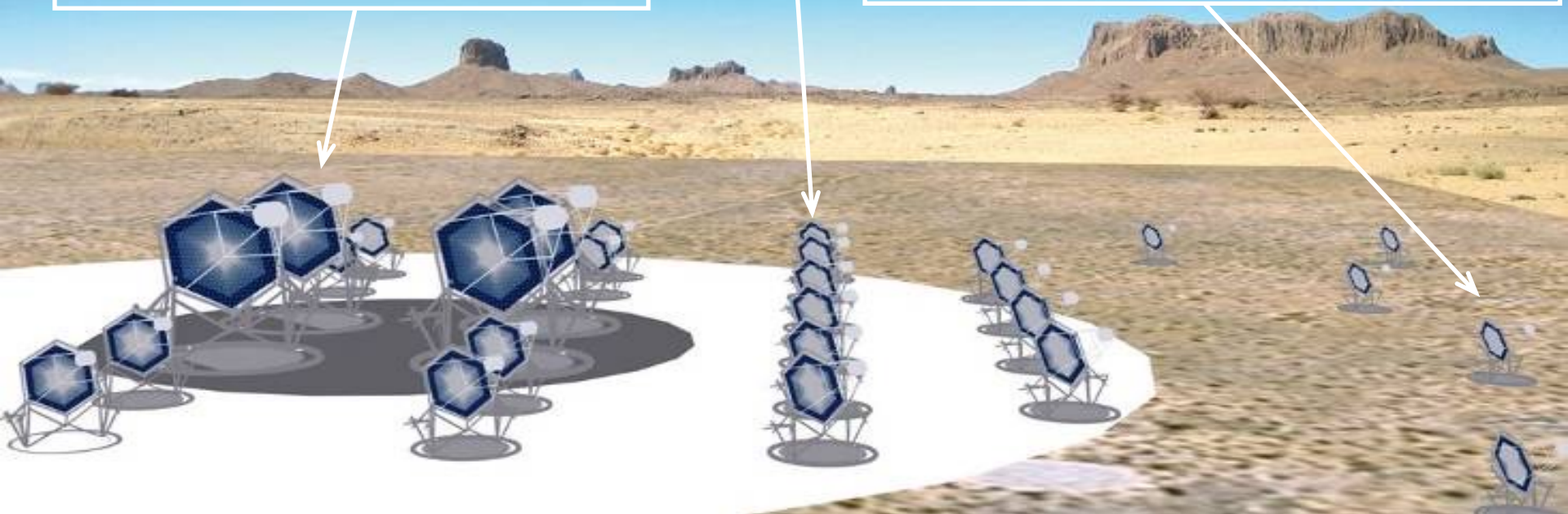


**2 apparati: emisferi Nord e Sud**  
**→ Uno sguardo su tutto l'universo**

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 km<sup>2</sup> area





# L'Osservatorio Pierre Auger in Argentina.

## The Pierre Auger Observatory, Argentina

### THE NEW DETECTORS

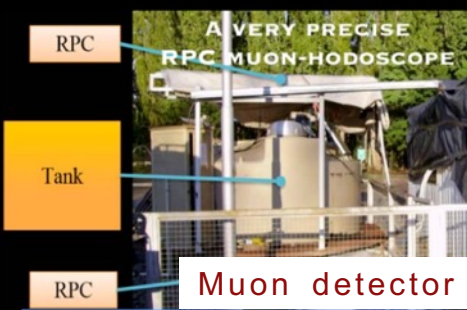
Muon detector



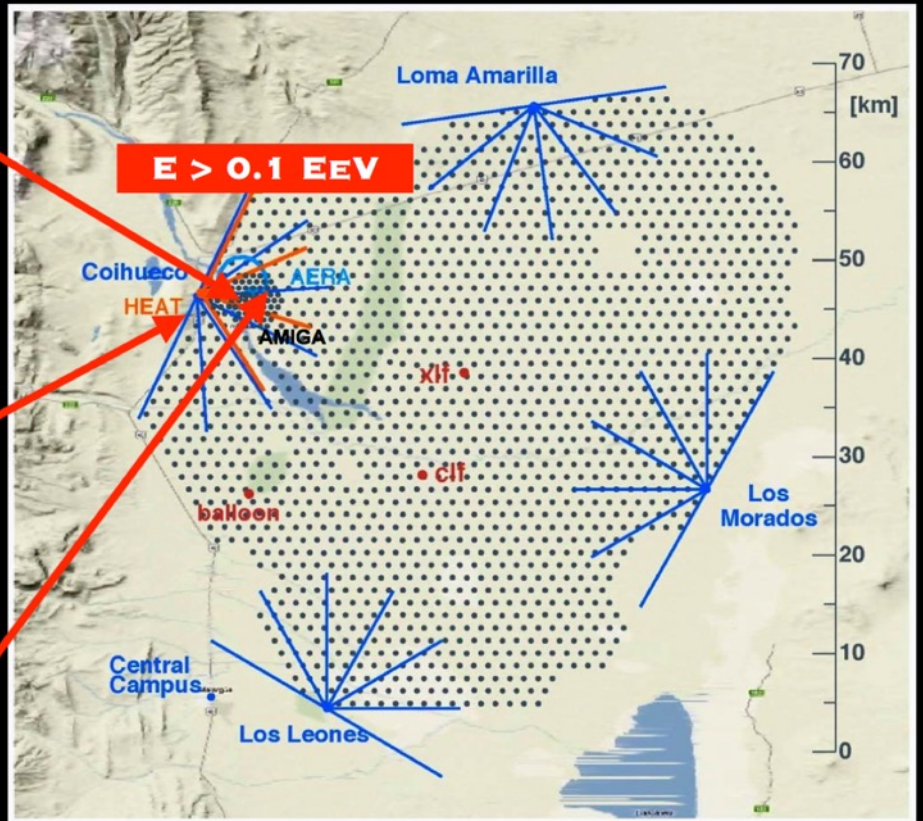
Radio detector

### THE INITIAL DETECTORS

### THE INITIAL DETECTORS

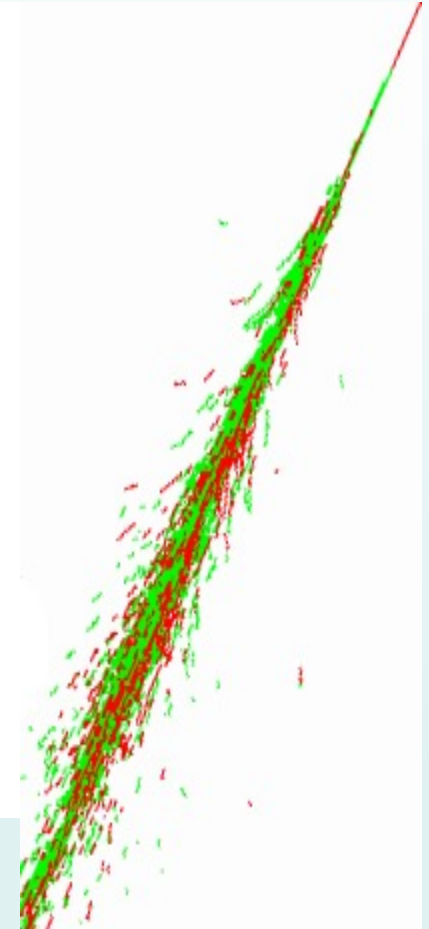
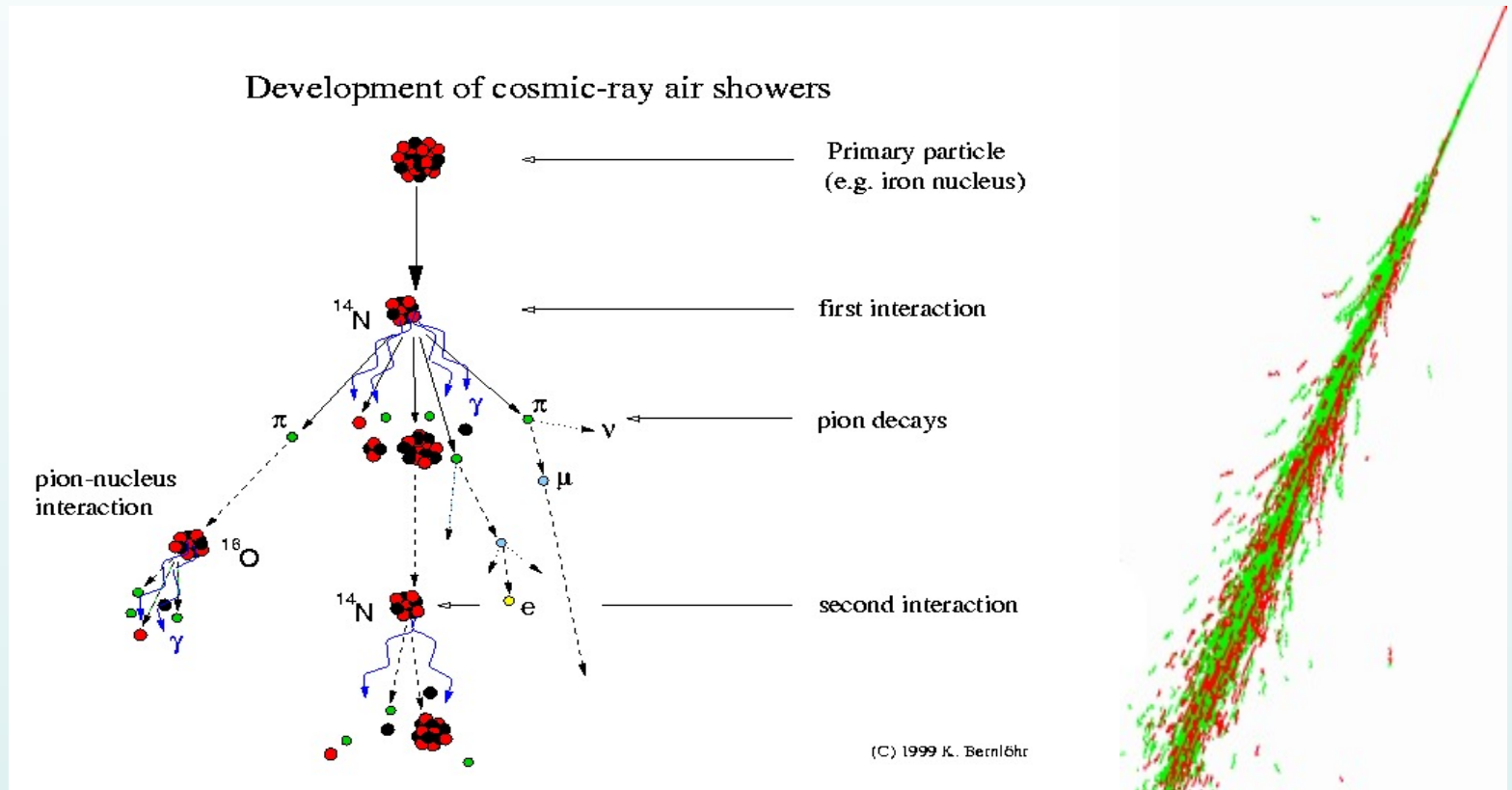


Calibration



I rivelatori che compongono l'Osservatorio Pierre Auger sono distribuiti su una superficie vasta più di 3000 km<sup>2</sup>. I rivelatori di superficie distano uno dall'altro per 1,5 km. I 4 rivelatori per fluorescenza osservano l'atmosfera sopra il rivelatore.

# Il fondo: neutrini atmosferici



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