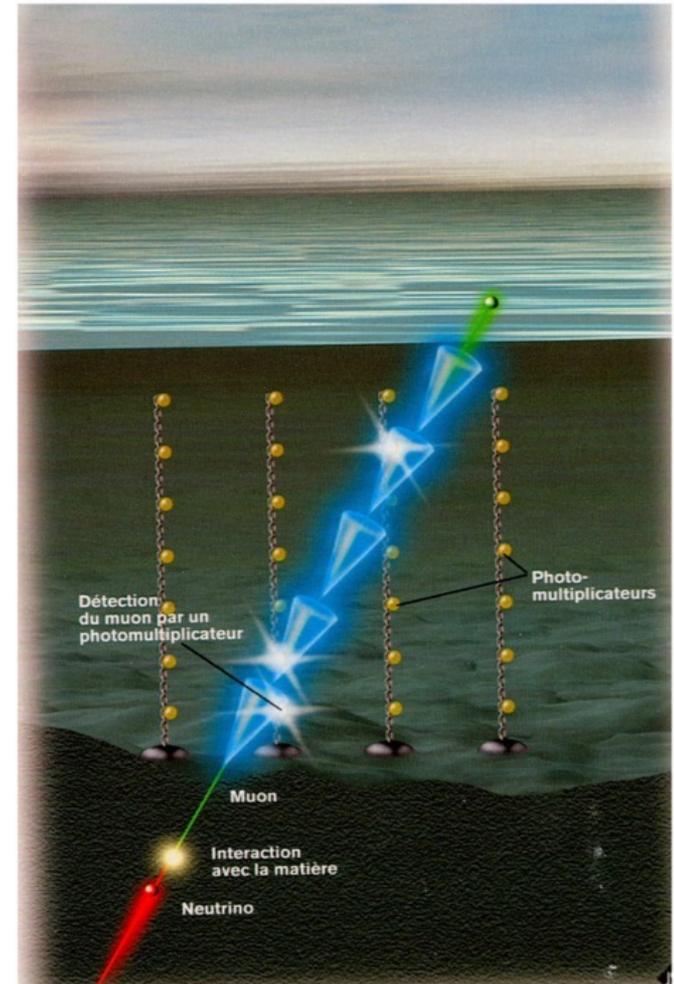


Astronomia con raggi cosmici carichi di altissima energia e con neutrini



Antonio Capone
Università di Roma "La Sapienza"

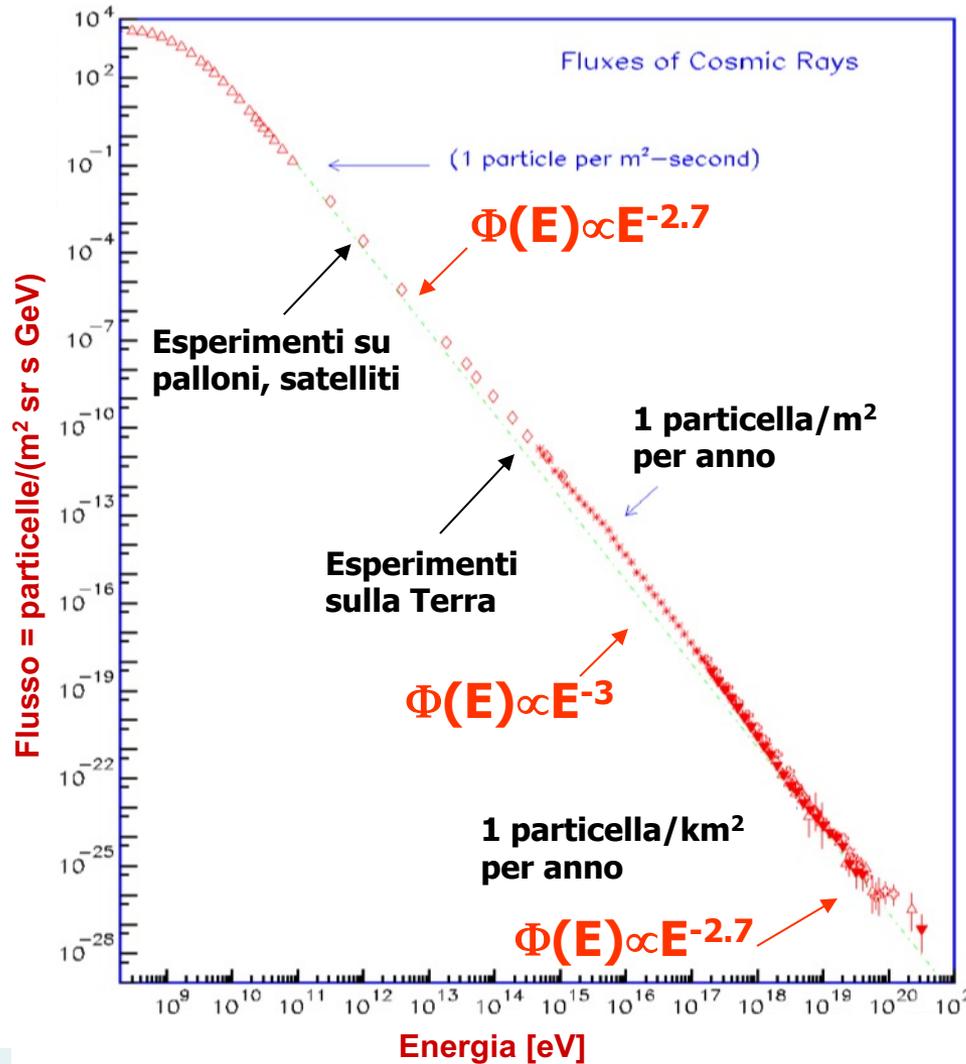
- I Raggi Cosmici: messaggeri da un Universo lontano
- Cosa conosciamo, cosa stiamo studiando
- Astronomia con neutrini
- Apparati sperimentali per "osservare" le regioni più attive ed energetiche dell'Universo



Copyright Science&Vie Juillet 1999

Cosa altro sappiamo oggi 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:

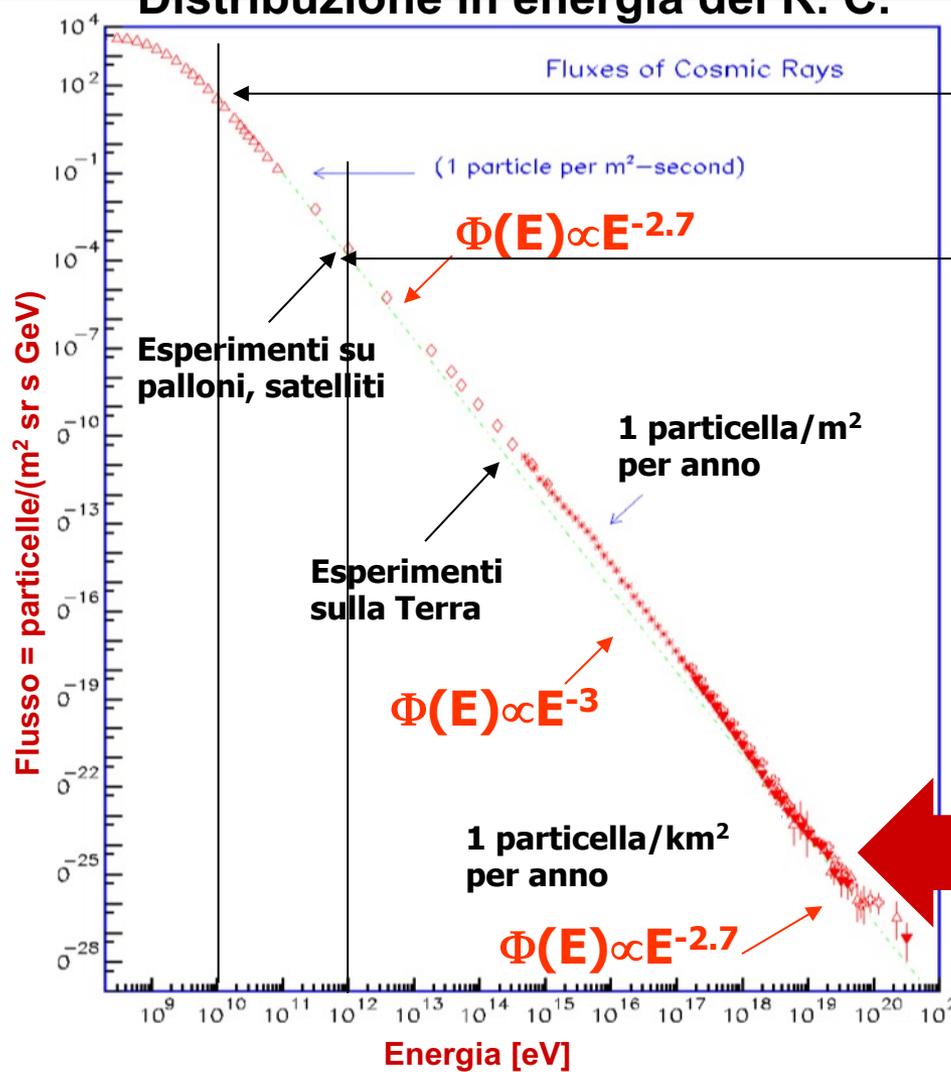
- Da dove vengono ? Dalla nostra Galassia ?
- Quale meccanismo è capace di accelerarle ?

– ...

$\Phi = \text{Flusso} = \text{particelle}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s} \cdot \text{GeV})$

Cosa comporta $\Phi(E) \propto E^{-2.7}$

Distribuzione in energia dei R. C.



Per $E = 10 \text{ GeV} \rightarrow \Phi(E) \sim 50 / (\text{m}^2 \text{ sr s})$

Per $E = 1000 \text{ GeV} \rightarrow \Phi(E) \sim 2 \cdot 10^{-4} / (\text{m}^2 \text{ sr s})$

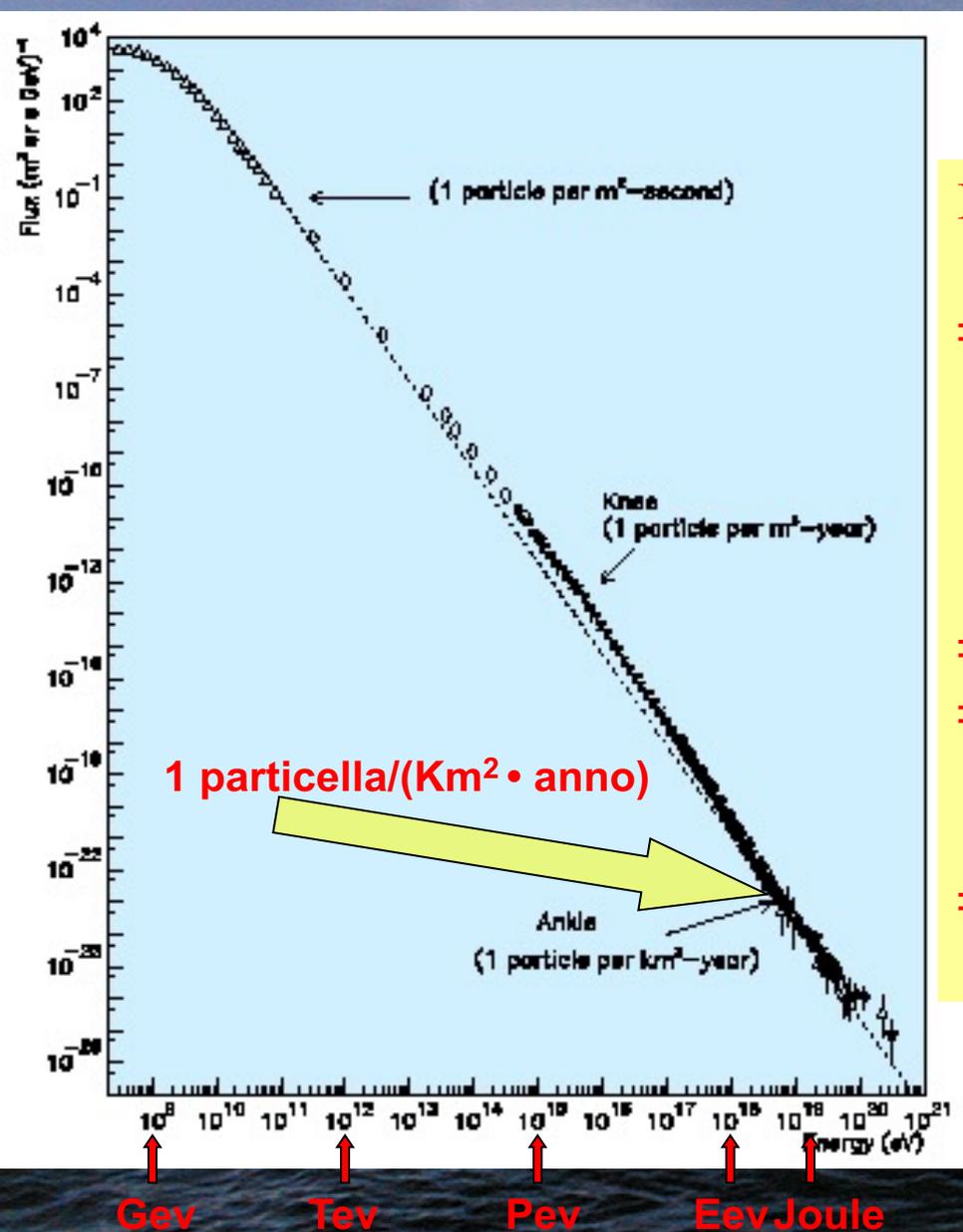
Il numero di eventi che si può misurare in un apparato con

- superficie $A \text{ [m}^2\text{]}$
- angolo solido $\Delta\Omega \text{ [sr]}$
- nel tempo $T \text{ [s]}$

è pari a $N_{\text{eventi}} = \Phi(E) \cdot A \cdot \Delta\Omega \cdot T$

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

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



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

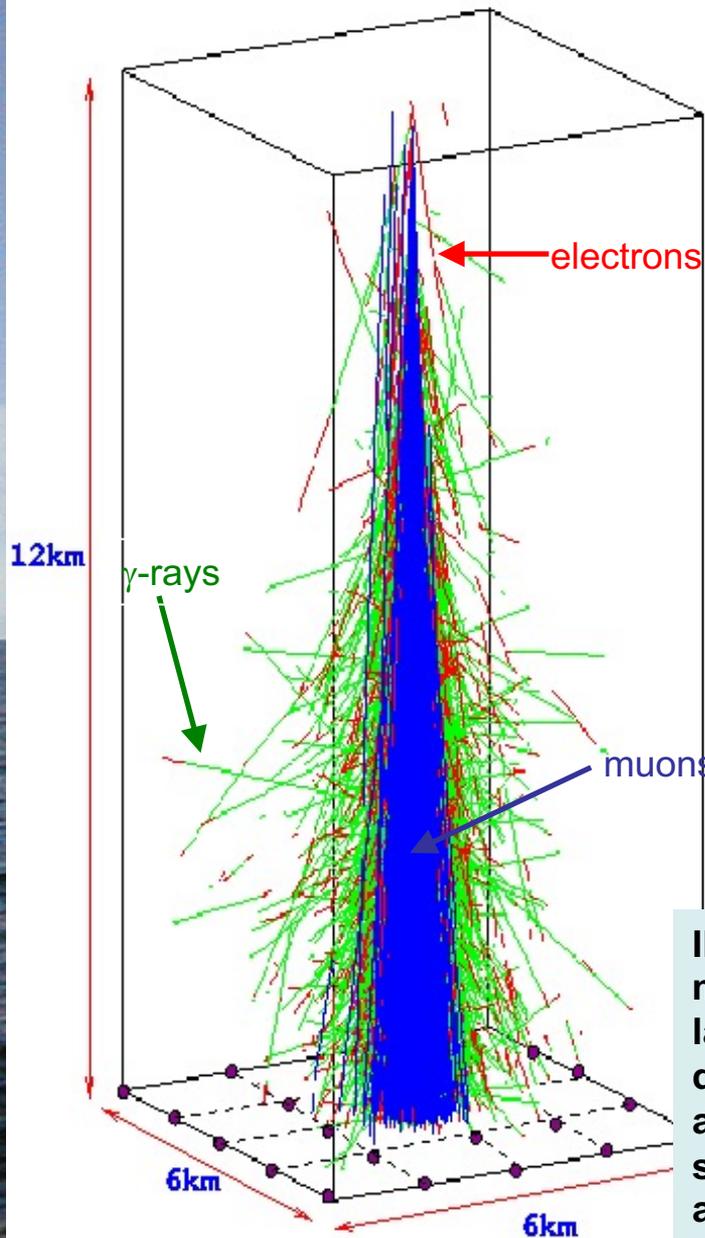
- ⇒ **Apparati con enormi superfici di rivelazione: $10^3\text{-}10^4 \text{ km}^2$ (rivelatori “ibridi” composti con apparati a scintillatore, rivelatori di fluorescenza nell’atm., apparati traccianti, ...)**
- ⇒ **sulla superficie terrestre**
- ⇒ **si studiano i “risultati” delle interazioni dei raggi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

Sciame di Alta energia nell'atmosfera e loro Rivelazione

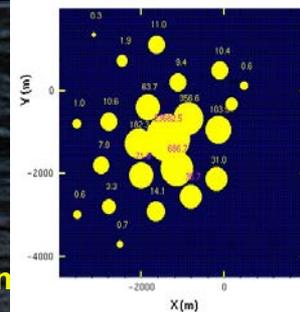
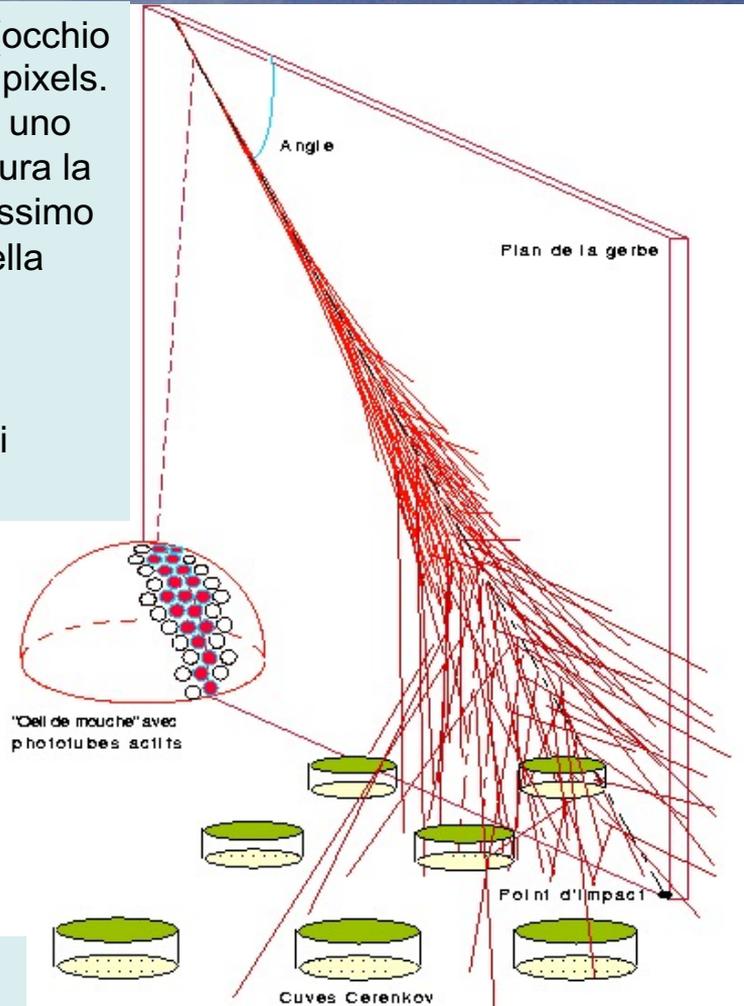
Il rivelatore tipo Fly's Eye (occhio di mosca) è composto da pixels. Ogni pixel riceve la luce in uno stretto angolo solido e misura la luce di fluorescenza. Il massimo dello sciame è funzione della energia del primario E_p .

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

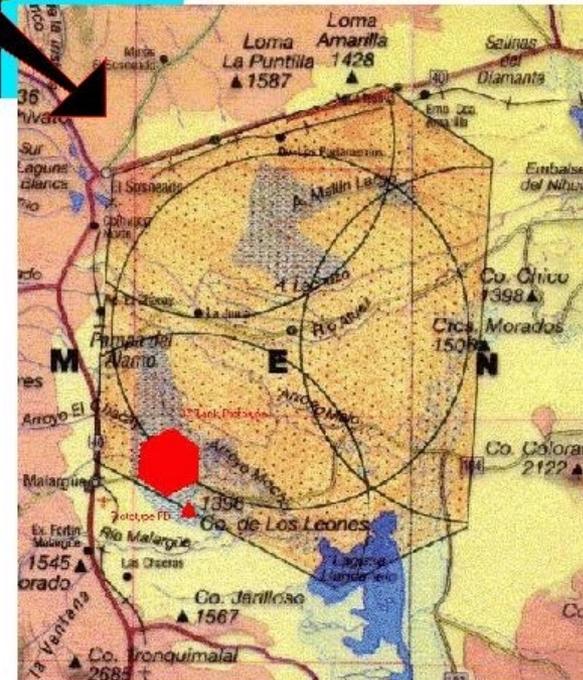
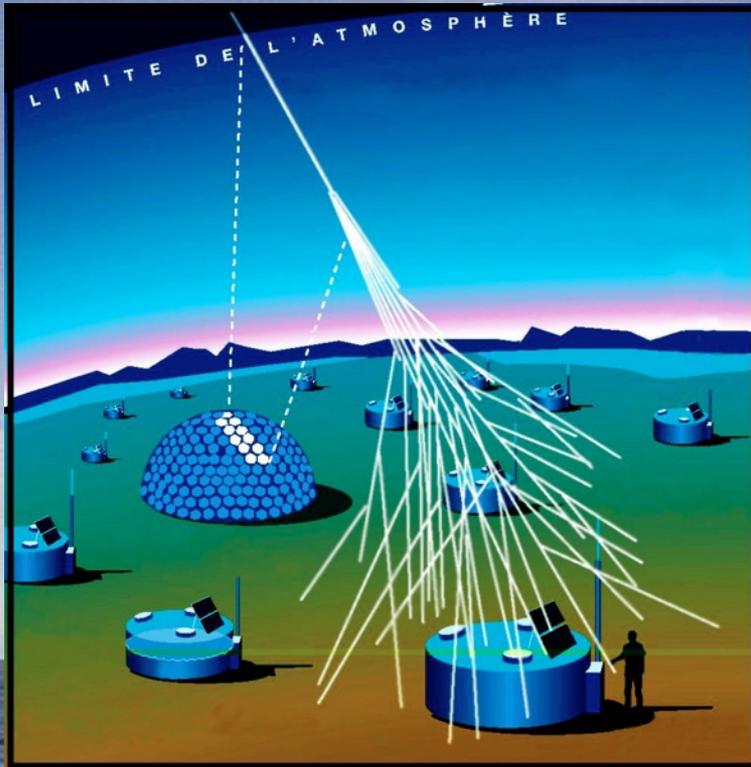
dove X_0 dipende dal tipo di primario



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 km²)

In red: engineering array

Circles: average range of the fluorescence det.

Dots: the 1600 detector stations (tanks)

L'Osservatorio Pierre Auger in Argentina.

The Pierre Auger Observatory, Argentina

THE NEW DETECTORS

Muon detector



3 HIGH-ELEVATION FD
FOV 30-60°

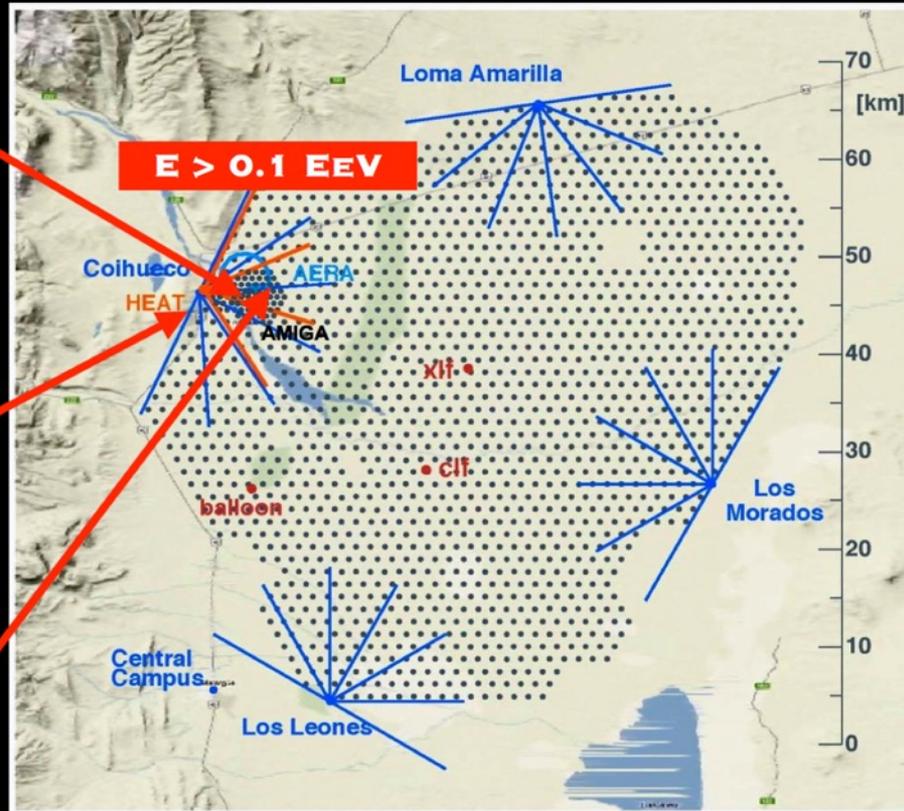
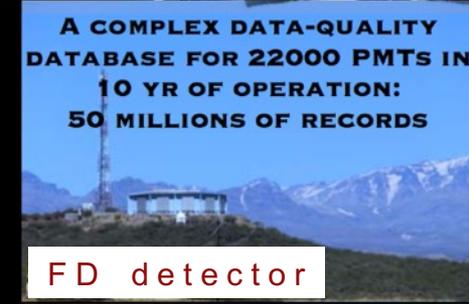
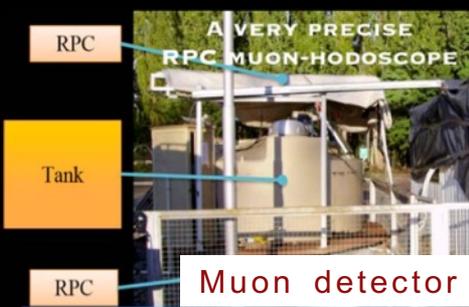


153 RADIO ANTENNAS
GRADED 17 KM² ARRAY
COMPLETED APRIL 2015



Radio detector

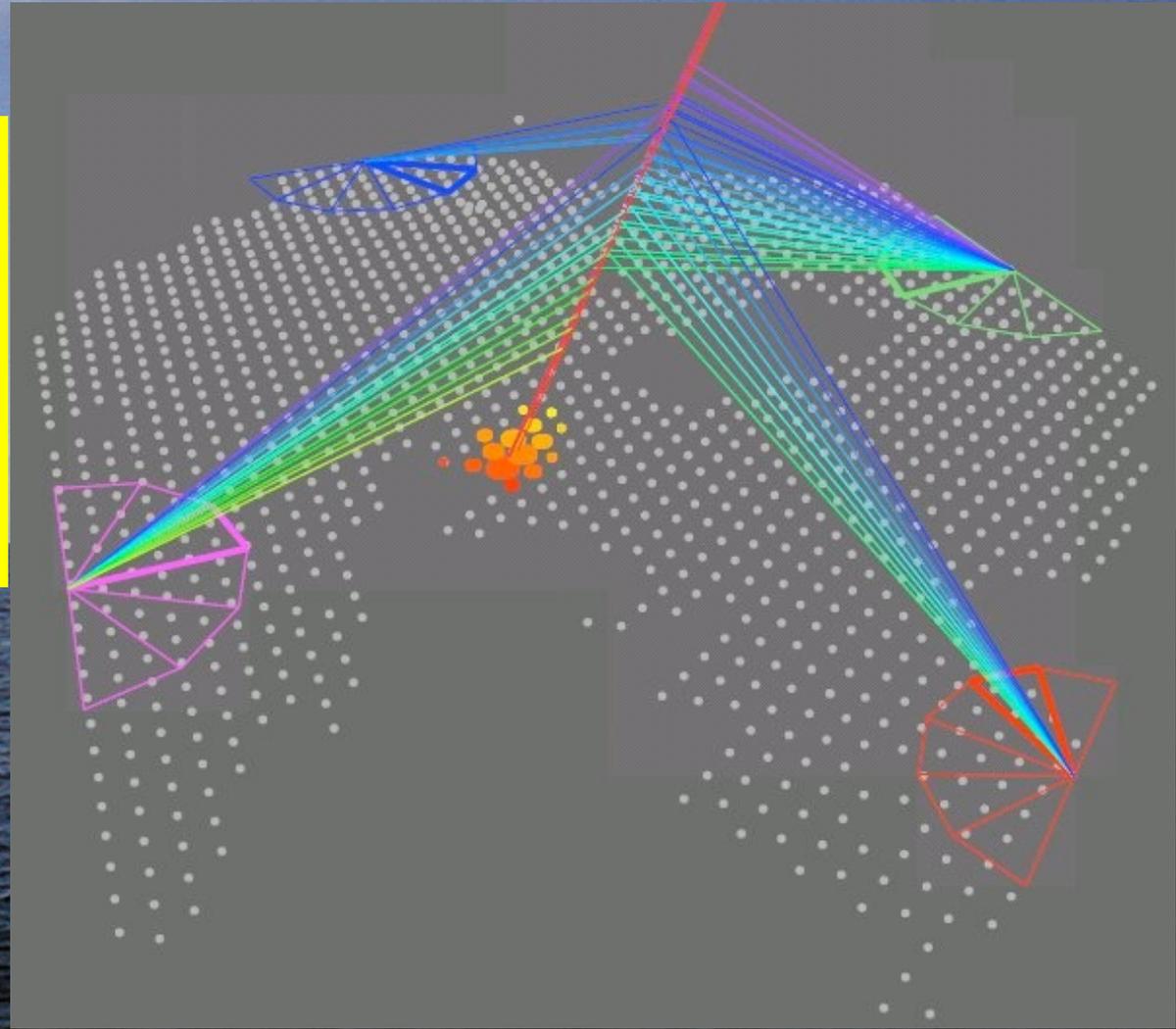
THE INITIAL DETECTORS



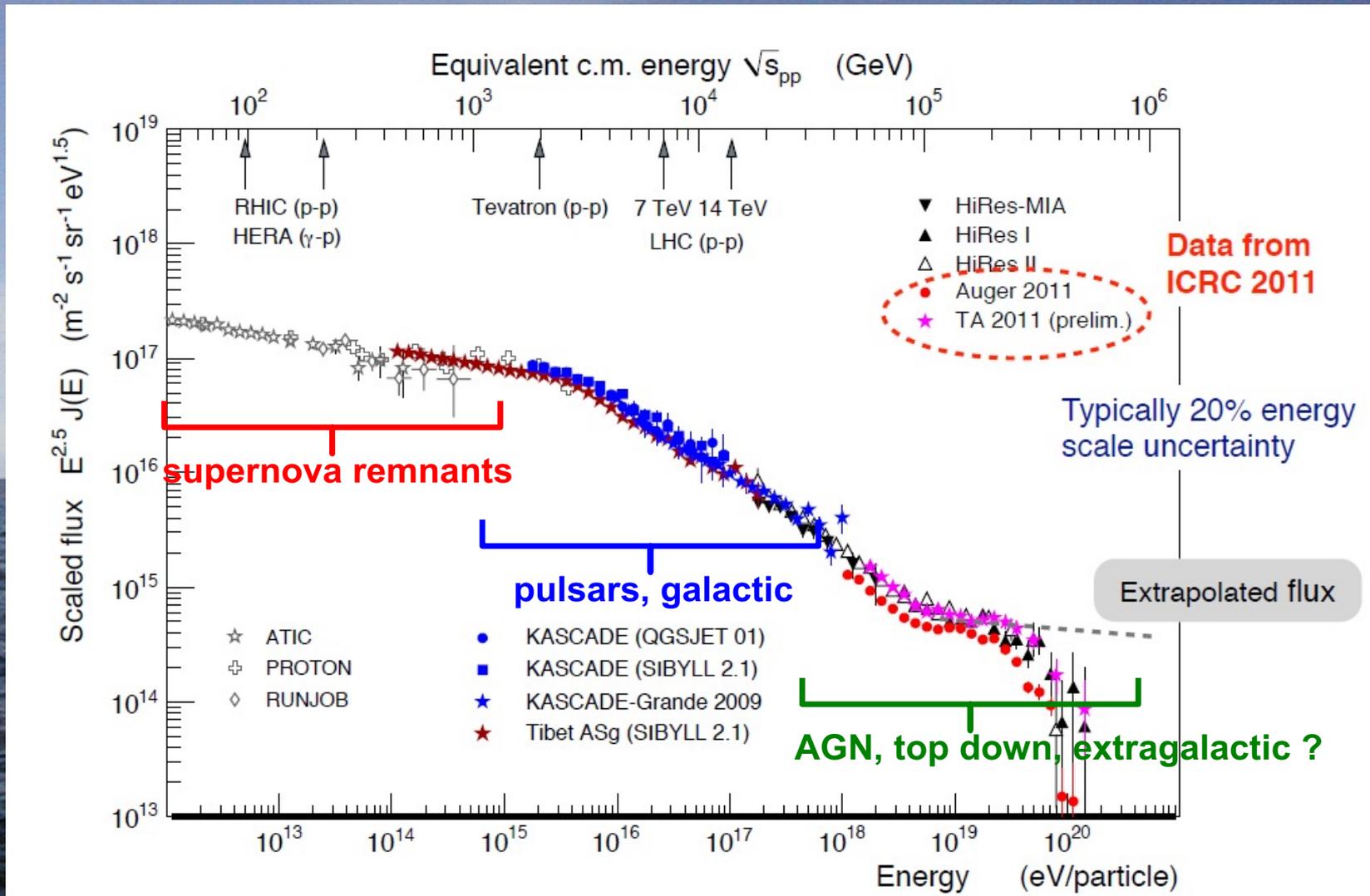
I rivelatori che compongono l'Osservatorio Pierre Auger sono distribuiti su una superficie vasta più di 3000 km². I rivelatori di superficie distano uno dall'altro per 1,5 km. I 4 rivelatori per fluorescenza osservano l'atmosfera sopra il rivelatore.

Un "Golden Event" visto dall'Osservatorio Pierre Auger

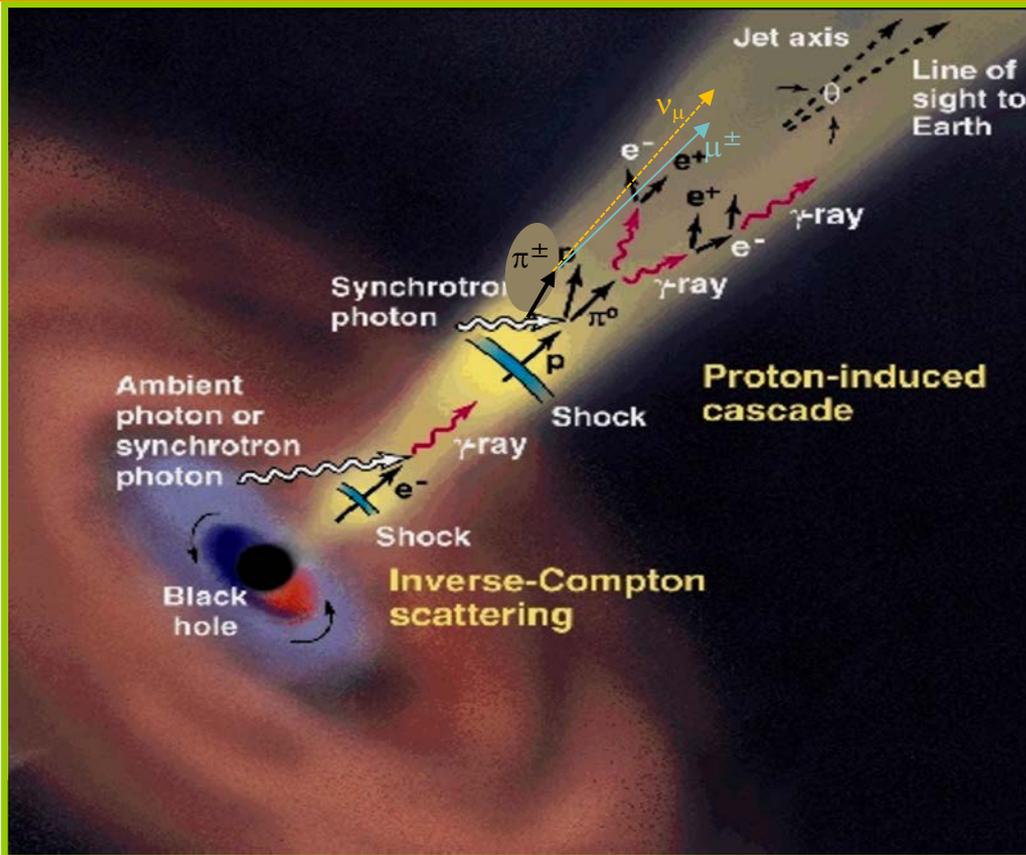
Se lo stesso evento è "visto" dai rivelatori per fluorescenza e termina con lo sciame che investe il rivelatore di superficie si hanno due misure indipendenti dell'energia del primario: intercalibrazione !



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



Quali processi di accelerazione?, Dove ?



“Acceleratori” di particelle di altissima energia:

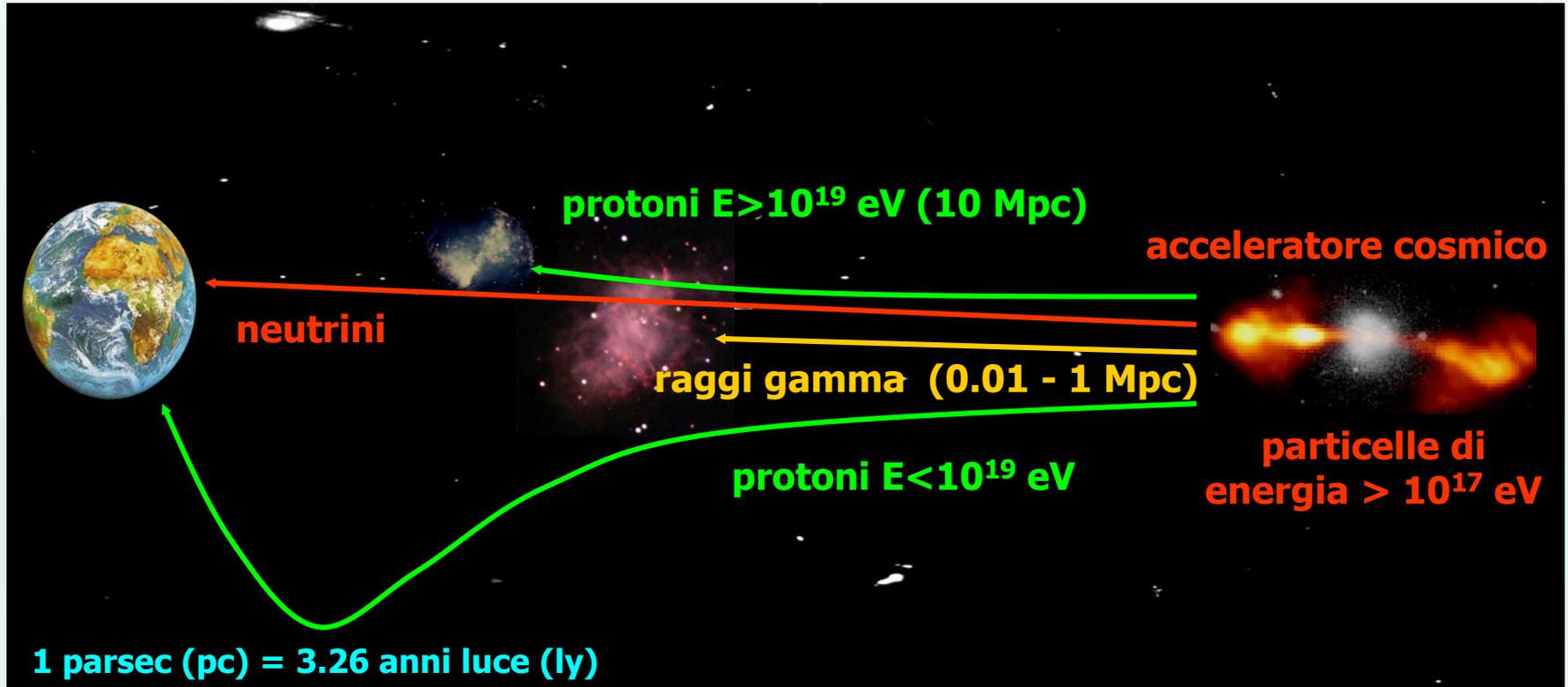
Nuclei Galattici Attivi (AGN), Gamma Ray Burst (GRB), Micro Quasars ...



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

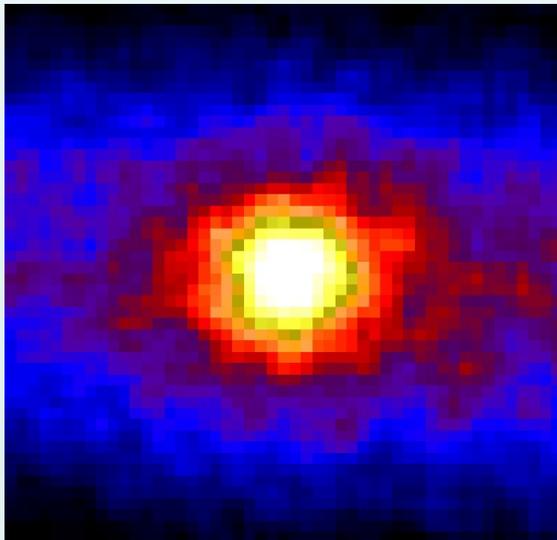
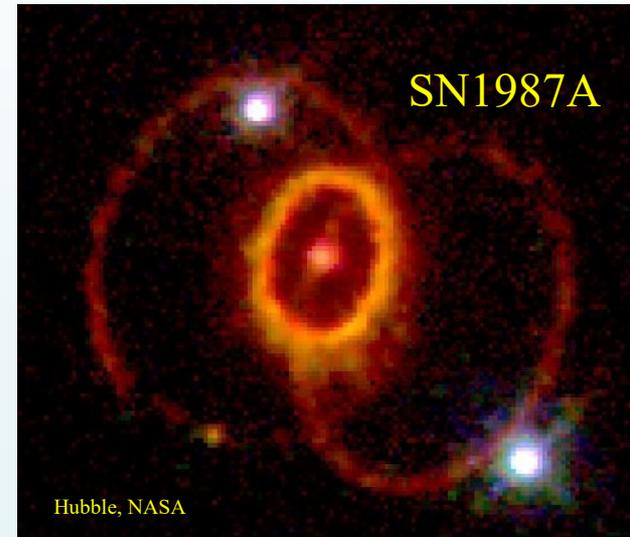
Diverse particelle, diversi orizzonti ...

- p e 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



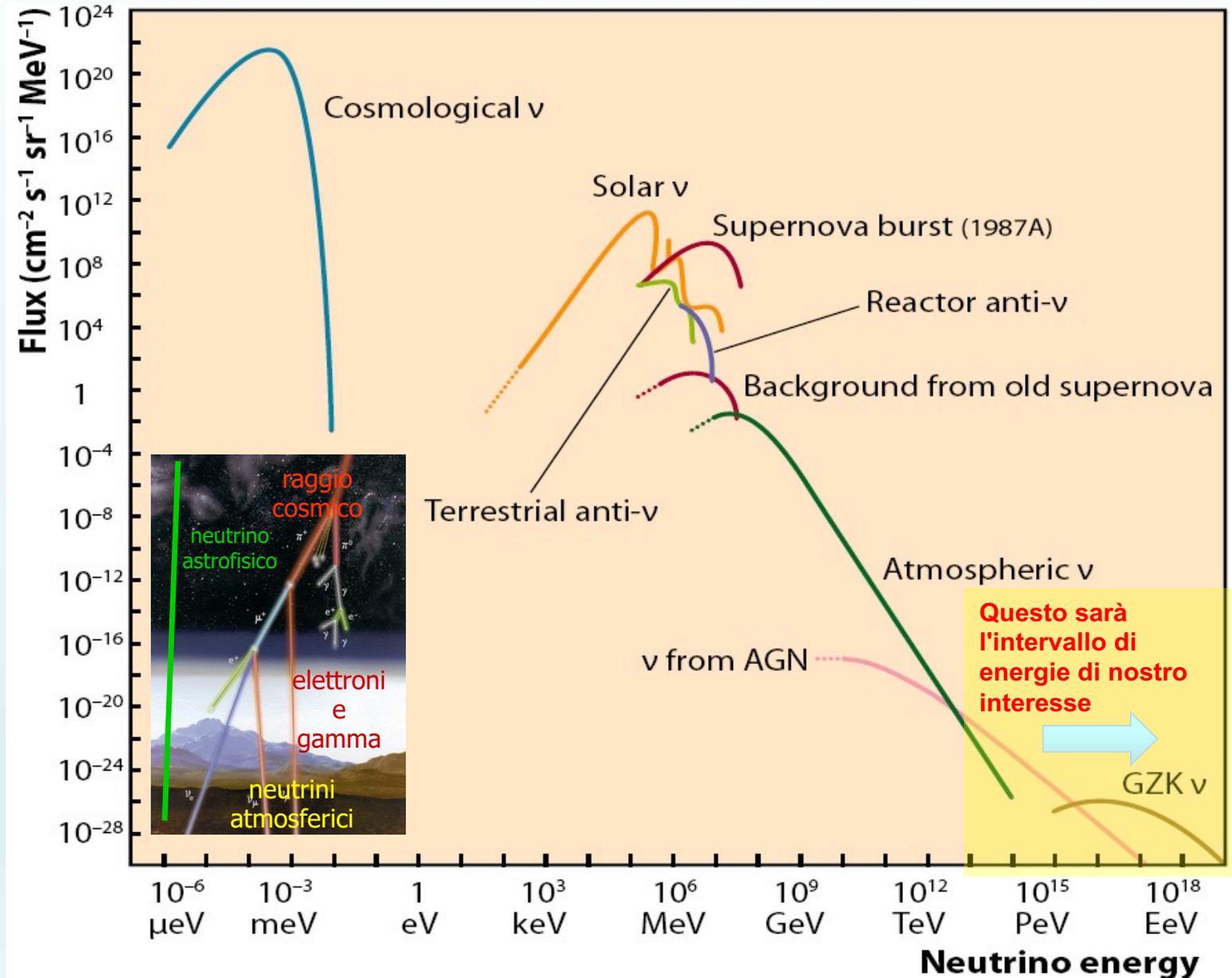
L'astronomia con ν è già cominciata ...

**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



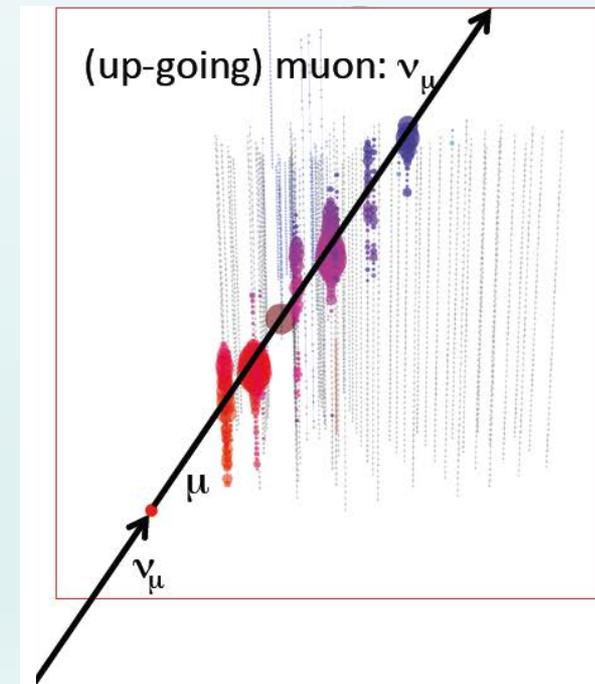
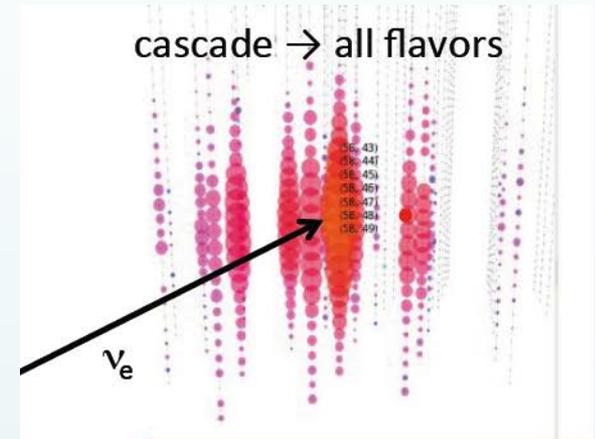
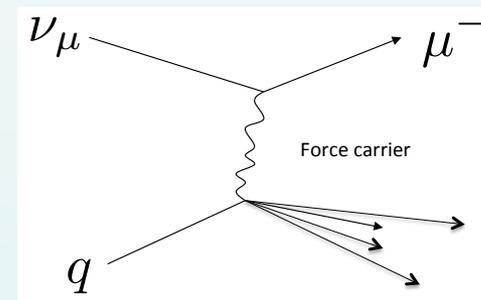
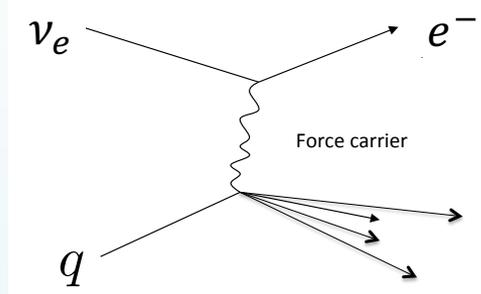
Come rivelare i neutrini ???

Elementary Particles

Quarks	<i>u</i> up	<i>c</i> charm	<i>t</i> top	Force Carriers
	<i>d</i> down	<i>s</i> strange	<i>b</i> bottom	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	<i>g</i> gluon
	<i>e</i> electron	μ muon	τ tau	<i>Z</i> Z boson
				<i>W</i> W boson

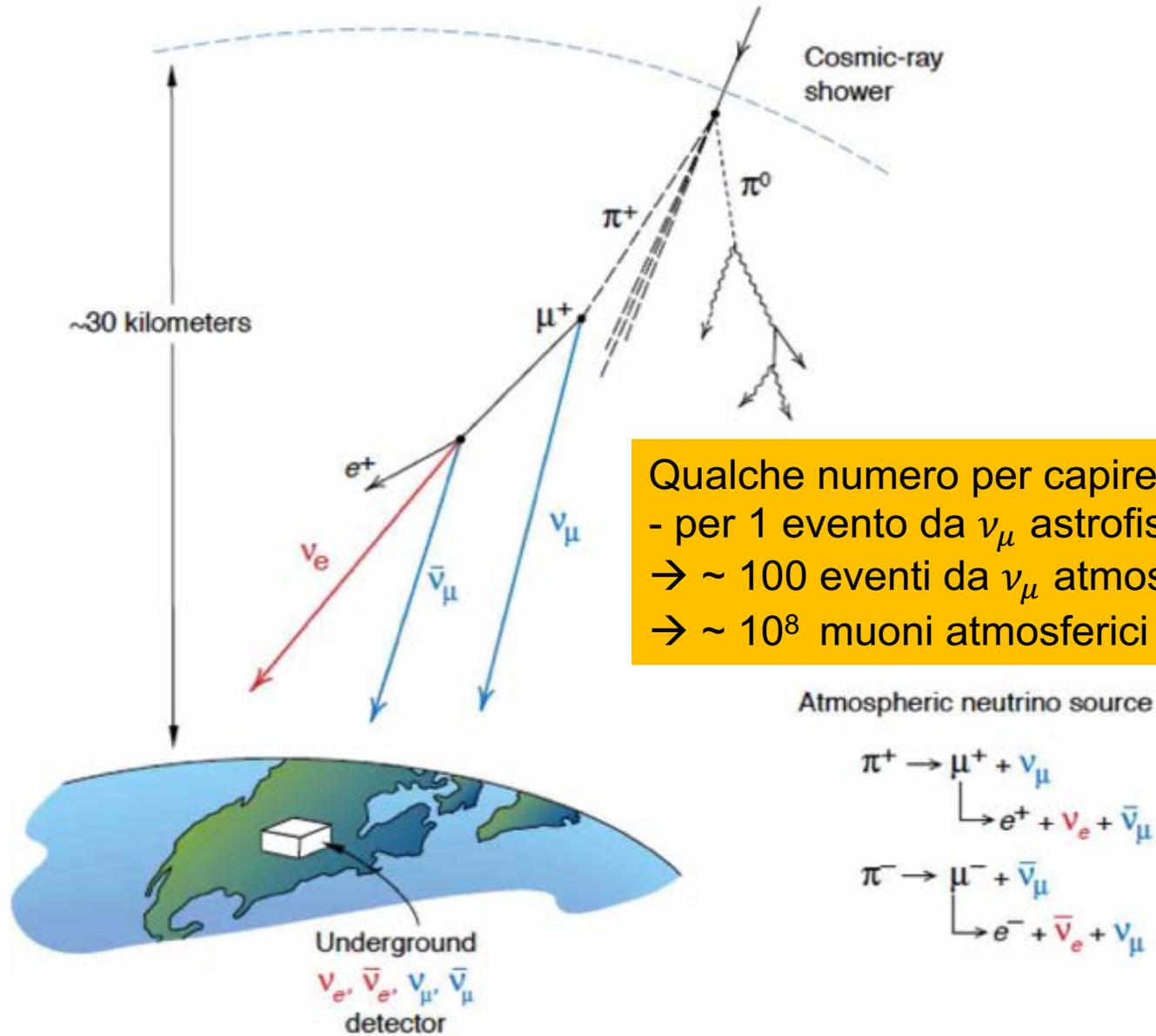
I II III

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"

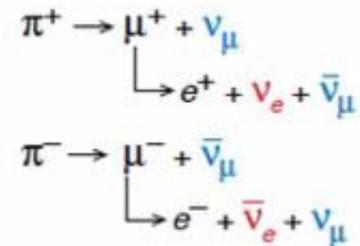
Intensi flussi di muoni provengono dalla atmosfera ...



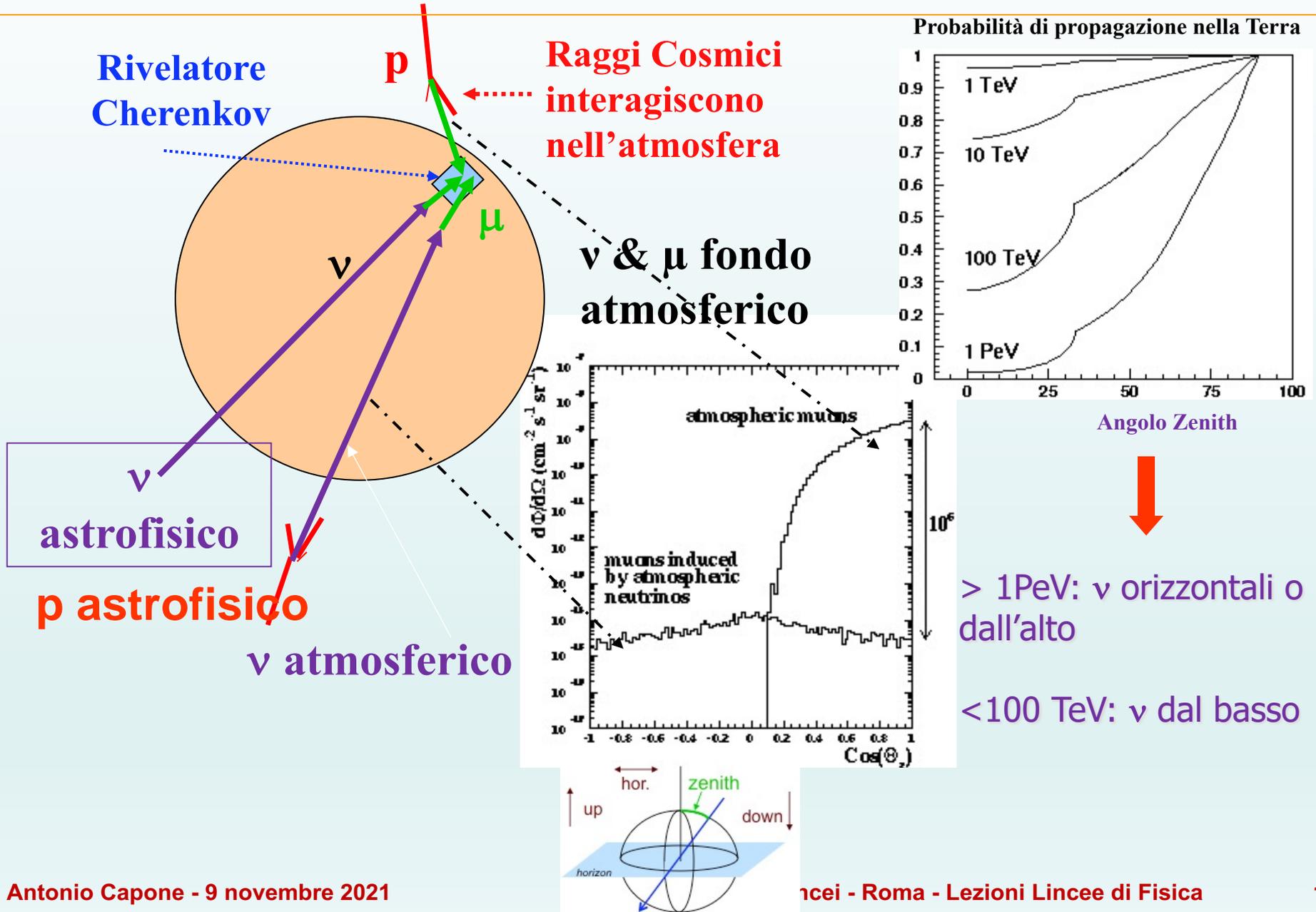
Qualche numero per capire ...

- per 1 evento da ν_μ astrofisico
- ~ 100 eventi da ν_μ atmosferico
- ~ 10^8 muoni atmosferici

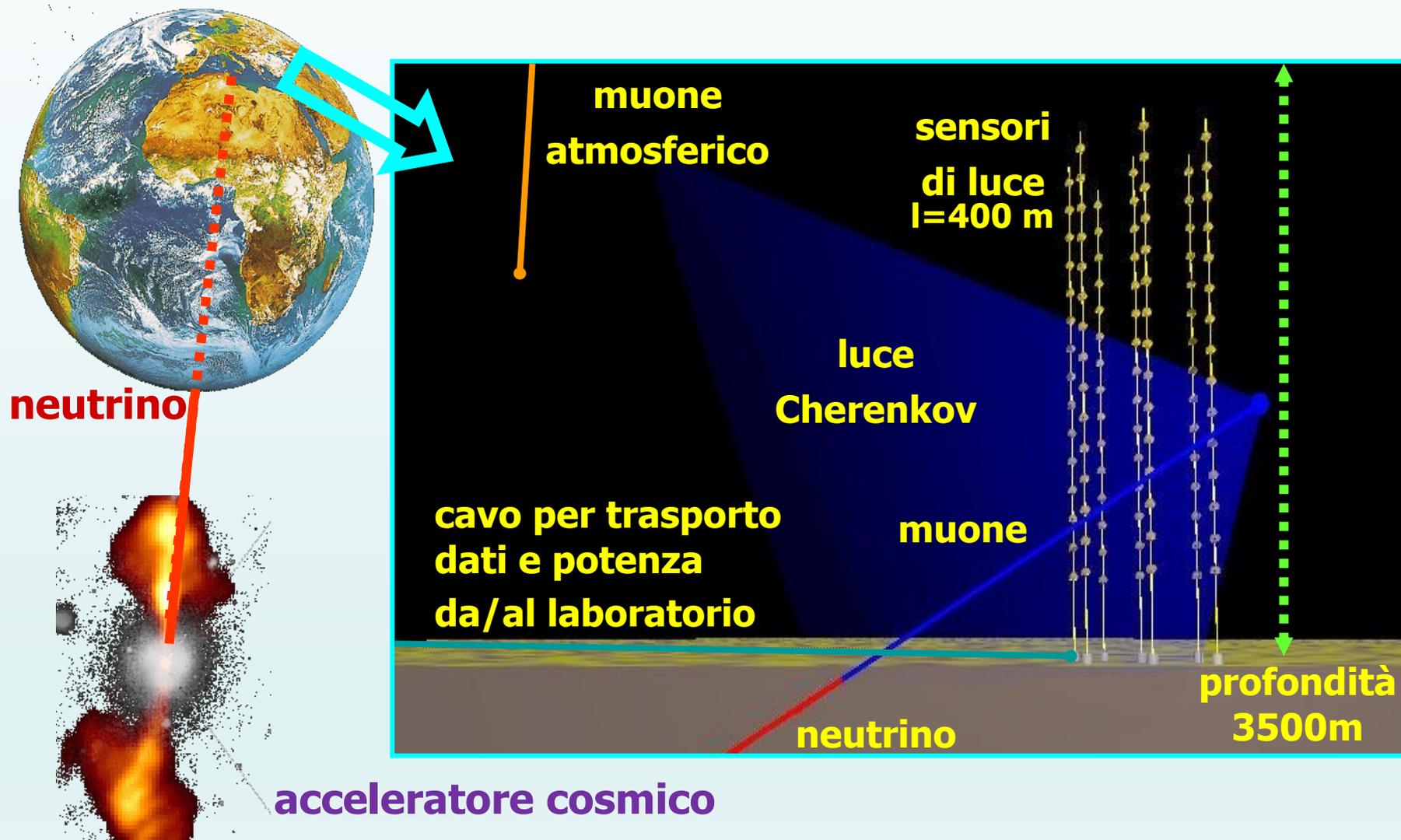
Atmospheric neutrino source



Necessità di un rivelatore sottomarino

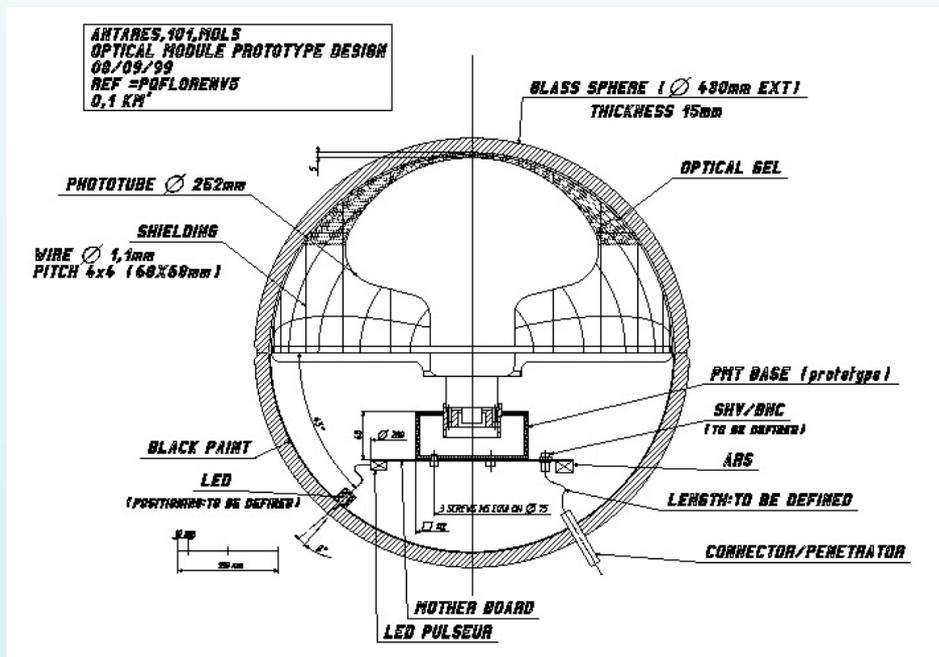


Un rivelatore Cerenkov sottomarino

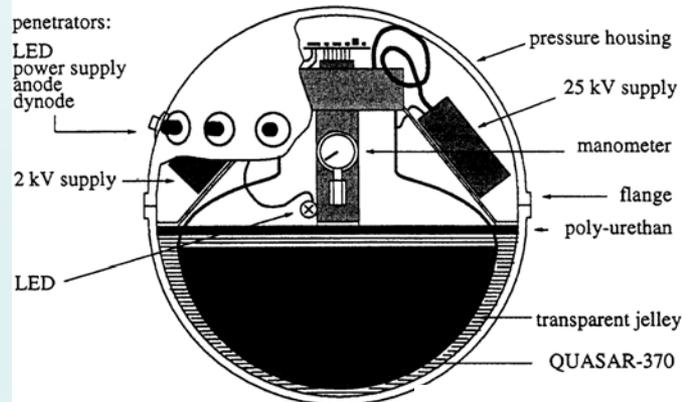
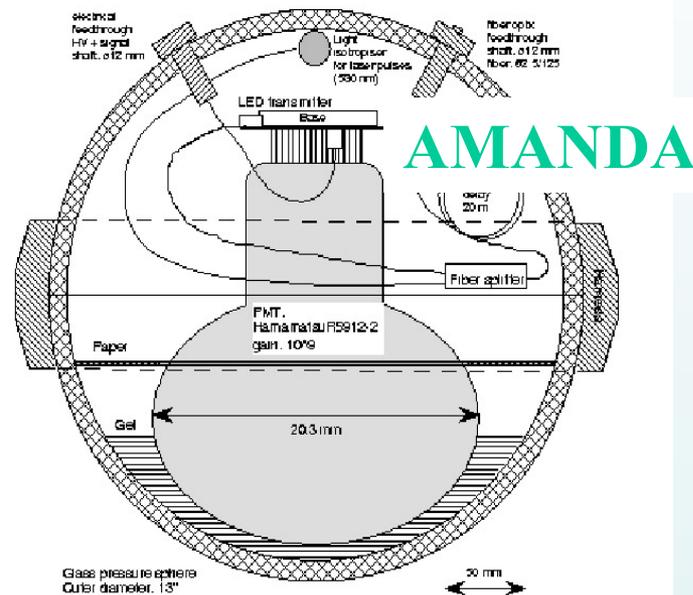


Moduli ottici per telescopi di v sottomarini

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

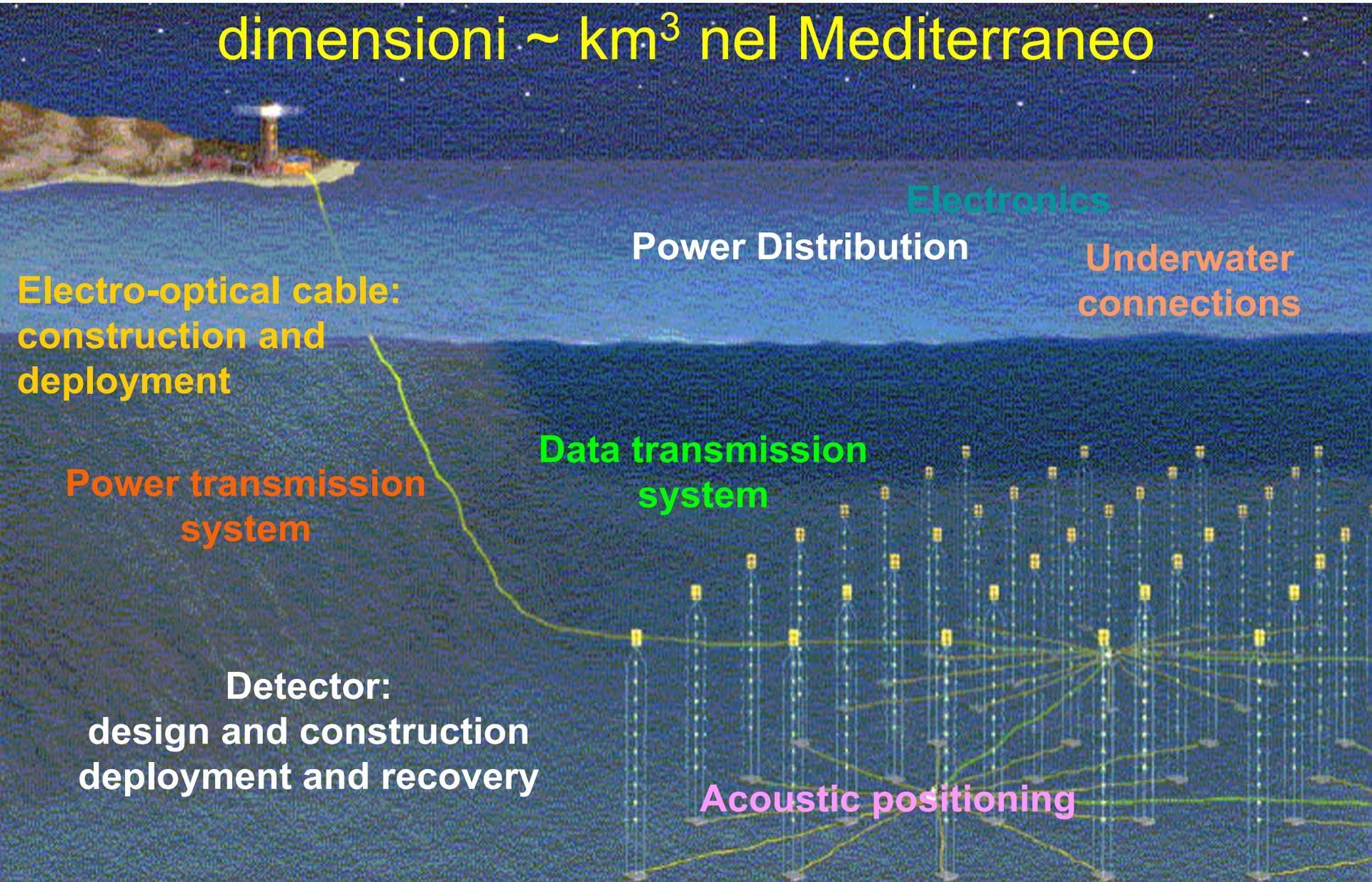


ANTARES

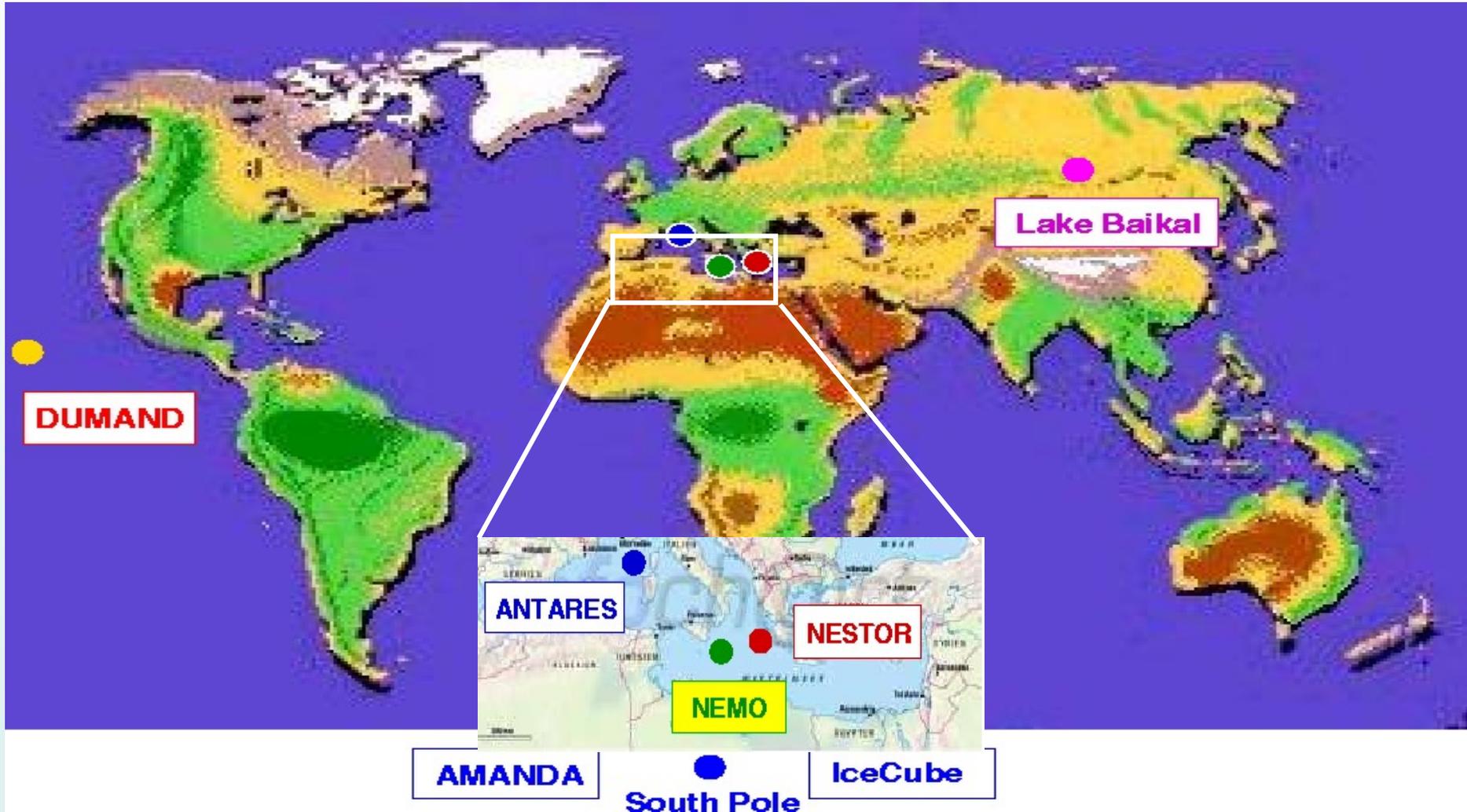


BAIKAL

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



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

Il Telescopio per Neutrini IceCube al Polo Sud

A 3-D cosmic-ray detector:
 Two different kinds of events
 Closely related scientifically:

- Cosmic rays after propagation
- Neutrinos from cosmic ray sources
- $\nu_e:\nu_\mu:\nu_\tau = 1:2:0 \rightarrow 1:1:1$

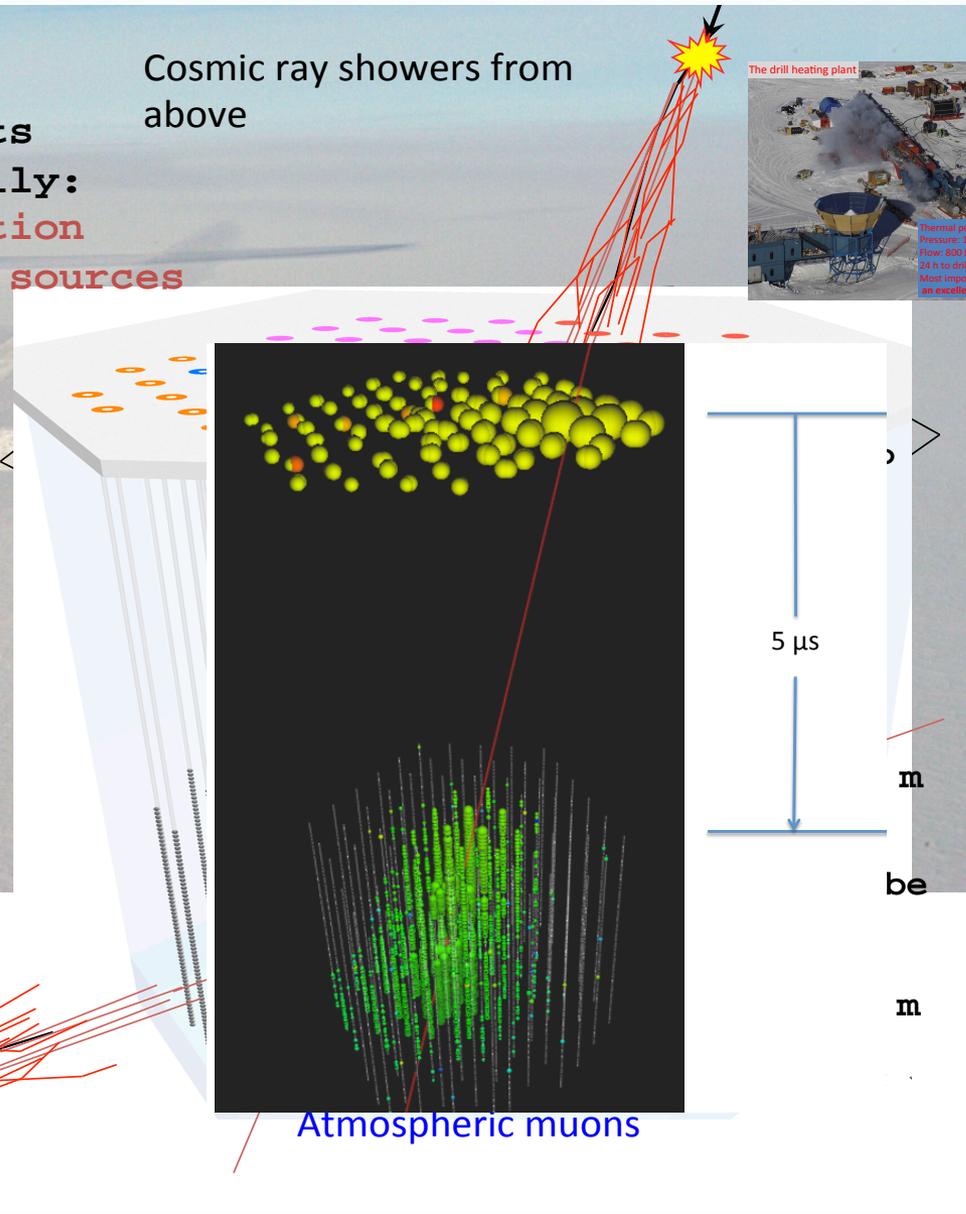
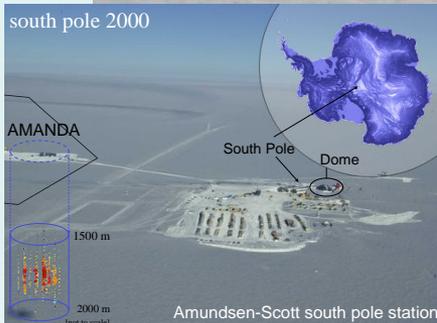
Cosmic ray showers from above



South Pole
 2835 m.a.s.l.

Neutrinos from all directions

- ν_μ -induced μ (from below)
- all flavors starting inside detector

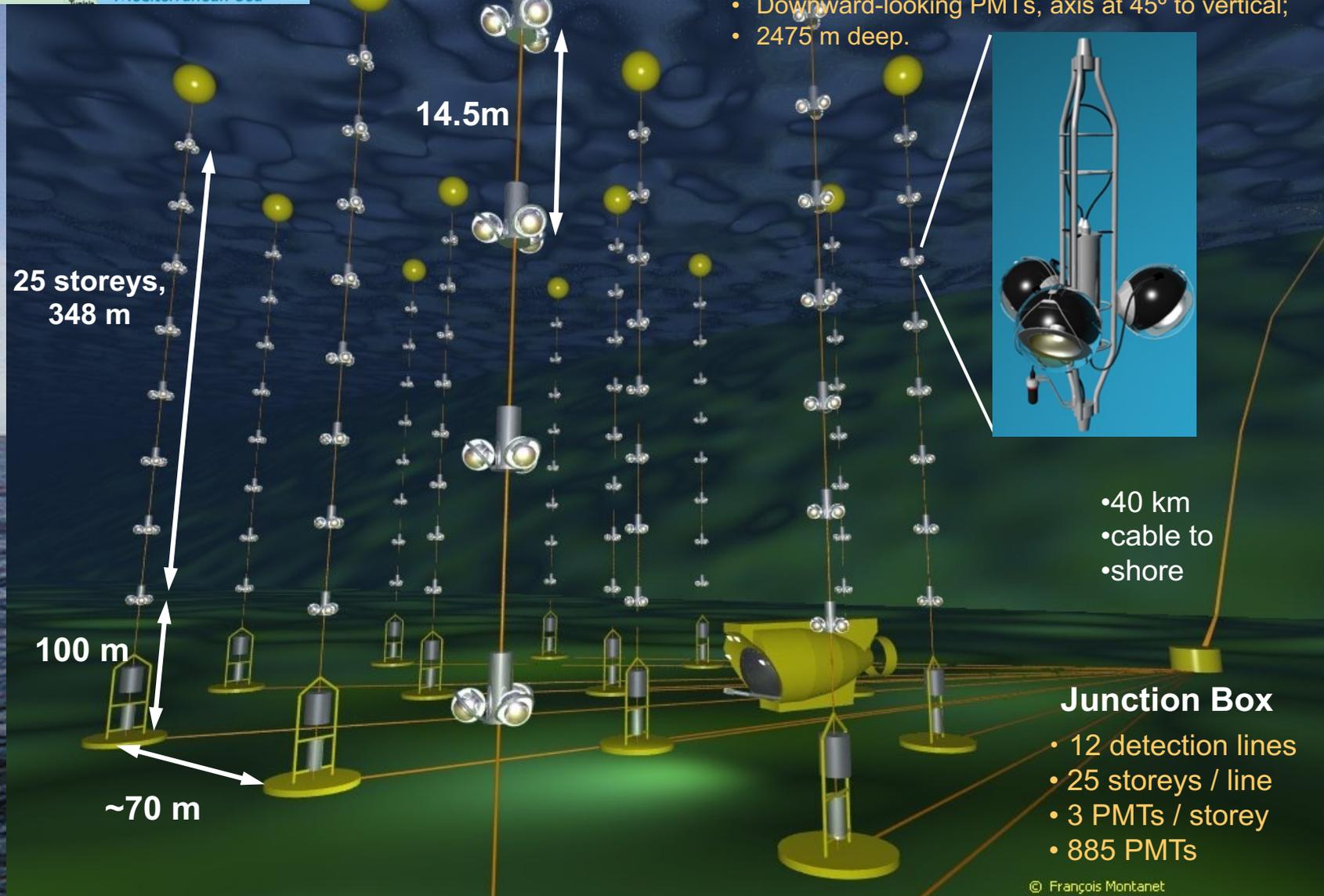


Atmospheric muons

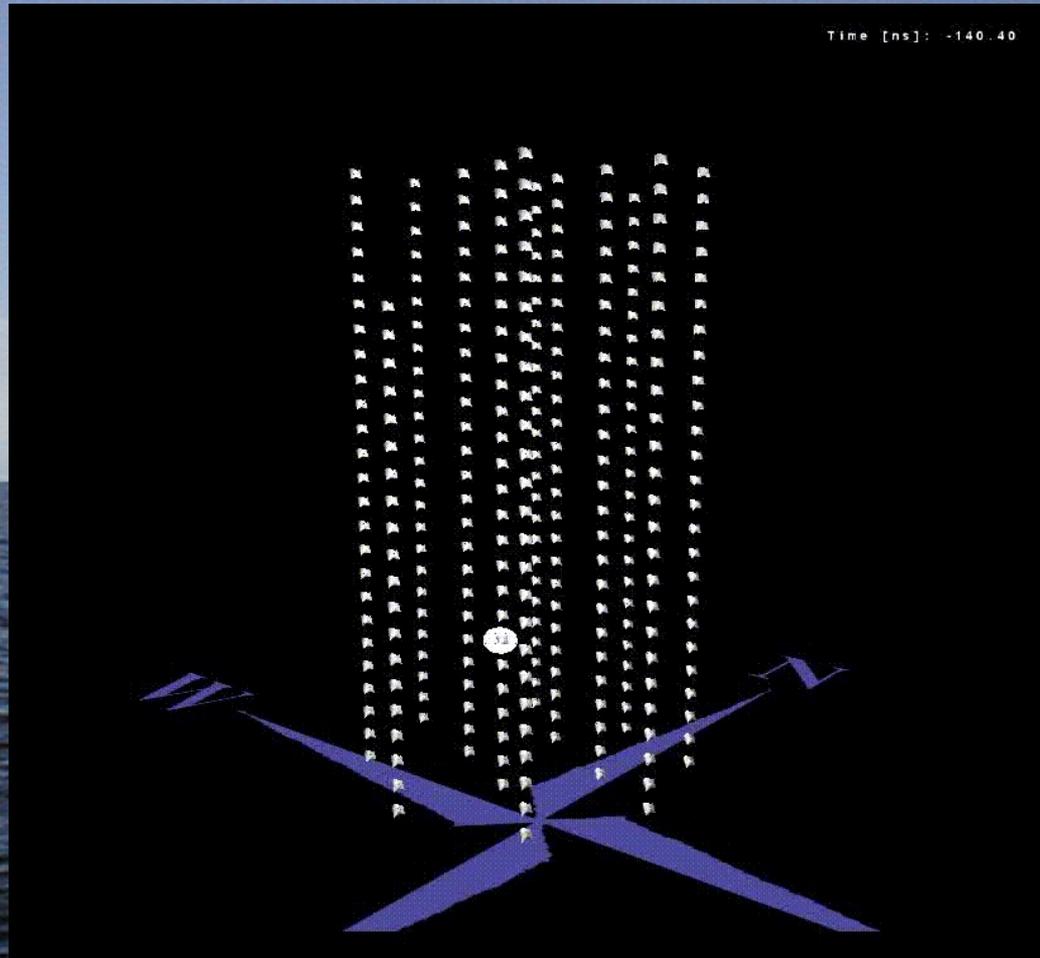


L'esperimento ANTARES

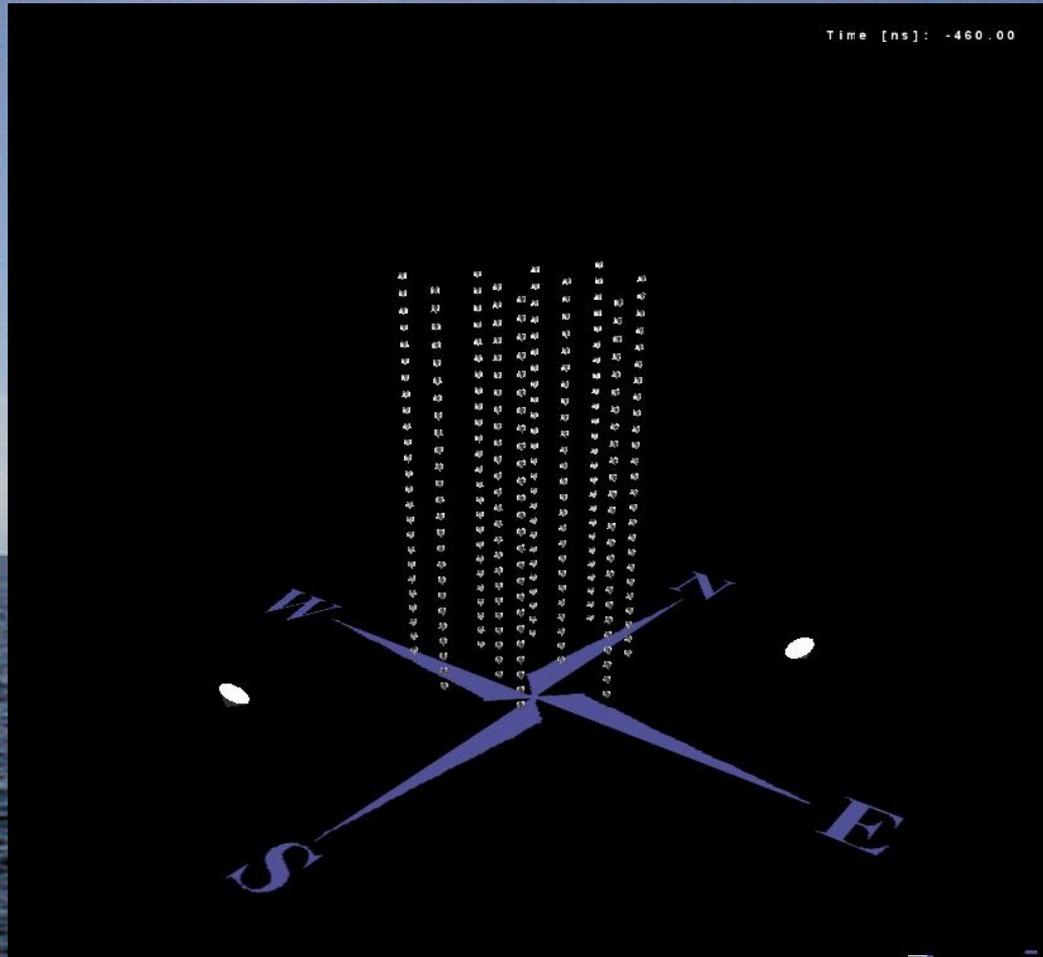
- String-based detector;
- Underwater connections by deep-sea submersible;
- Downward-looking PMTs, axis at 45° to vertical;
- 2475 m deep.



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

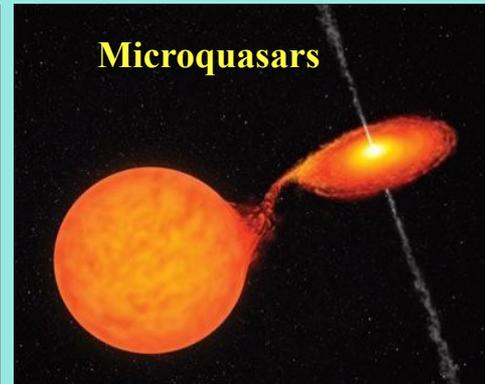
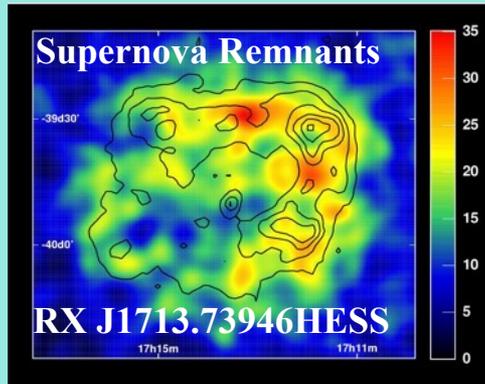


ANTARES traccia "verso l'alto": un "candidato" neutrino

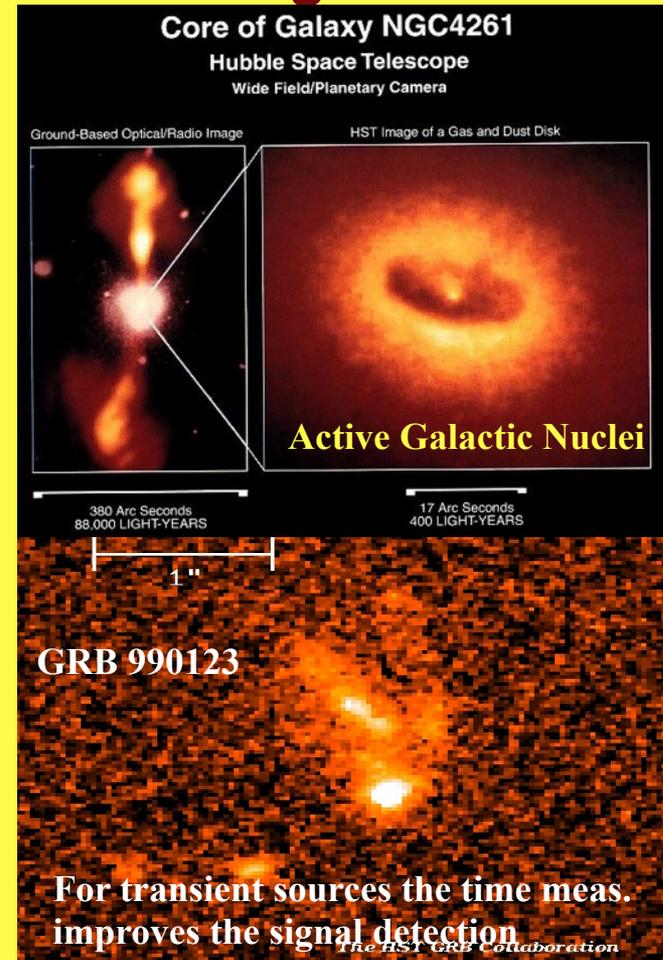


Obiettivi della ricerca: individuare sorgenti "puntiformi di neutrini"

Galactic



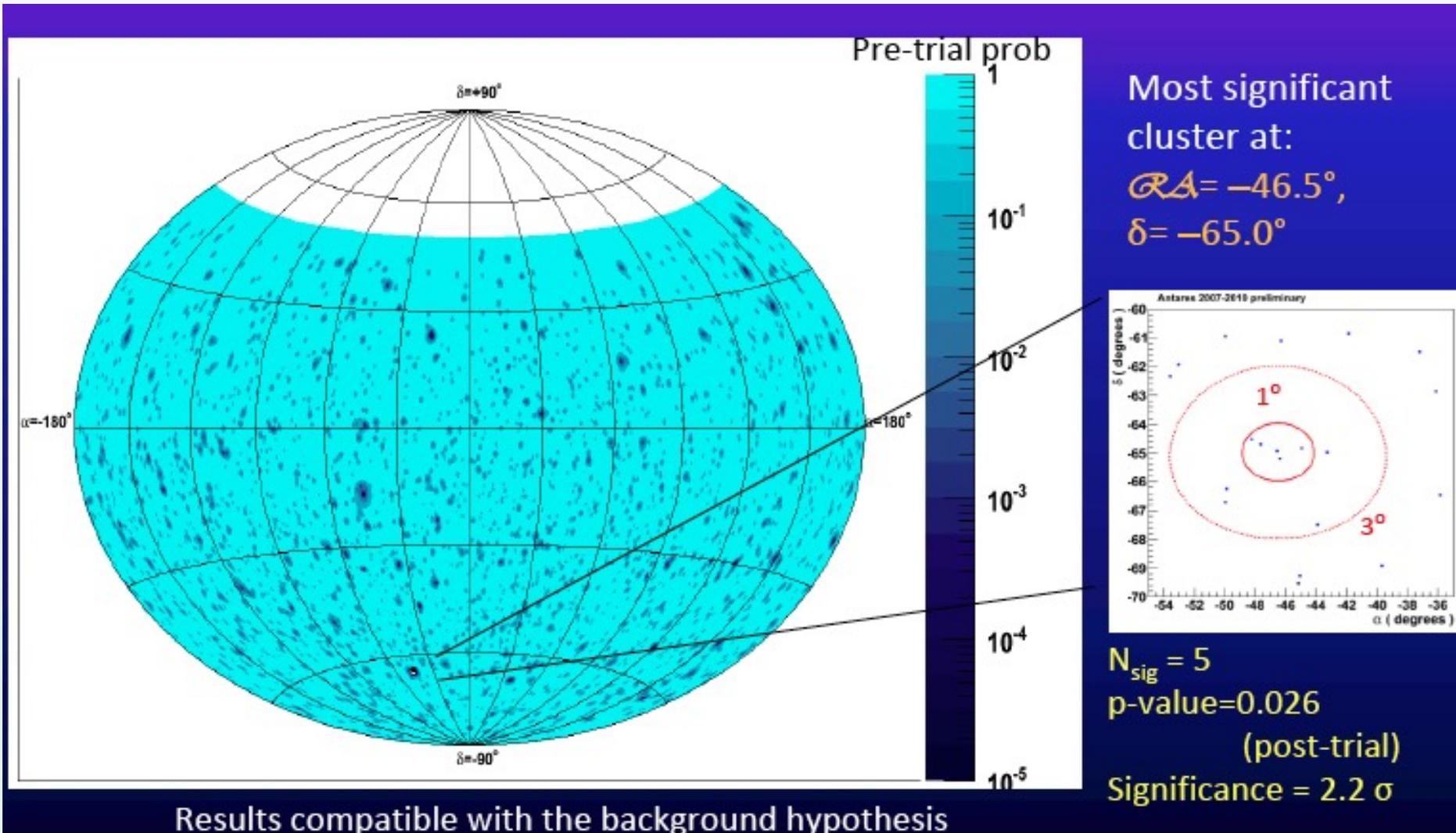
Extragalactic



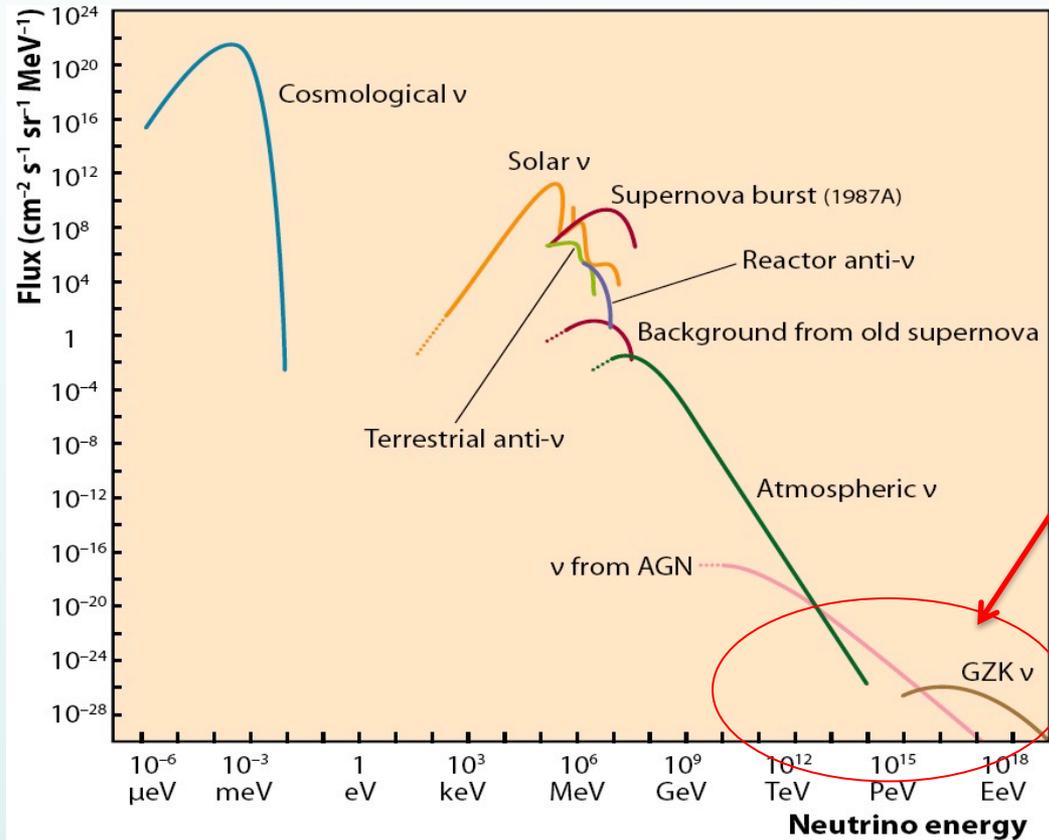
Il segnale cercato: un eccesso di tracce, in un cono centrato attorno ad una posizione nel cielo, rispetto al fondo uniforme dei neutrini atmosferici. Diminuendo l'apertura del "cono di ricerca" si riduce il numero di neutrini atmosferici e si rende più efficiente la ricerca del segnale. Importantissima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

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

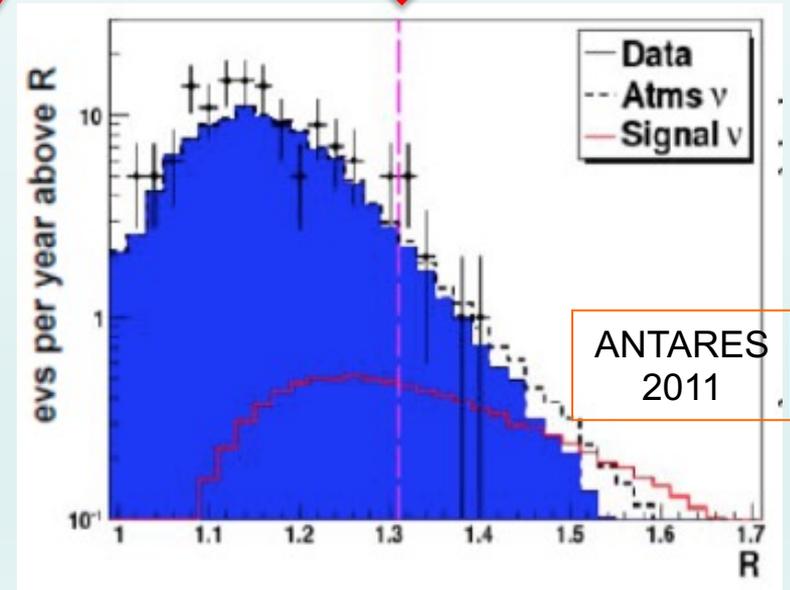
Un esempio: la ricerca di sorgenti puntiformi dell'esperimento ANTARES



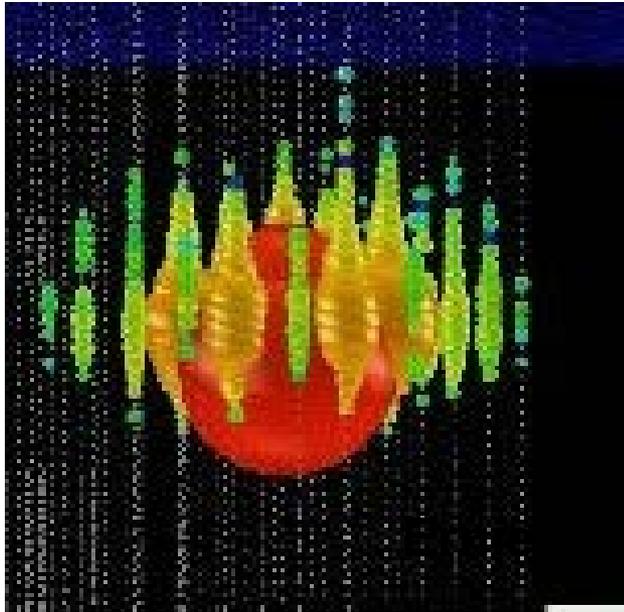
Un altro obiettivo: identificare un flusso di neutrini oltre quello di origine atmosferica



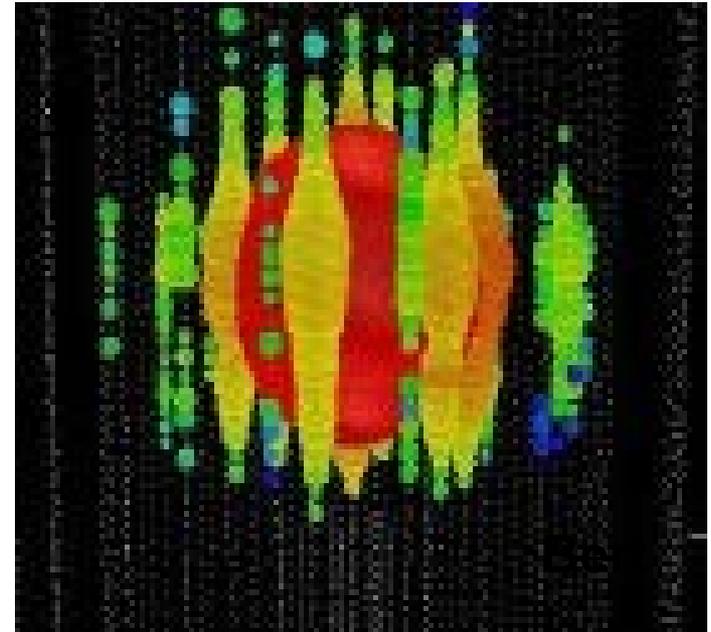
Cercare in questo intervallo di energia !!!



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



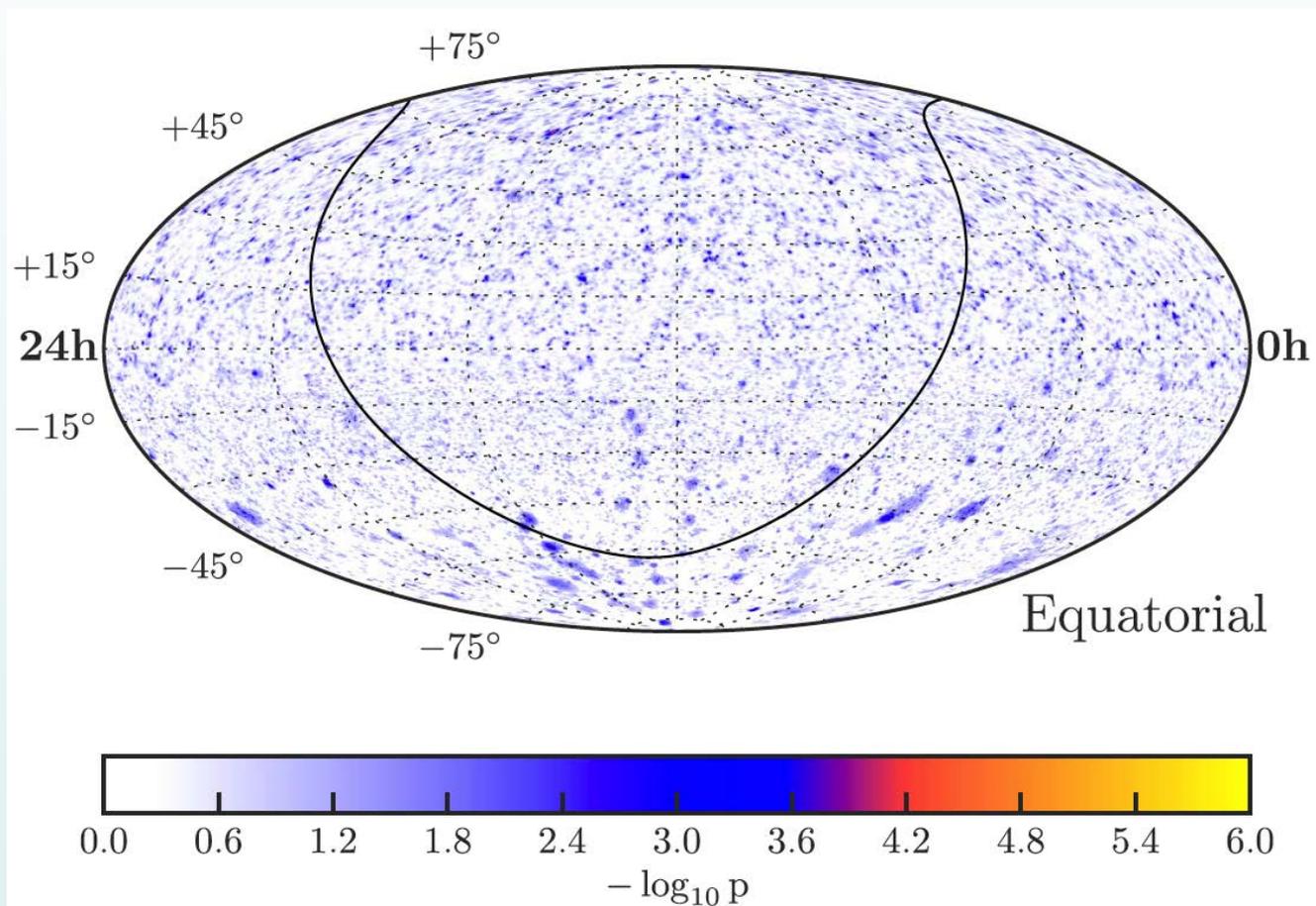
312 DOMs



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"

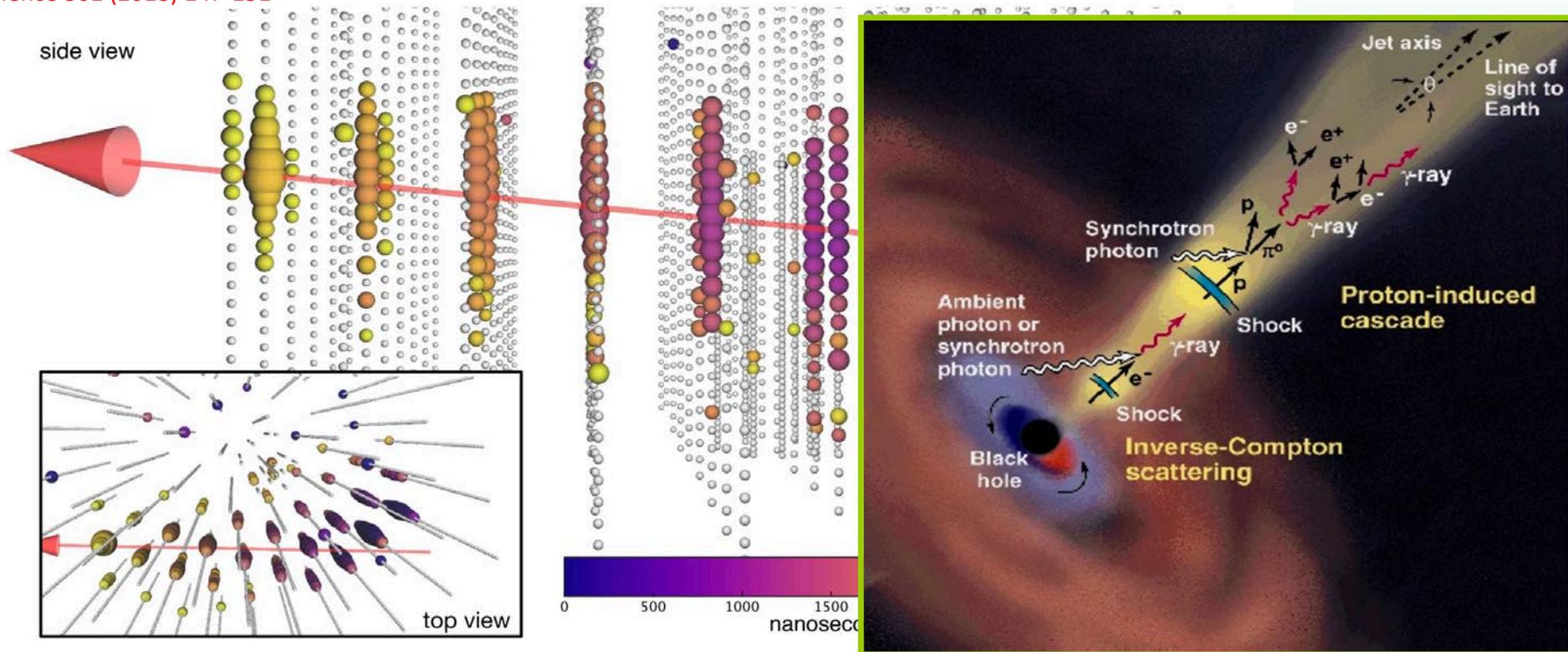


Moltissimi i neutrini rivelati, alcuni sembrano "addensarsi" in particolari posizioni nel cielo ma ancora la probabilità che non siano "da sorgente puntiforme" è alta.
→ Si ricorre alla rivelazione a multi-messaggeri: si cercano direzioni nel cielo da cui provengono neutrini, raggi gamma, protoni etc...

IceCube e FERMI: la scoperta di una possibile sorgente di ν e γ

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

22 settembre 2017: IceCube annuncia l'evento osservato

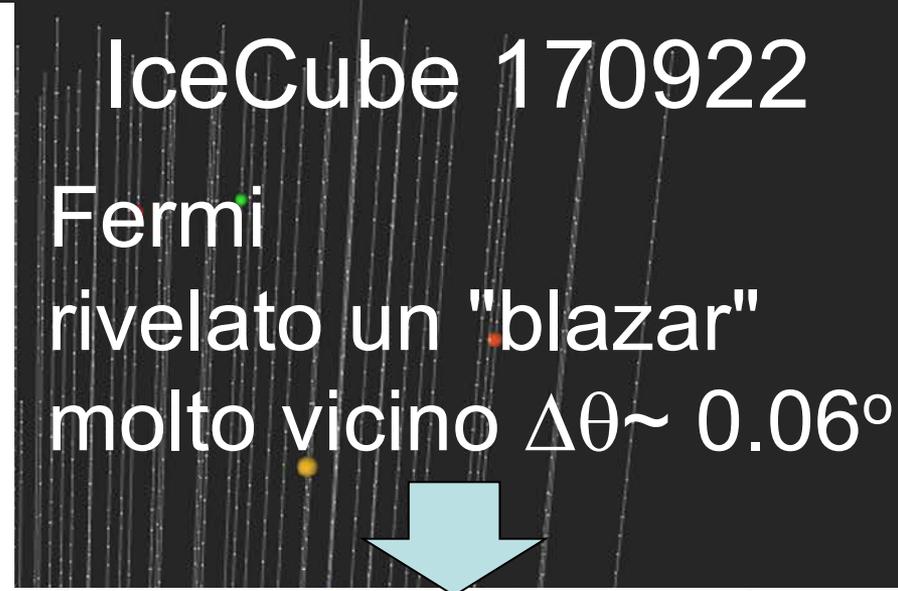
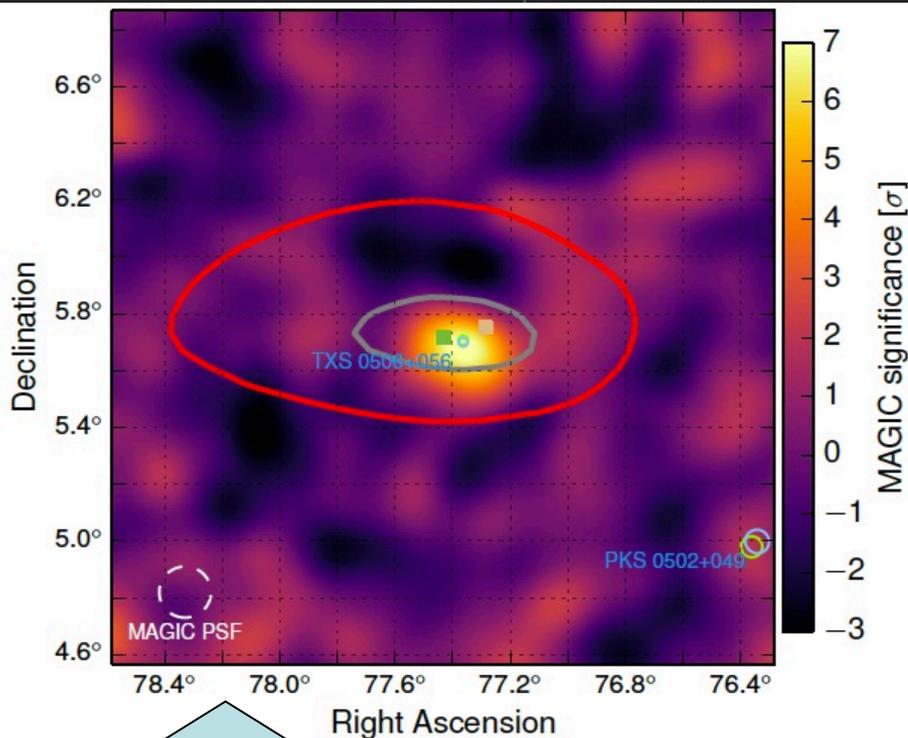
IceCube Trigger

43 seconds after trigger, GCN notice was sent

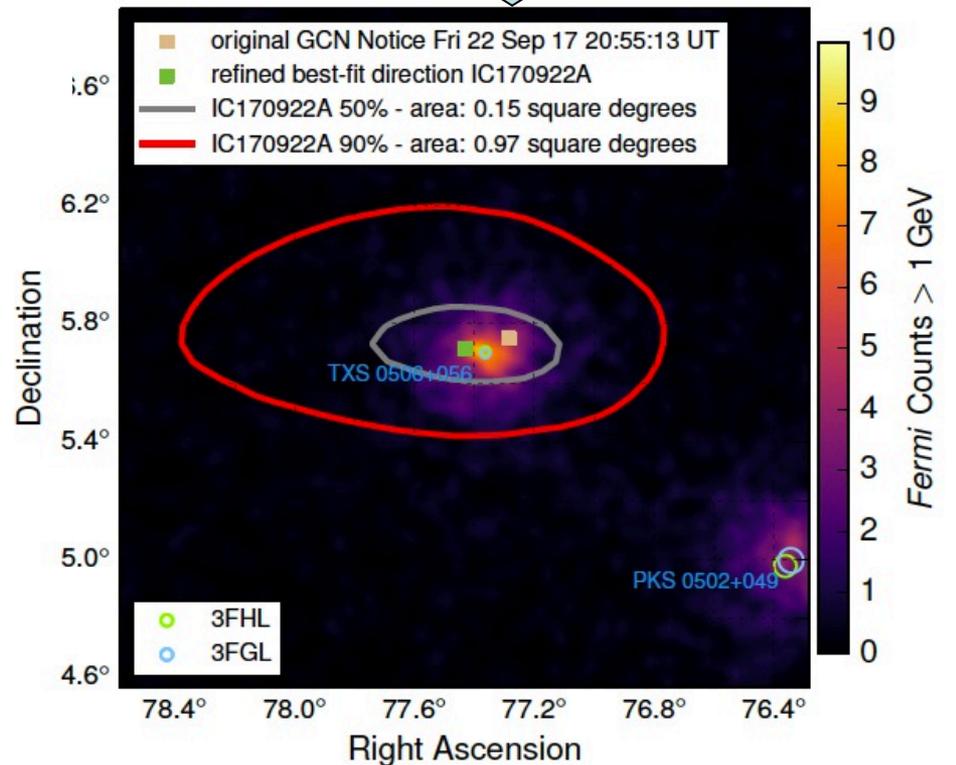
```
////////////////////////////////////  
TITLE:                GCN/AMON NOTICE  
NOTICE_DATE:          Fri 22 Sep 17 20:55:13 UT  
NOTICE_TYPE:          AMON ICECUBE EHE  
RUN_NUM:              130033  
EVENT_NUM:            50579430  
SRC_RA:               77.2853d {+05h 09m 08s} (J2000),  
                     77.5221d {+05h 10m 05s} (current),  
                     76.6176d {+05h 06m 28s} (1950)  
SRC_DEC:              +5.7517d {+05d 45' 06"} (J2000),  
                     +5.7732d {+05d 46' 24"} (current),  
                     +5.6888d {+05d 41' 20"} (1950)  
SRC_ERROR:            14.99 [arcmin radius, stat+sys, 50% containment]  
DISCOVERY_DATE:       18018 TJD;   265 DOY;   17/09/22 (yy/mm/dd)  
DISCOVERY_TIME:       75270 SOD {20:54:30.43} UT  
REVISION:              0  
N_EVENTS:              1 [number of neutrinos]  
STREAM:                2  
DELTA_T:               0.0000 [sec]  
SIGMA_T:               0.0000e+00 [dn]  
ENERGY :               1.1998e+02 [TeV]  
SIGNALNESS:           5.6507e-01 [dn]  
CHARGE:                5784.9552 [pe]
```

IceCube 170922

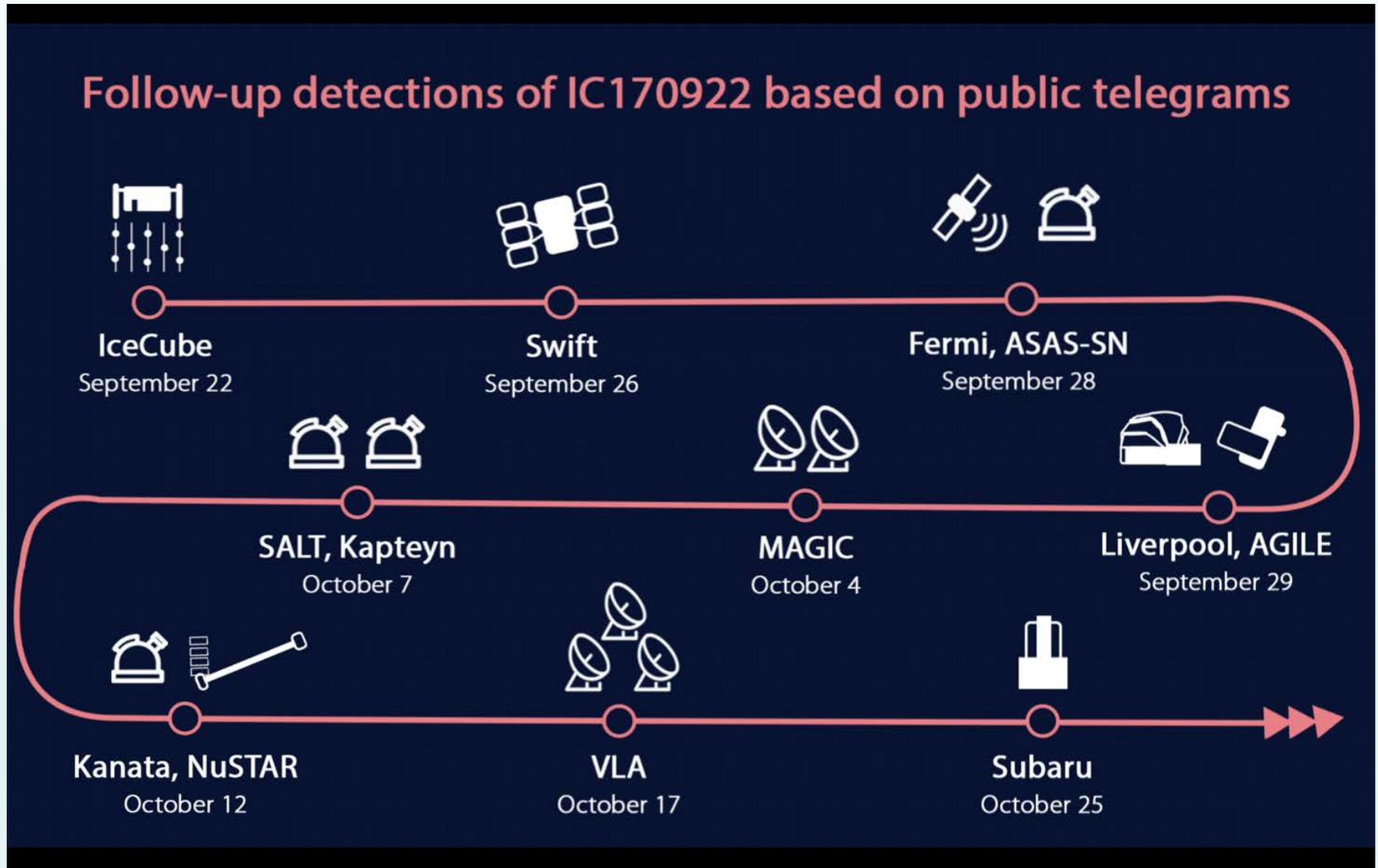
Fermi
rivelato un "blazar"
molto vicino $\Delta\theta \sim 0.06^\circ$



MAGIC
rivelati fotoni, in
coincidenza temporale,
con $E > 100$ GeV



Immediata reazione dei vari telescopi/esperimenti in funzione: ricerca a "*molti messaggeri*"



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

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!



GCN
(GRB Coordinat. Network)
(ANTARES ↔ GCN)
1.S. Adrián-Martínez et al.,
JCAP 1303 (2013) 006

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

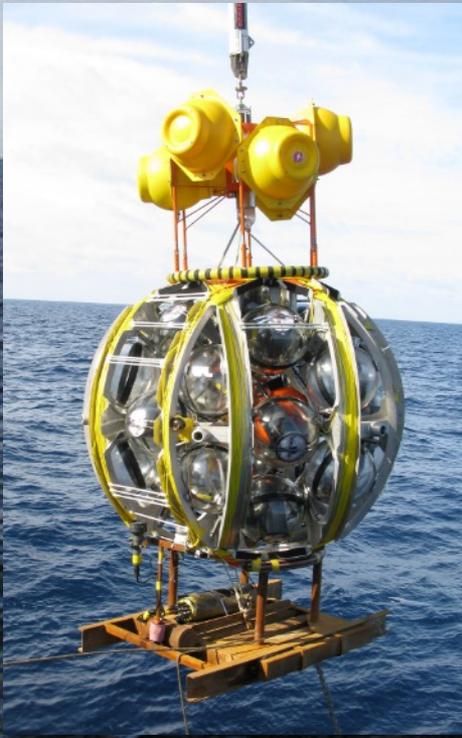
(ANTARES ↔ Optical Telescopes TAROT & ROSTE + more)
Ageron et al., *Astrop.Phys* 35 (2012) 530-536

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

> 40 Istituti

> 200 Scienziati

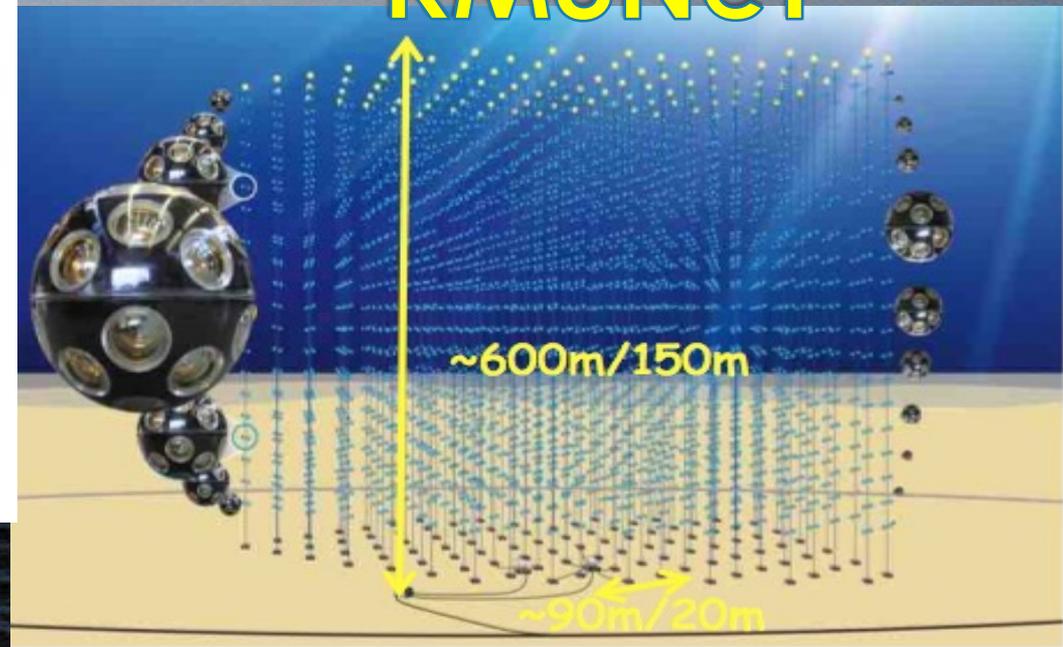
Comune obiettivo: costruire il più sensibile Telescopio per Neutrini Astrofisici di Alta Energia nell'emisfero NORD



Cities and Sites of KM3NeT



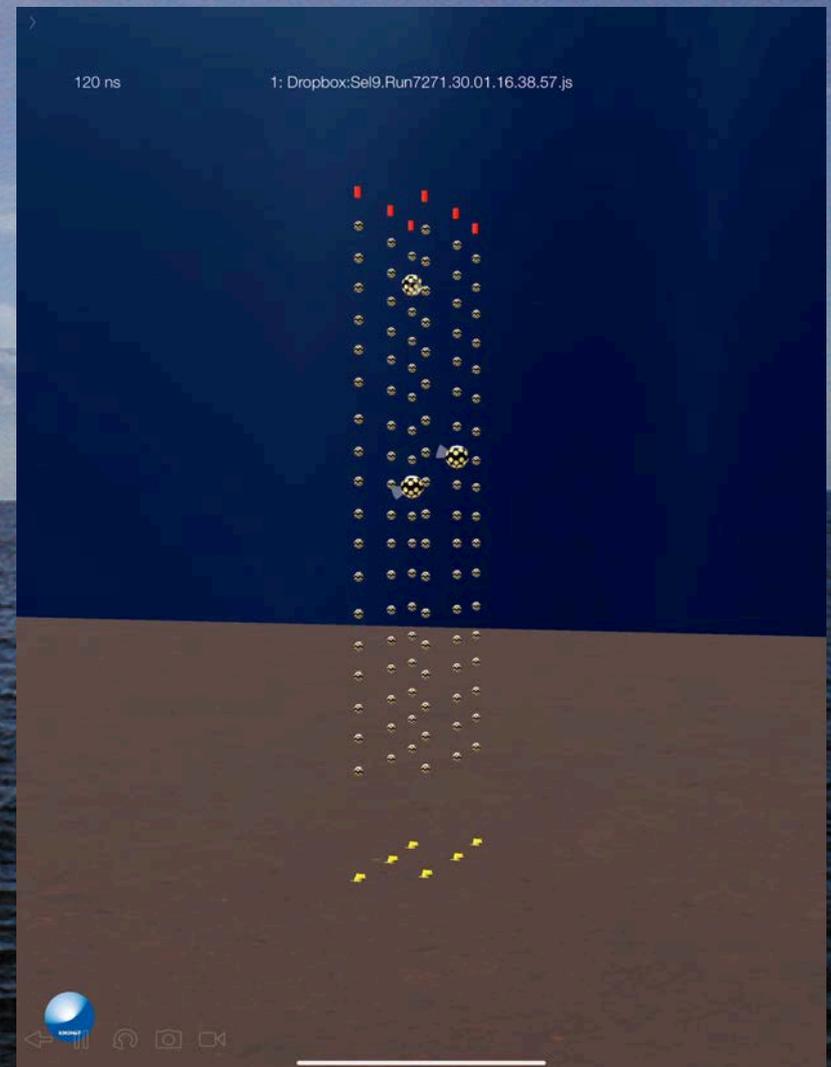
KM3NeT



12 KM3NeT detection units now operational

Un muone proveniente dall'alto (atmosferico)

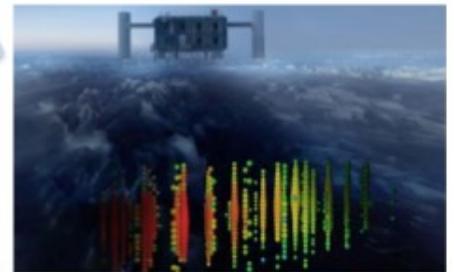
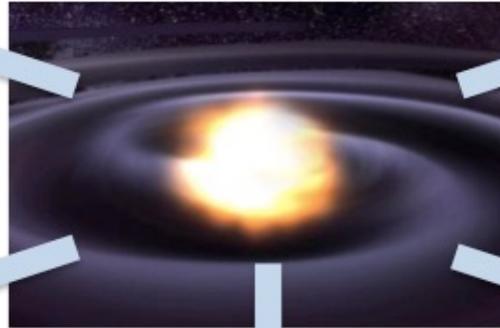
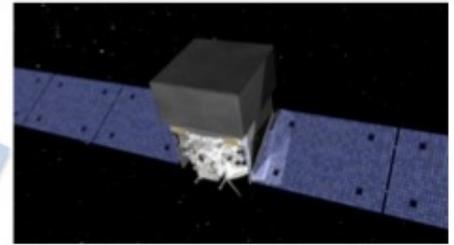
Un muone dal basso (da interazione di neutrino)



Il futuro ???

L'astronomia Multi-Messenger !!!

Multi-Messenger Astronomy: Gravitational Wave + Electromagnetic + Neutrinos



Grazie per l'attenzione !!

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 ??