



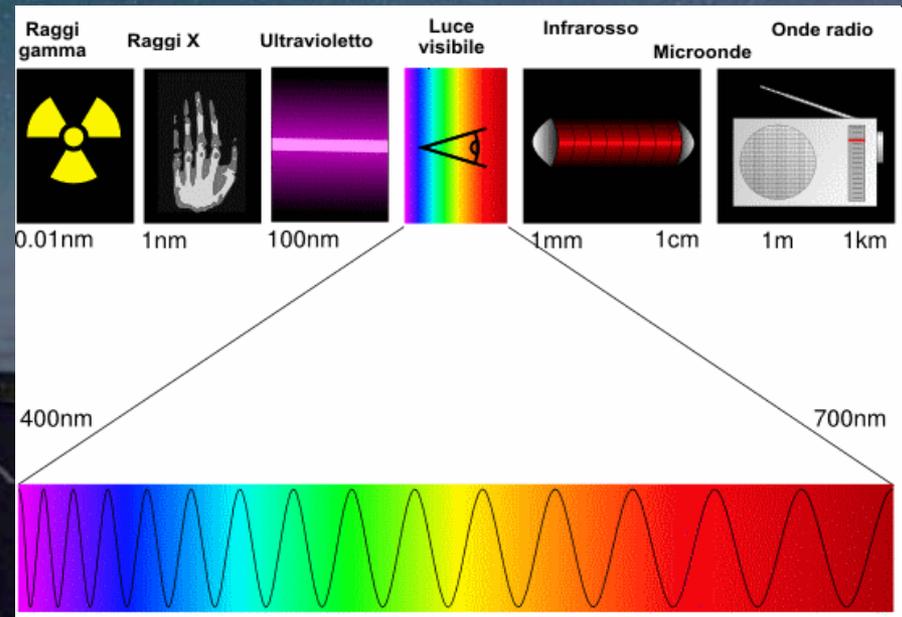
# KM3NeT: la nuova generazione di rivelatori sottomarini di neutrini

Vladimir Kulikovskiy



# Astronomia: la luce visibile

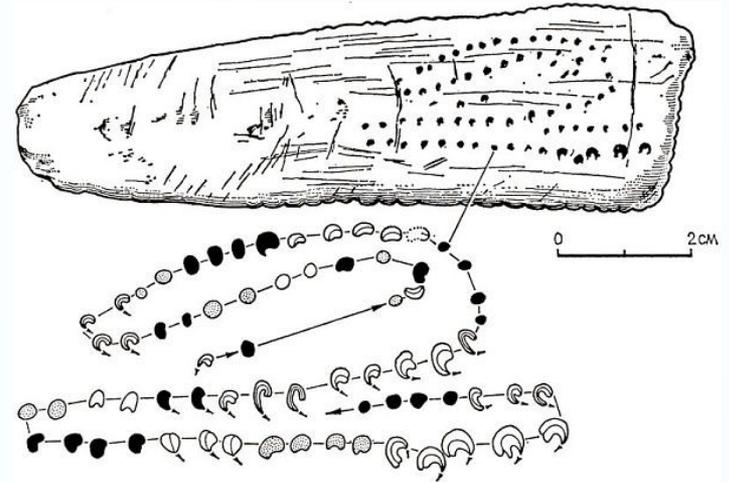
- **Scienza dell'osservazione del cielo**
- **Inizialmente gli scienziati hanno studiato l'universo osservando la luce proveniente dalle stelle con i telescopi**
- **I primi telescopi utilizzati sono stati telescopi ottici: viene osservata la luce visibile proveniente dai corpi celesti**



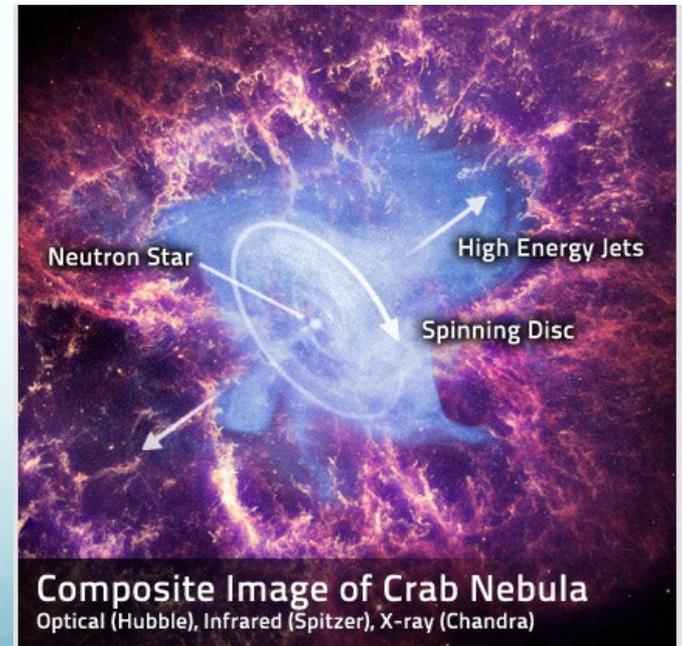
**La luce visibile è solo una minima parte dello spettro di luce che un corpo celeste può emettere**

# I messaggeri spaziali

- Fotoni ottici – da 32.000 BC
- Karl Yansky osserva l'emissione radio dal centro di Galassia -1932.
- 1962 il primo sorgente raggi-X (Scorpio 1962)
- Infrarossi ~1960 (Harold Jonson ha creato fotometro near-infrared) le misure ~1000 stelle
- Il primo telescopio raggi gamma sulla orbita (Explorer 11) ha visto <100 fotoni gamma distribuiti uniformemente sul cielo).
  - 1888 Osservazione di gamma di progenitore di SN1987A.
- 14 Settembre 2015 le onde gravitazionali da collisione di due buchi neri.
- La prima evidenza di esistenza di neutrini cosmici – 2013 (~20 neutrini, uniformemente distribuiti in tempo e sul cielo).
  - Primi sorgenti???



Moon calendar c.32,000 B.C.



Composite Image of Crab Nebula  
Optical (Hubble), Infrared (Spitzer), X-ray (Chandra)

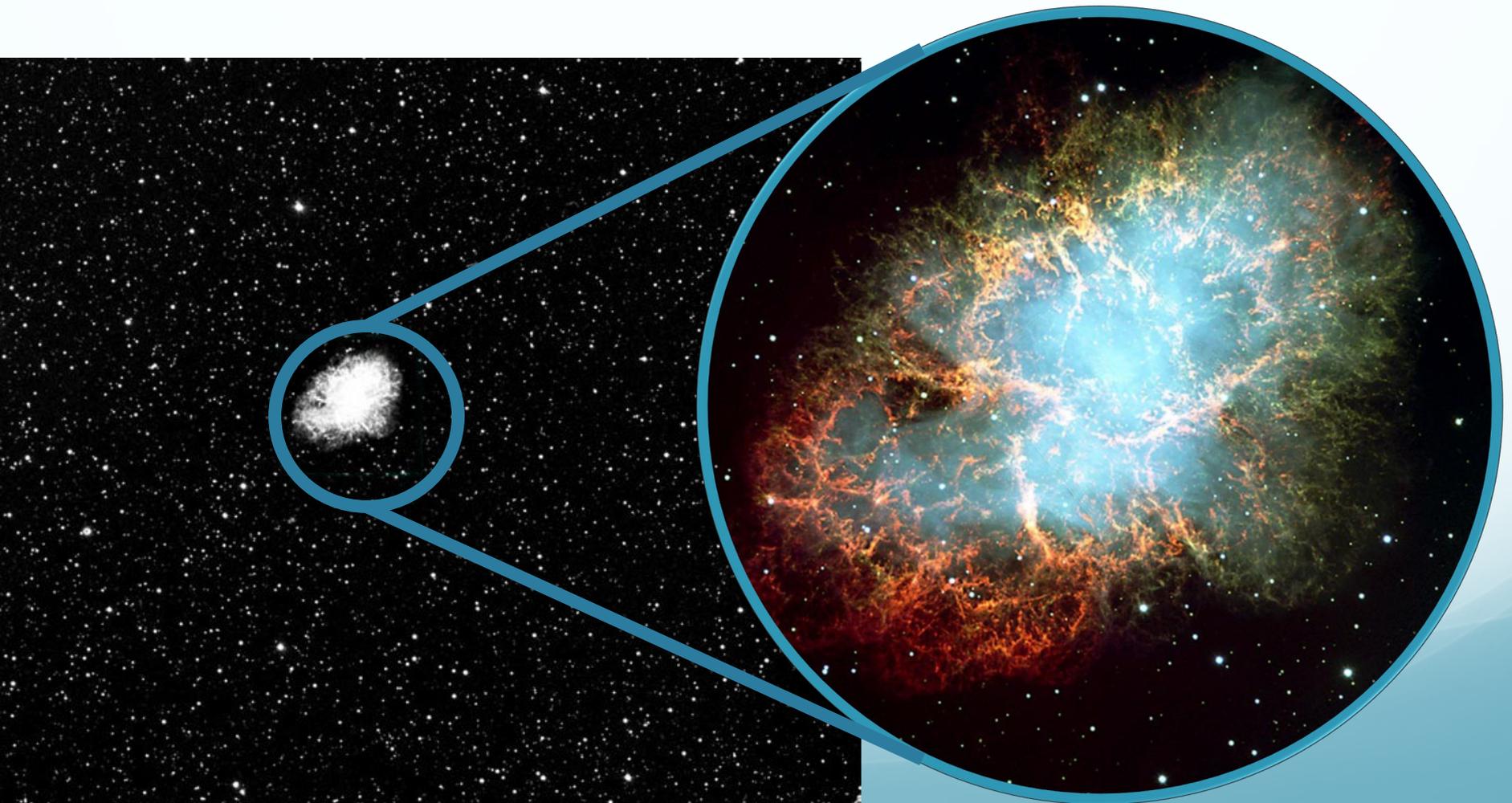
# Un esempio: la nebulosa del granchio

- Uno dei corpi celesti più studiati: si tratta dei resti dell'esplosione di una Supernova
- osservata da astronomi cinesi nel 1054



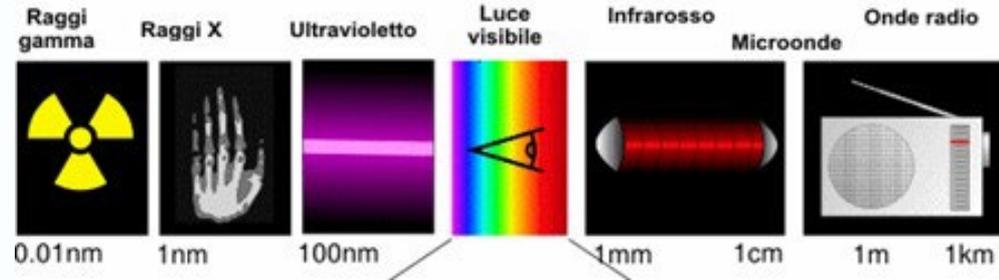
# Un esempio: la nebulosa del granchio

- Uno dei corpi celesti più studiati: si tratta dei resti dell'esplosione di una Supernova
- osservata da astronomi cinesi nel 1054



# stelle

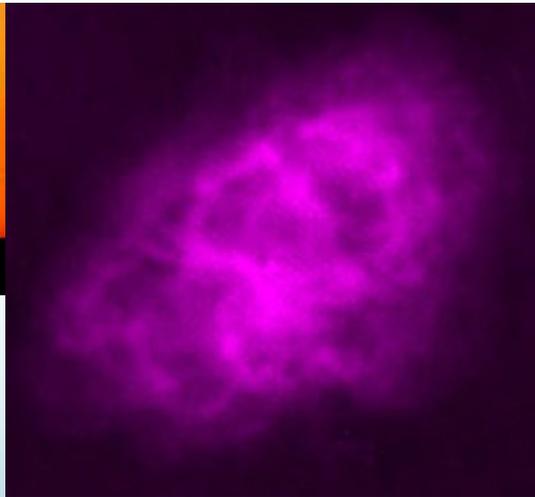
Luce visibile



Nel 1968 viene scoperta la presenza di un segnale periodico grazie a osservazione di onde radio

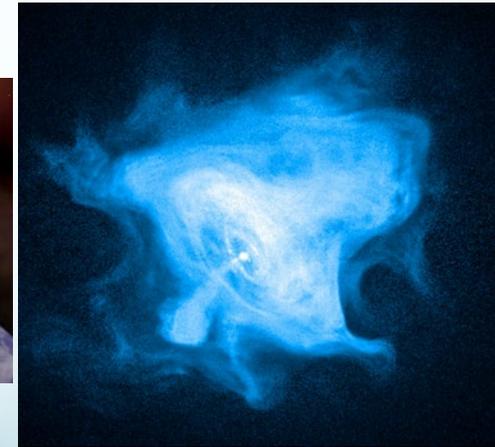


Onde radio



STRUTTURA ESTERNA

Chandra (raggi X)

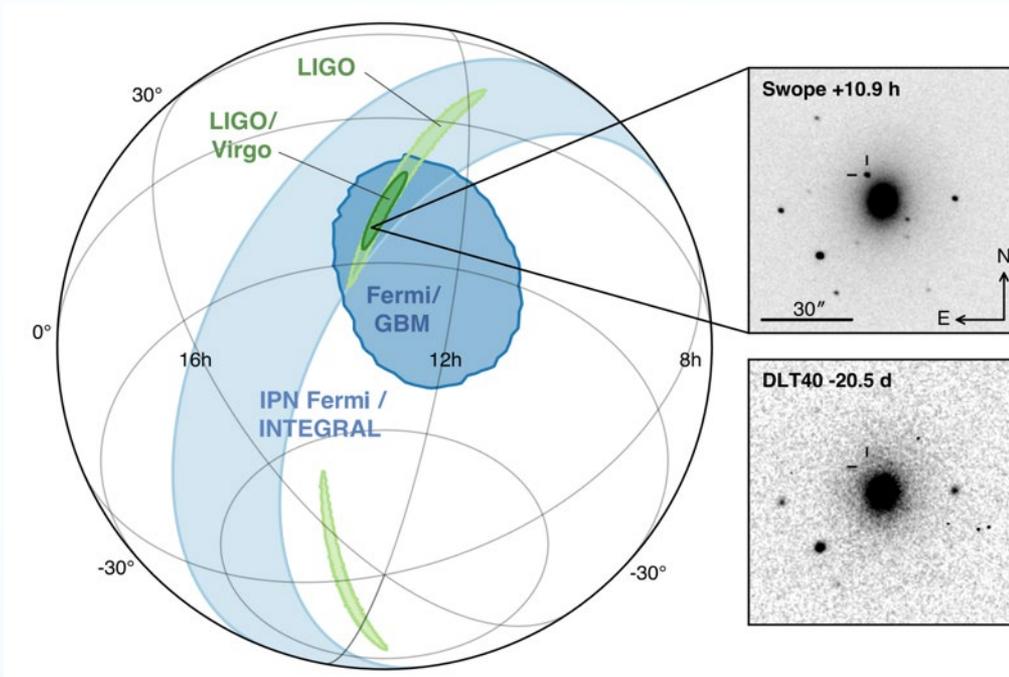


STRUTTURA INTERNA  
(pulsar)

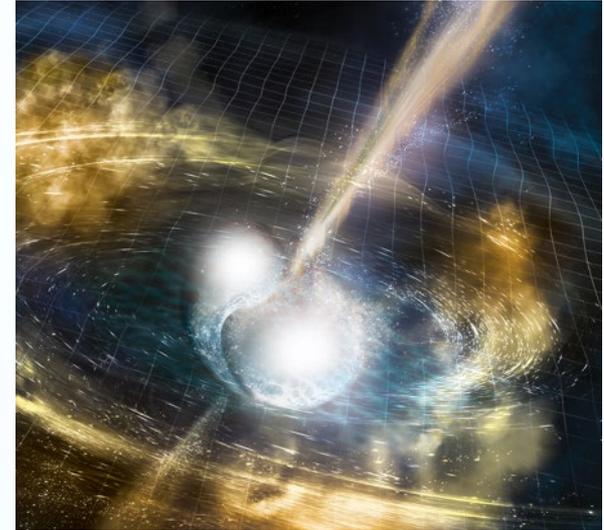


**Video prodotto da 7 immagine Chandra e Hubble  
Novembre 2000 – Aprile 2001. Loop di immagine.  
L'anello interno ha raggio circe 1 anno di luce in diametro.**

# I messaggeri spaziali

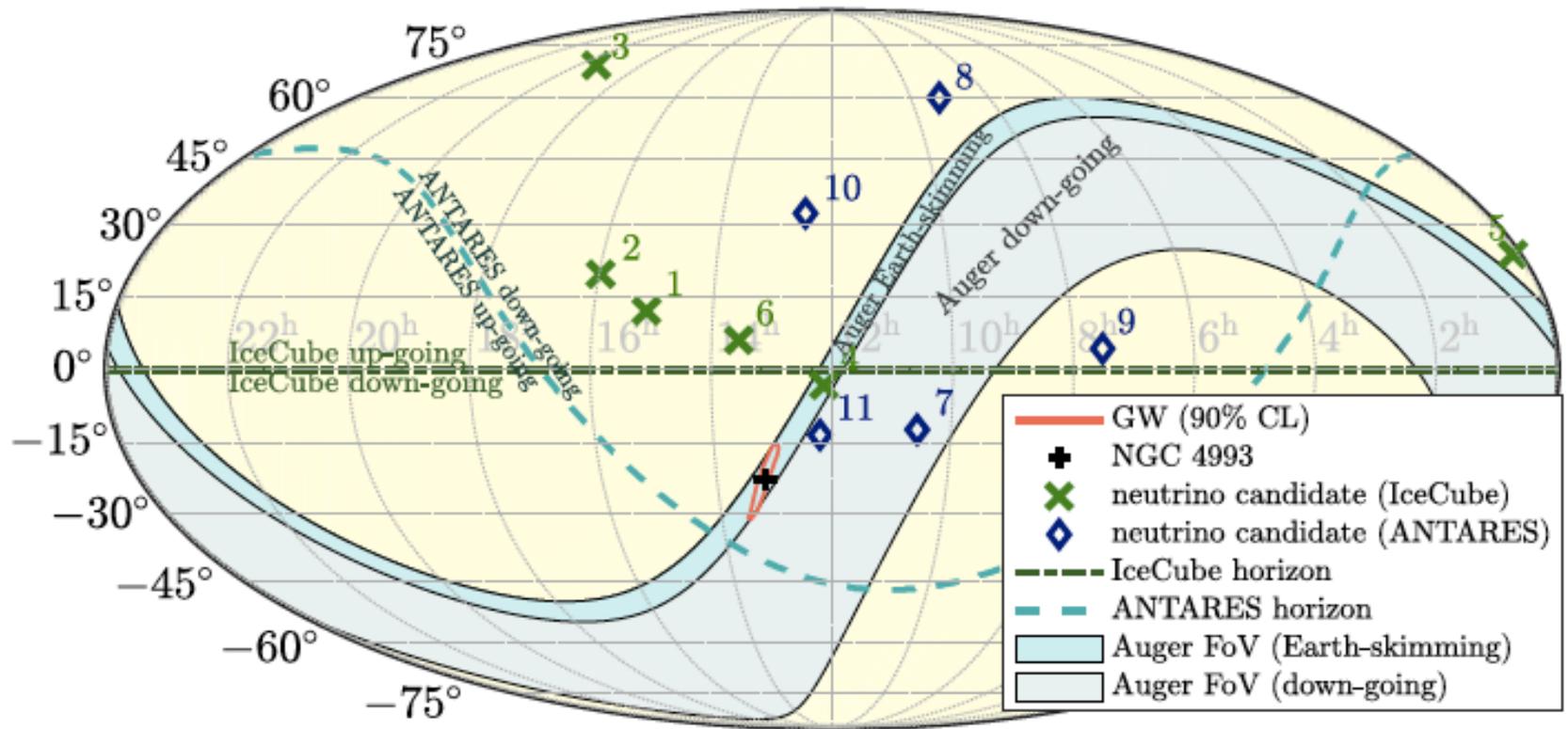


<http://ligo.org/science/Publication-GW170817MMA/>



- 17 Agosto 2017 – allerta dai esperimenti di onde gravitazionale.
- Osservazione ottica (telescopio Swope in Chile) di merger NS-NS localizza la sua origine (Galassia NGC 4993).
- Le prossime due settimane – le misure ottiche, ultraviolette, infrarossi, misurano gli spettri associati con il decadimento radioattivi di elementi pesanti. Gli spettri sono tipici per kilonovae.
  - Si evidenzia la connessione kilonovae e collisione delle stelle di neutroni.
  - Si evidenzia una produzione elevata di elementi pesanti che potrebbero spiegare i loro contenuti nell'Universo (e sulla Terra)!

# I messaggeri spaziali



- Durante 17 Agosto 2017 non erano osservati i neutrini. Eravamo troppo fuori asse di jet?



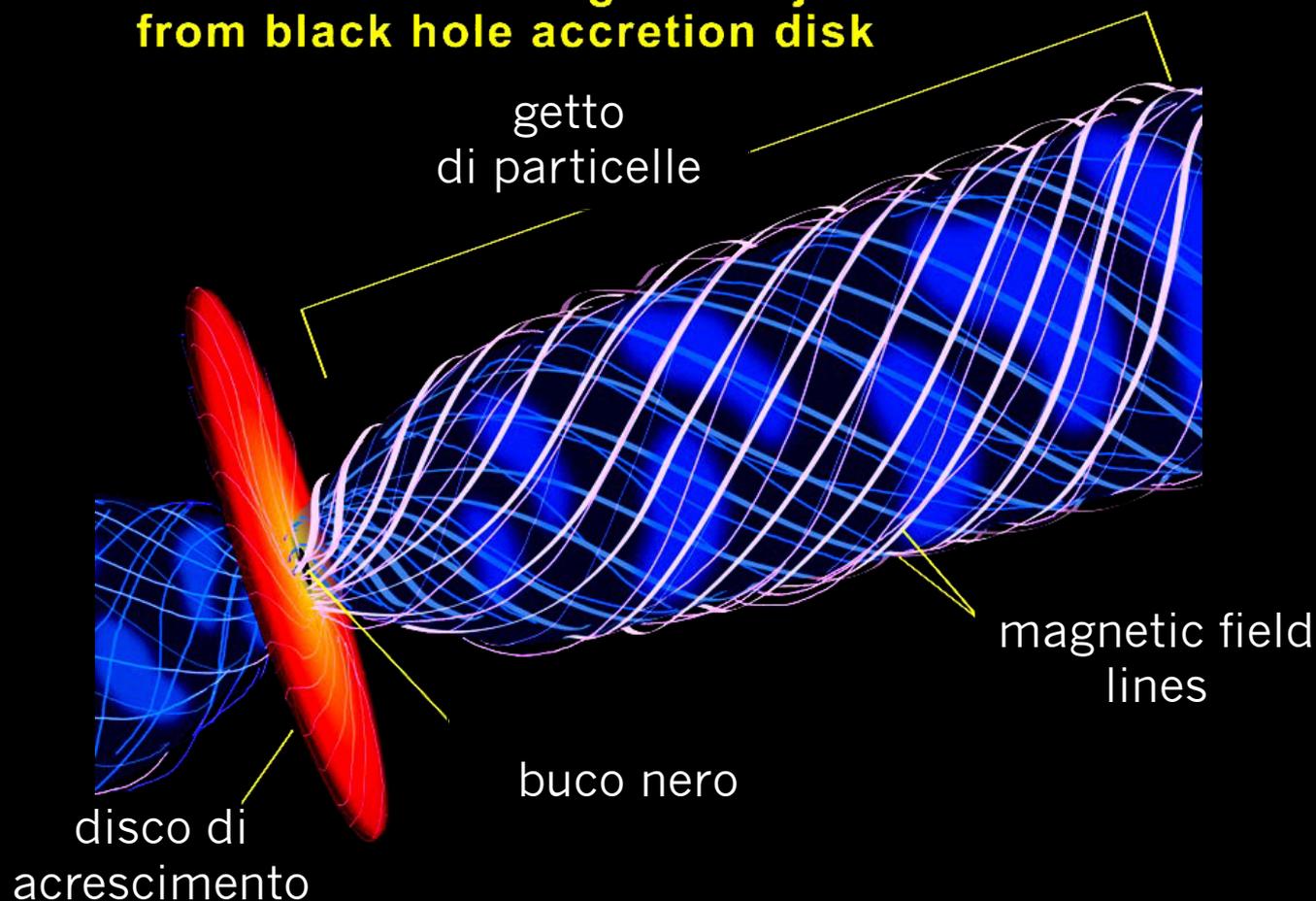
22 Settembre 2017 – la prima coincidenza tra EHE neutrino (IceCube) e un flusso di gamma da blazar TXS 0506+056 (Magic)



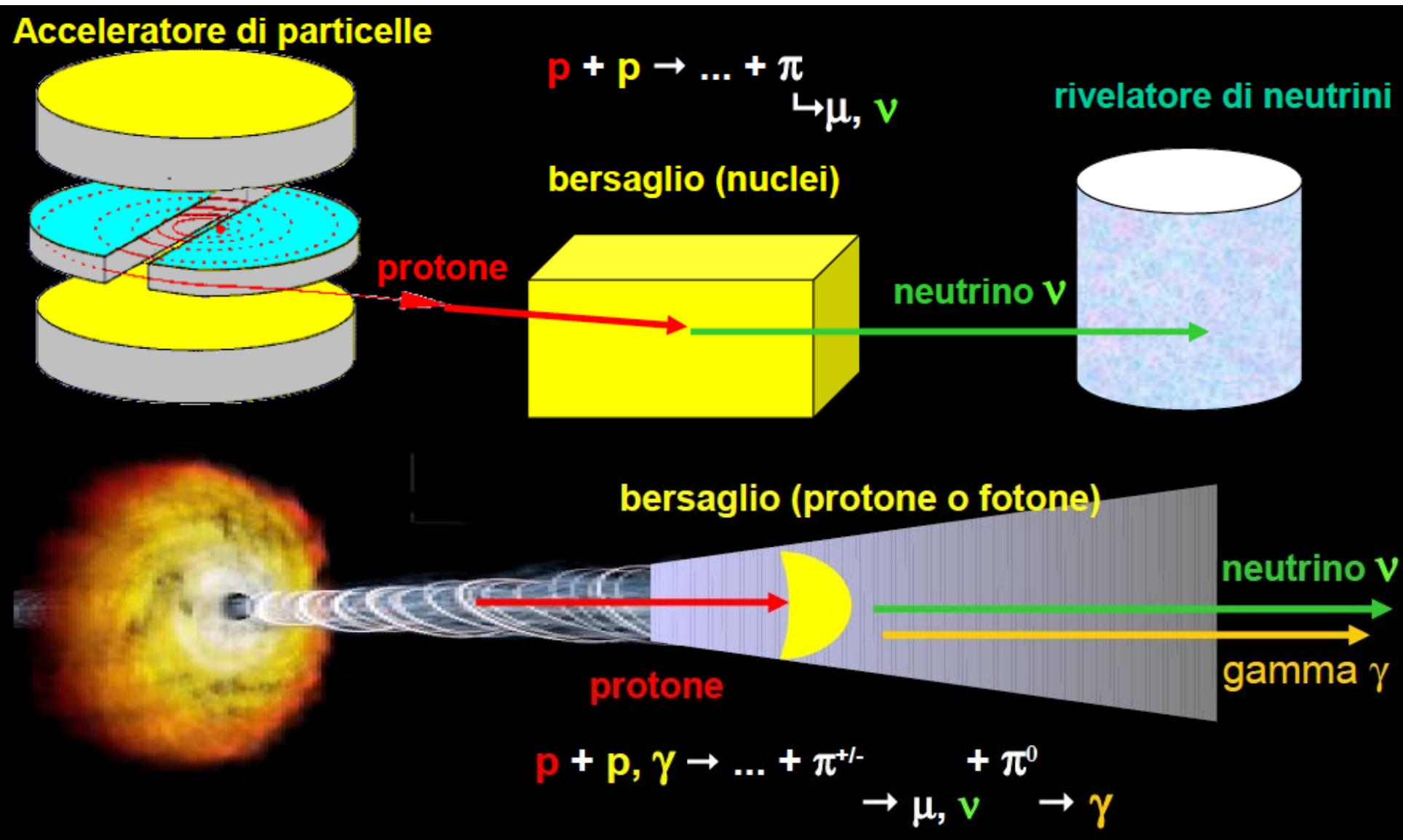
# Le particelle cosmiche di altissima energia

In prossimità dei buchi neri ed all'interno dei getti astrofisici avvengono fenomeni ancora sconosciuti che si crede siano molto simili a quelli prodotti dagli scienziati nei laboratori di fisica nucleare e subnucleare, ma ad energie sino ad **1 miliardo di volte più elevate**.

## Formation of extragalactic jets from black hole accretion disk



# L'astrofisica con neutrini di altissima energia



In particolare viene prodotta una particella ben nota ai fisici nucleari: il neutrino.

# Il neutrino: una “buona” sonda astronomica



neutrini

gamma

protoni

Aceleratori cosmici

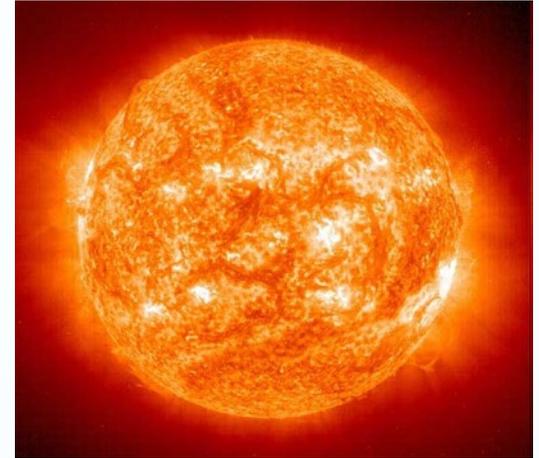
**Raggi gamma:** possono essere assorbiti dalla polvere cosmica e dalla radiazione.  
**Protoni:** arrivano sulla Terra ma sono deviati dal campo magnetico galattico e intergalattico.  
**Neutrini:** sono elettricamente neutri → non vengono deviati dai campi elettromagnetici interagiscono molto poco con la materia → attraversano distanze intergalattiche.

Su 10 miliardi di neutrini provenienti dal Sole che attraversano la Terra, solo 1 interagisce !!! È necessario un grosso volume di interazione per rivelare i neutrini.

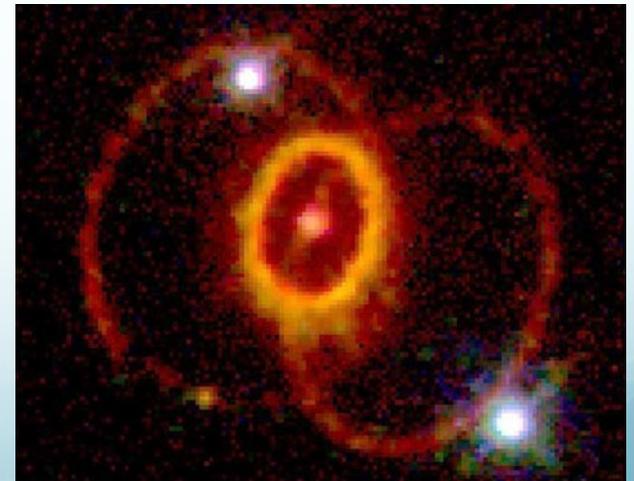
# Il neutrino: una “buona” sonda astronomica

L'osservazione dei neutrini di bassa energia emessi dalle stelle ha già prodotto diversi risultati scientifici di grande interesse.

Il Sole è una intensa sorgente di neutrini (di bassa energia) che sono generati durante le reazioni di fusione nucleare che tengono accesa la nostra Stella.

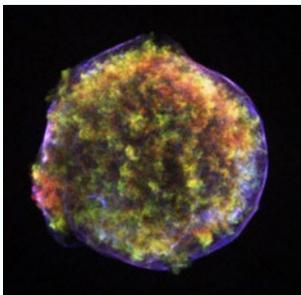


Anche l'esplosione di una Supernova genera un enorme flusso di neutrini che può essere osservato dalla Terra. Come avvenuto nel 1987 quando furono “catturati” circa 20 neutrini provenienti dall'esplosione della SN1987A, nella “vicina” Grande Nube di Magellano, a circa 200 mila anni luce dalla Terra.

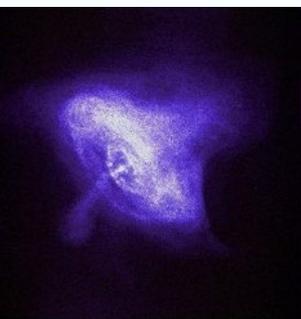


# Le sorgenti di neutrini ad alta energia

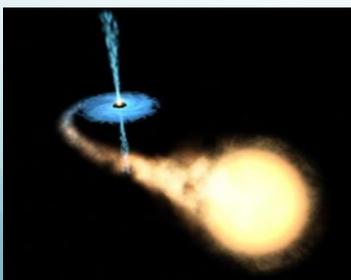
GALATTICHE



Resti di SN



Pulsars

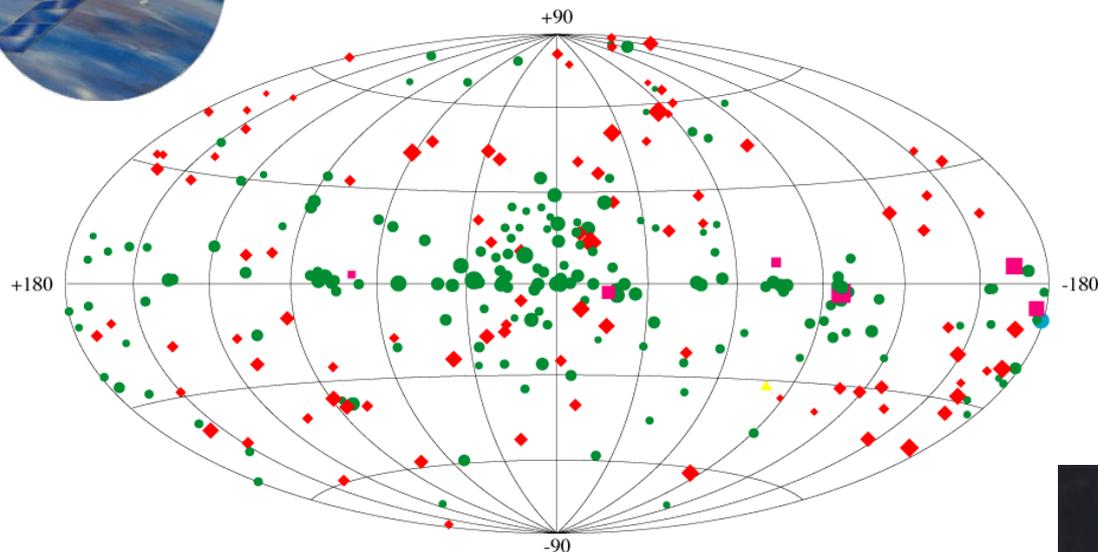


Microquasar



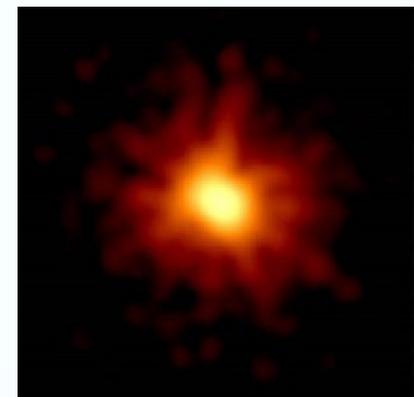
Third EGRET Catalog

$E > 100 \text{ MeV}$



- ◆ Active Galactic Nuclei
- Unidentified EGRET Sources
- ◆ Pulsars
- ▲ LMC
- Solar FLare

EXTRA-GALATTICHE

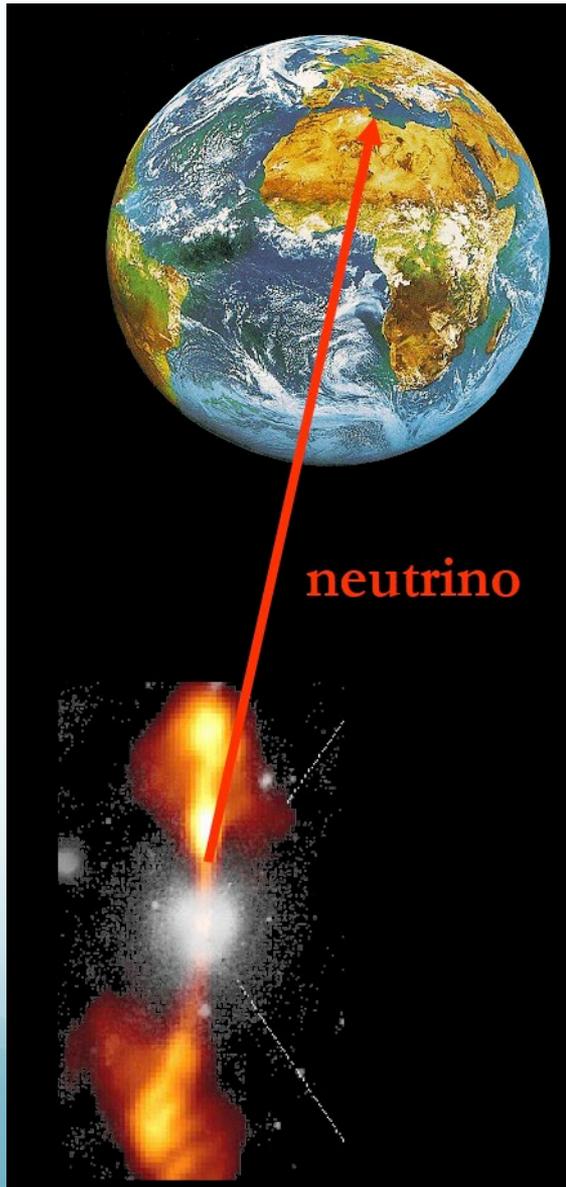


GRB



Nuclei galattici attivi

# I telescopi per neutrini



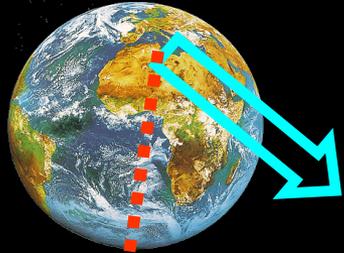
- Anche per osservare i neutrini cosmici di altissima energia è necessario preparare appositi rivelatori.
- E poiché le loro sorgenti sono molto distanti nell'Universo, il loro flusso è debole ed è necessario "preparare" un apparato grande come un cubo avente un chilometro di spigolo!

È possibile realizzare un rivelatore così grande?

Sì: nel mare, nei grandi laghi o nei ghiacci polari

# Come si "vedono" i neutrini di altissima energia ?

**Solamente i neutrini possono attraversare la Terra**



neutrino

Radiazione luminosa  
Cherenkov prodotta dal  
passaggio del muone

Rete di  
sensori  
ottici

Abissi  
Marini:  
Profondità  
>1000 metri

Connessione in fibra ottica  
da terra

43°

Muone  
 $\mu$

Fondale  
marino

interazione

neutrino

$\nu$

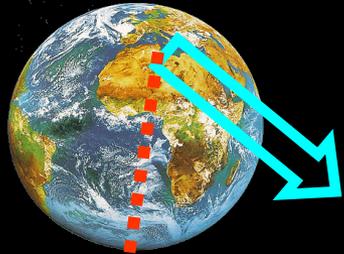
Il neutrino è una particella  
"invisibile" ma può interagire con  
un nucleo, nella roccia

Il neutrino è rivelato usando la traccia del muone  
(rivelazione indiretta).



# Come si "vedono" i neutrini di altissima energia ?

Solamente i neutrini possono attraversare la Terra

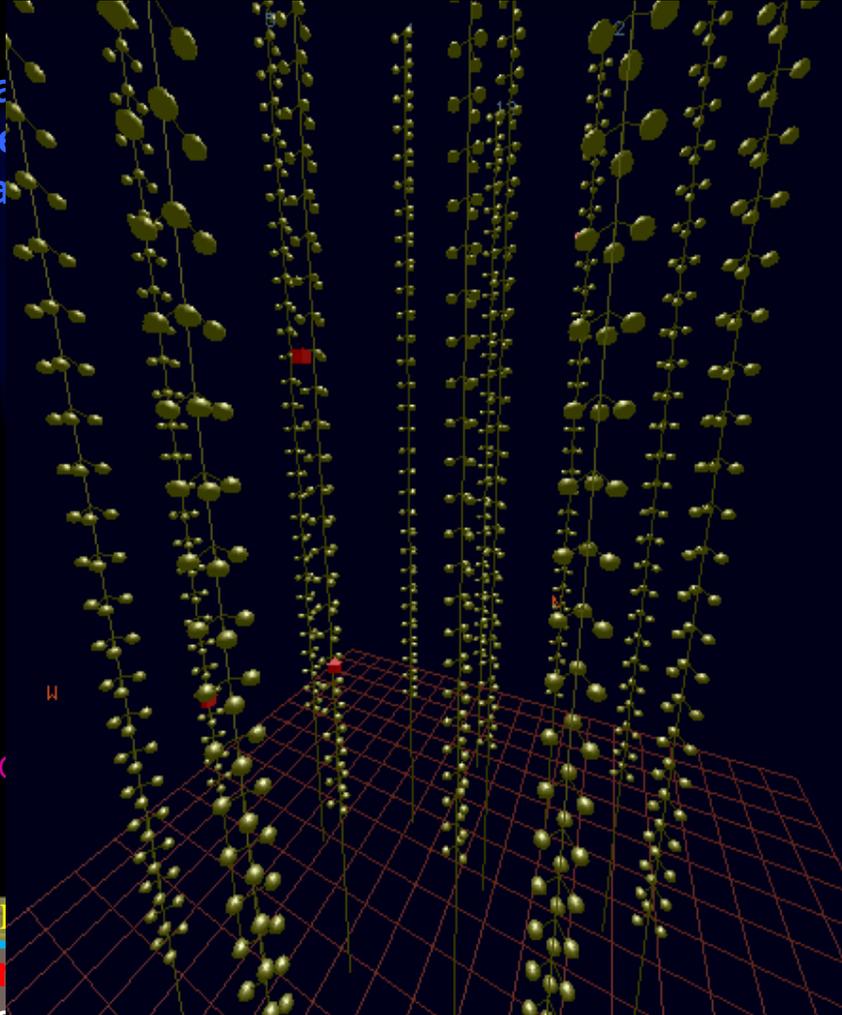


neutrino

Radia  
Cher  
passa

Abissi  
Marini:  
Profondità  
>1000 metri

Connessione in fibra  
da terra



Rete di  
sensori  
ottici

Fondale  
marino

Il neutrino è una particella  
"invisibile" ma può interagire con  
un nucleo, nella roccia

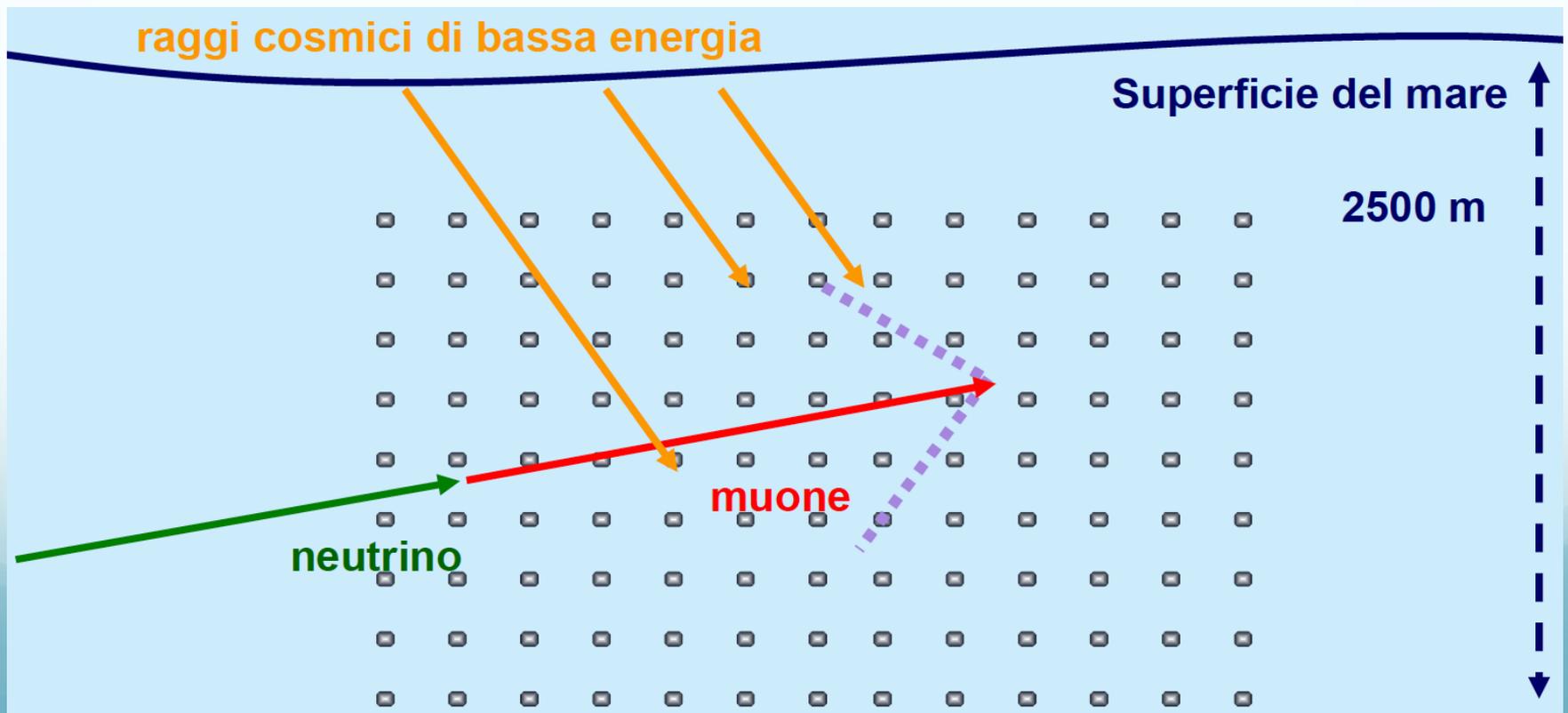
(rivelazione indiretta).

la traccia del muone

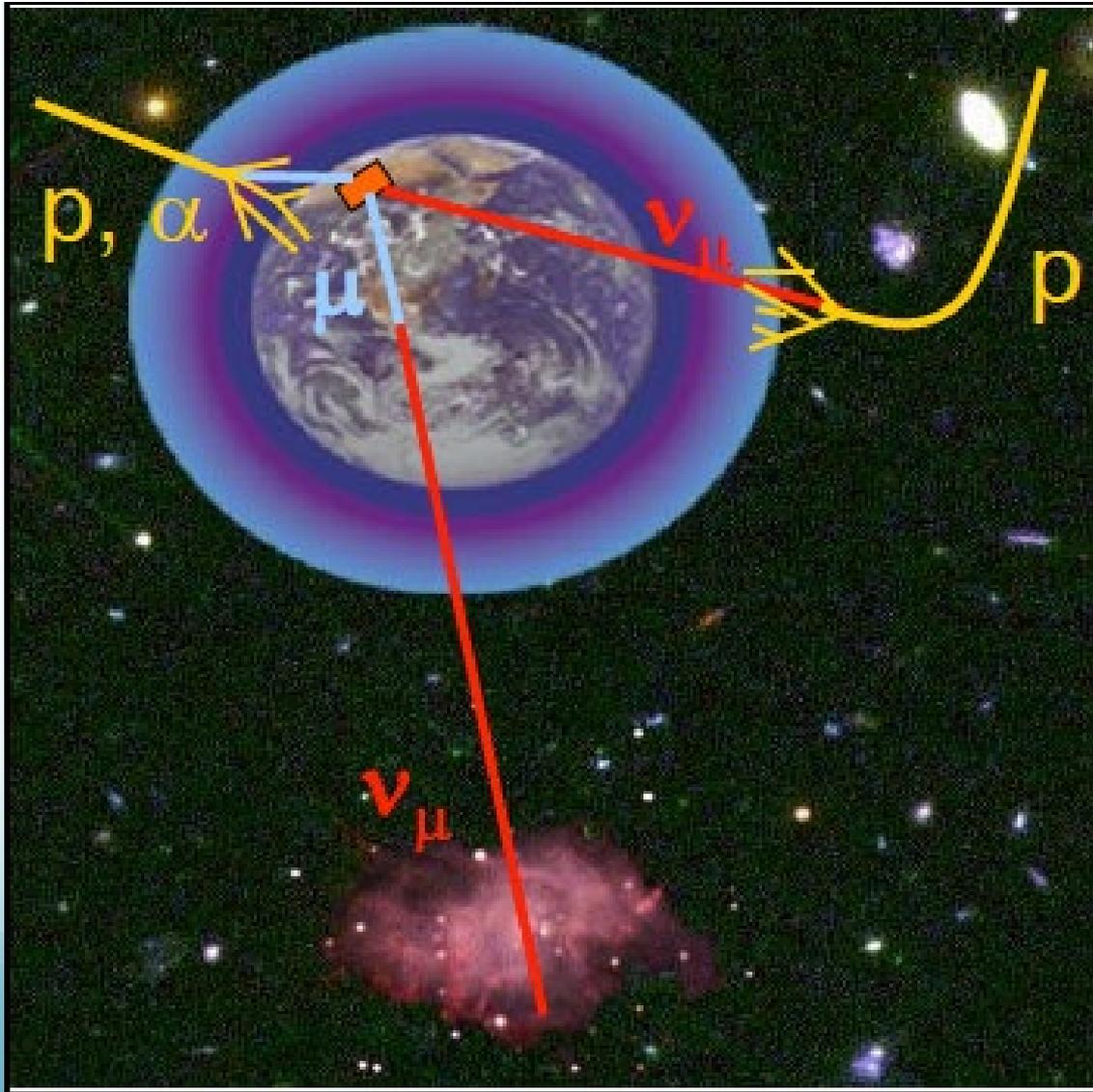


evento tipo traccia, nato dentro IceCube

- Nei telescopi per neutrini l'acqua/giaccio svolge una triplice funzione
  - bersaglio per il neutrino
  - mezzo propagatore della luce Cherenkov
  - schermo per la radiazione di bassa energia che arriva dalla superficie: 2500 m d'acqua equivalgono a 1000 m di roccia



# I migliori eventi per i telescopi



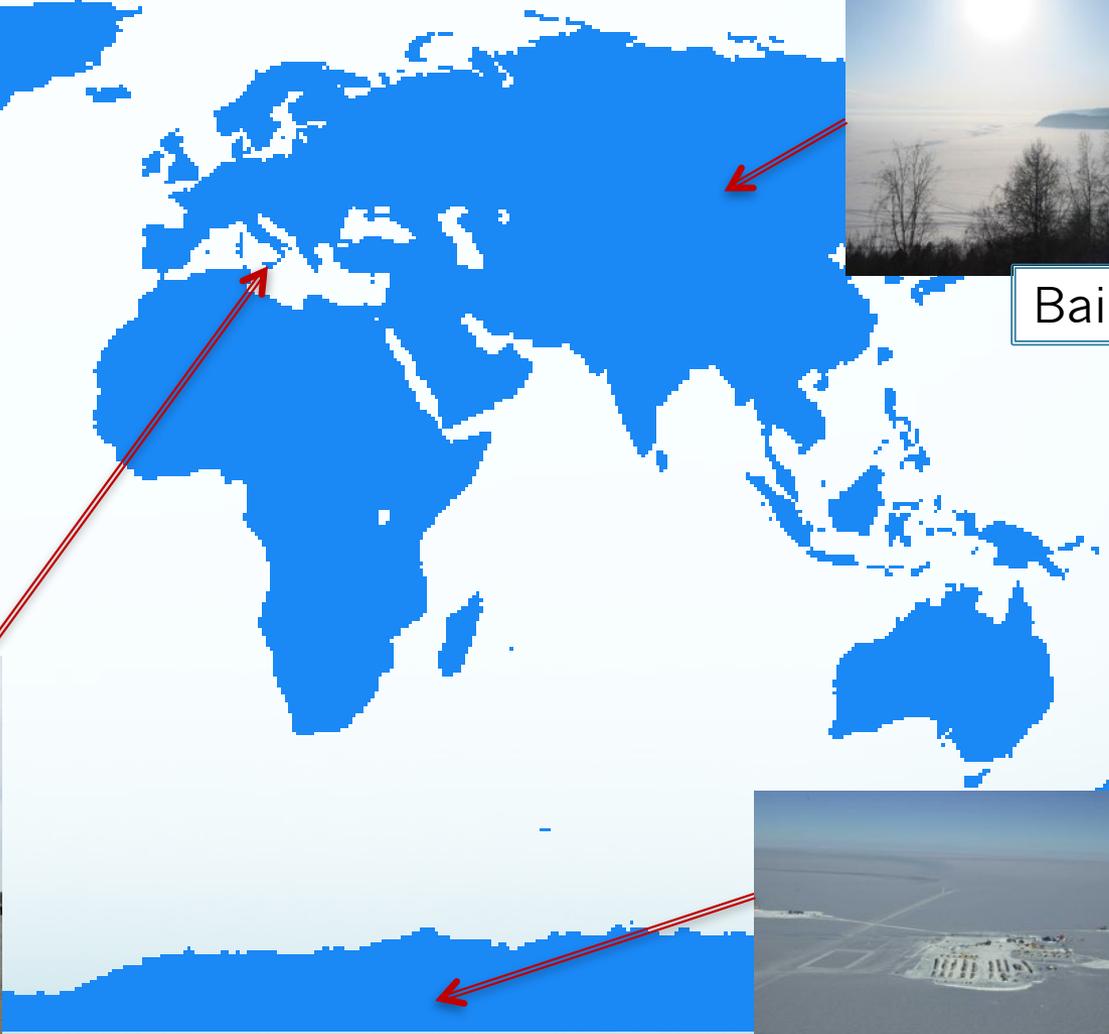
Particelle secondarie, nate in atmosfera alterano l'informazione su sorgente.

Come possiamo distinguere i neutrini cosmici da eventi di fondo?

Tracce e sciame nate dentro il rivelatore o le tracce che risalgono dalla Terra sono prodotti da neutrini.

# Dove? Europa e Stati Uniti

ANTARES - KM3NeT  
Mediterraneo

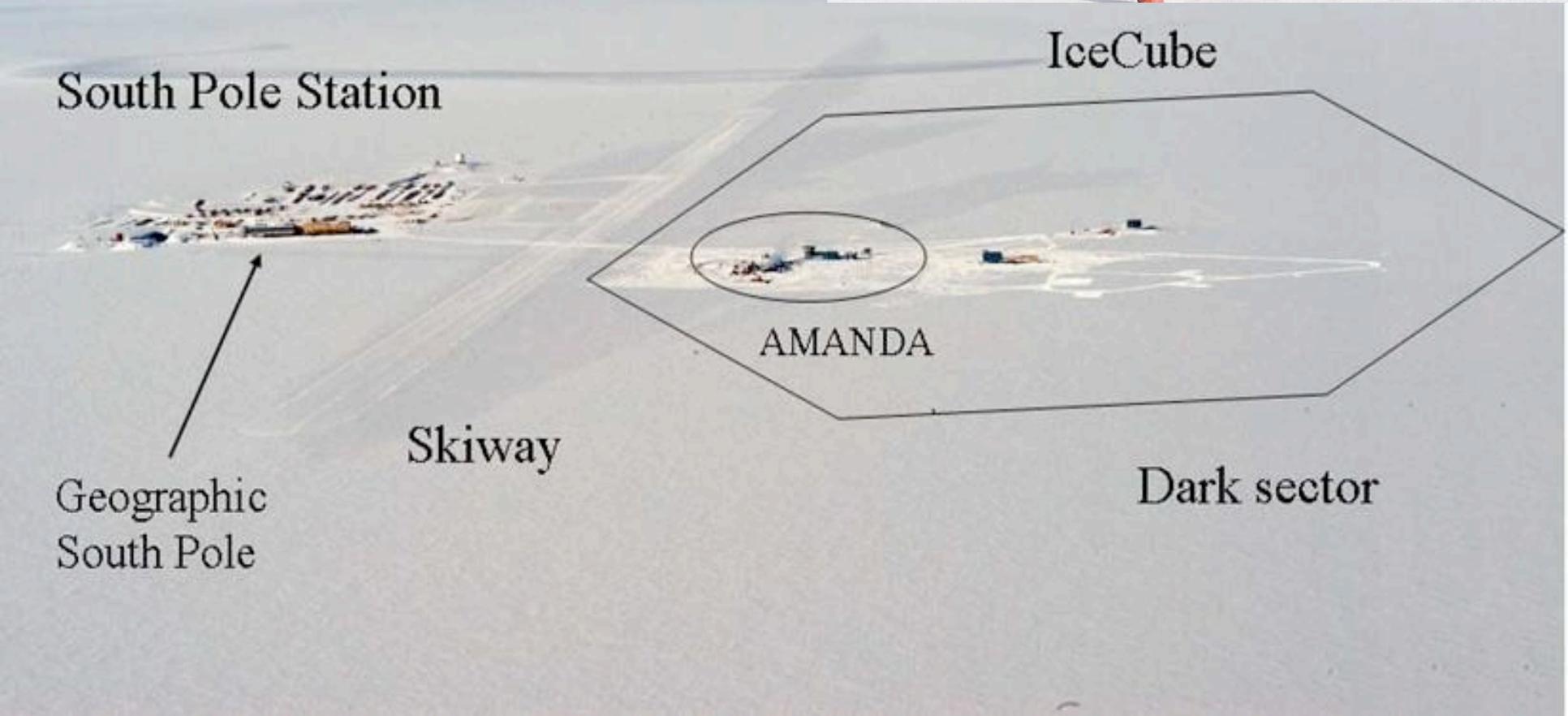


Baikal



IceCube

# IceCube



South Pole Station

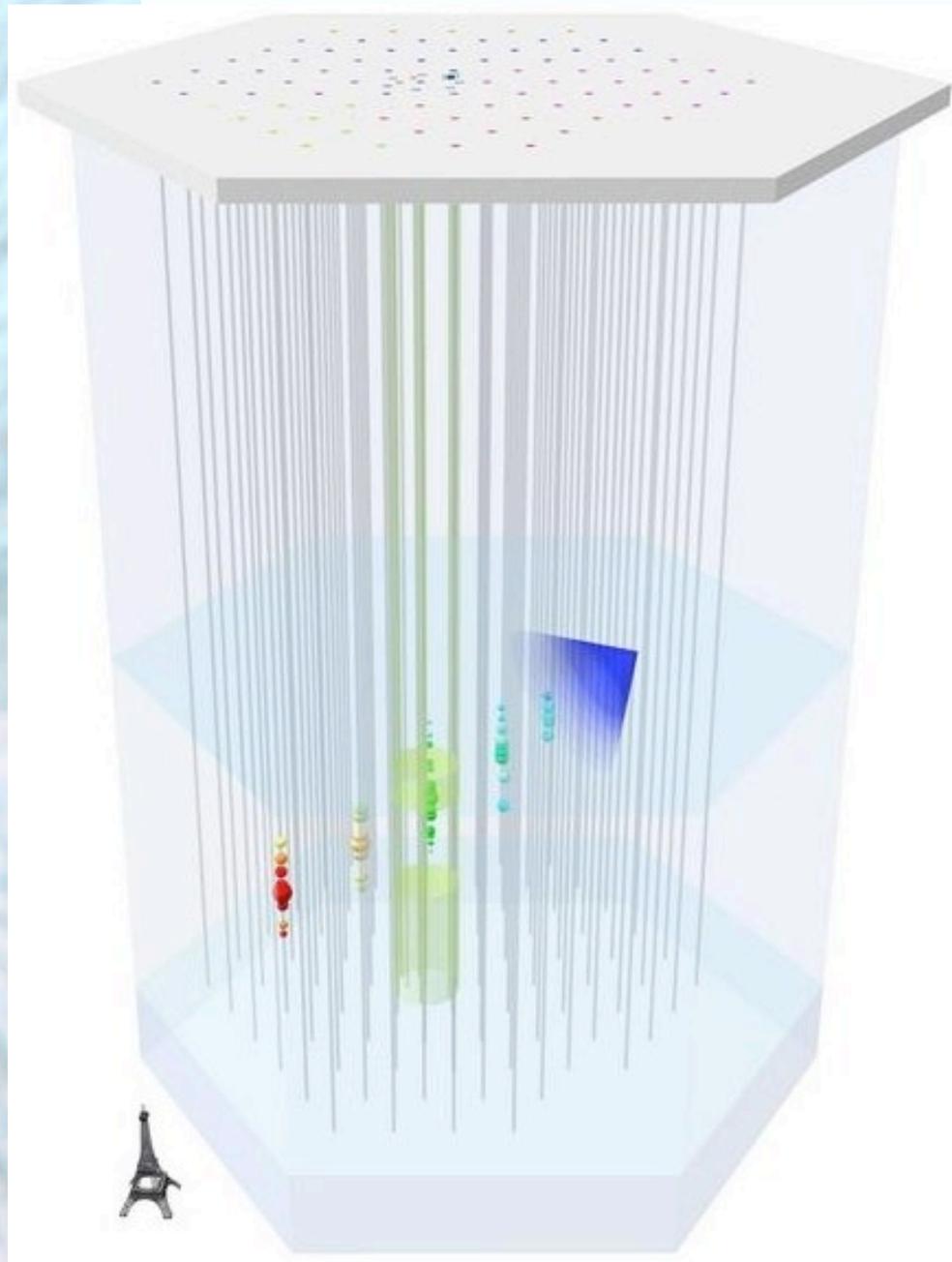
IceCube

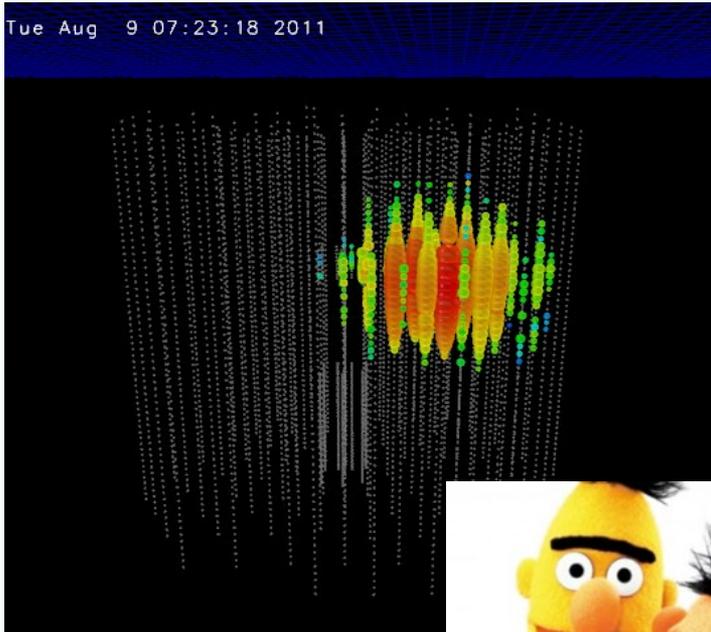
AMANDA

Skiway

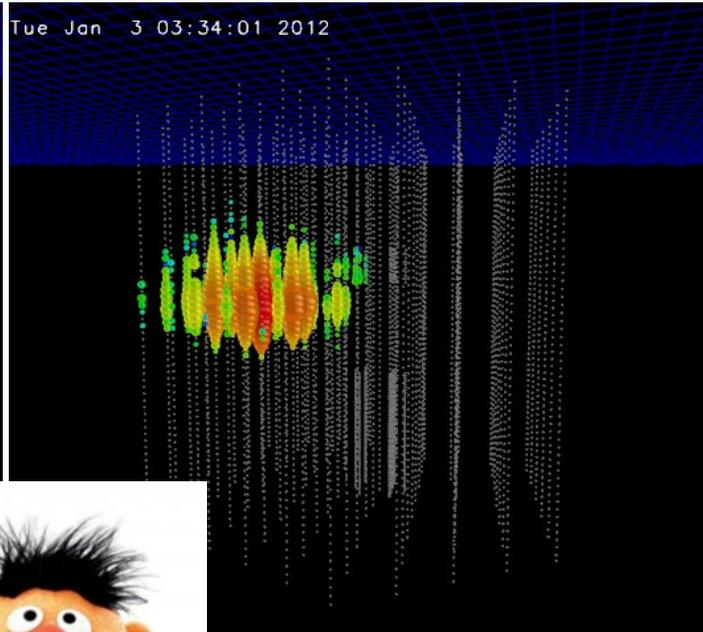
Dark sector

Geographic  
South Pole





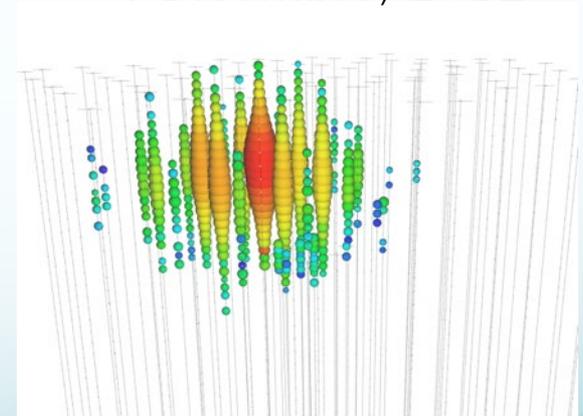
1 PeV



1 PeV



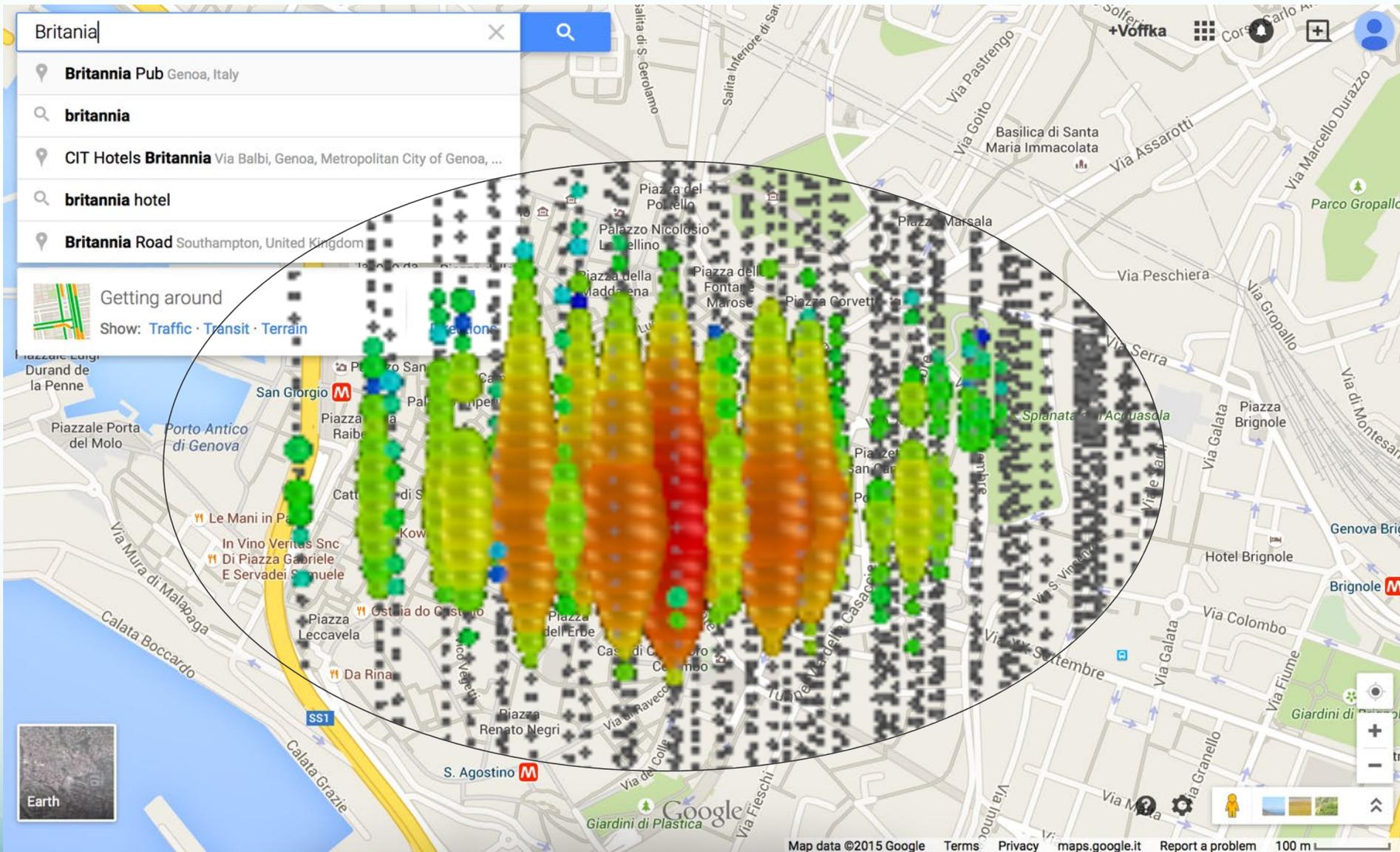
4 Dicembre, 2012



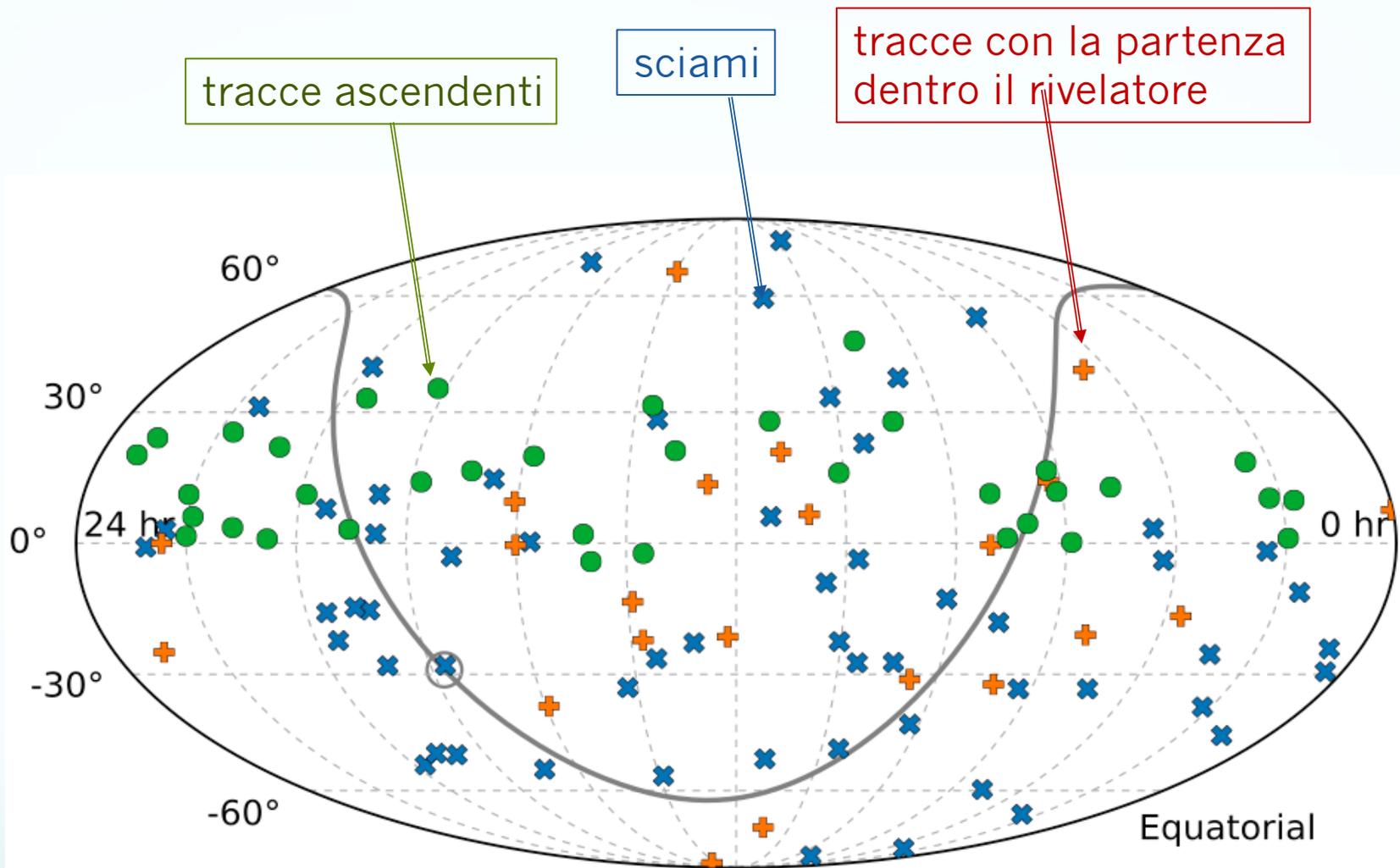
2 PeV



L'energia di particelle 500 volte che è stata prodotta dal uomo sulla Terra!



La luce di Bert potrebbe raggiungere ogni caruggio di Genova.

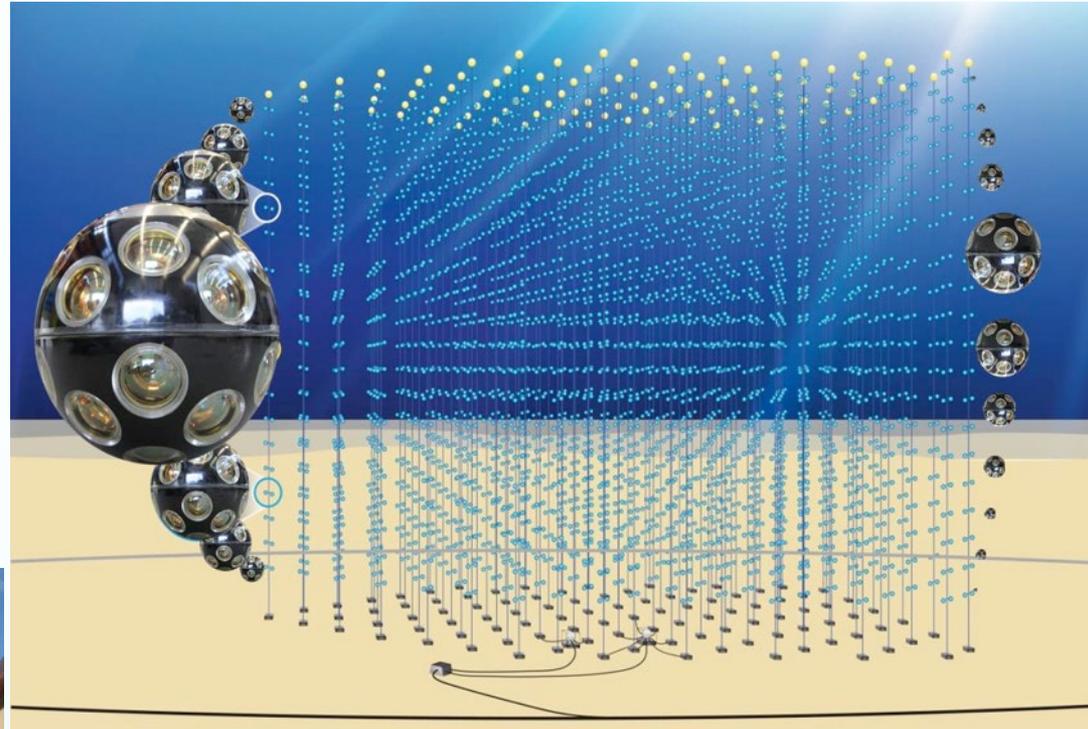


## Eventi con l'energia $> 200$ TeV ( $>50\%$ sono astrofisici)

Forse, già vediamo qualche sorgente di neutrini su questa mappa. Ma non possiamo essere certi!

Un rivelatore dall'altro lato della Terra è più adatto come il telescopio da osservare la nostra Galassia.

# KM3NeT



Flessibili stringhe (dyneema) con le sfere di vetro che contengono i fotomoltiplicatori (PMT). Ancora e boa per tenere la loro posizione verticale.

# KM3NeT deployments (ORCA)

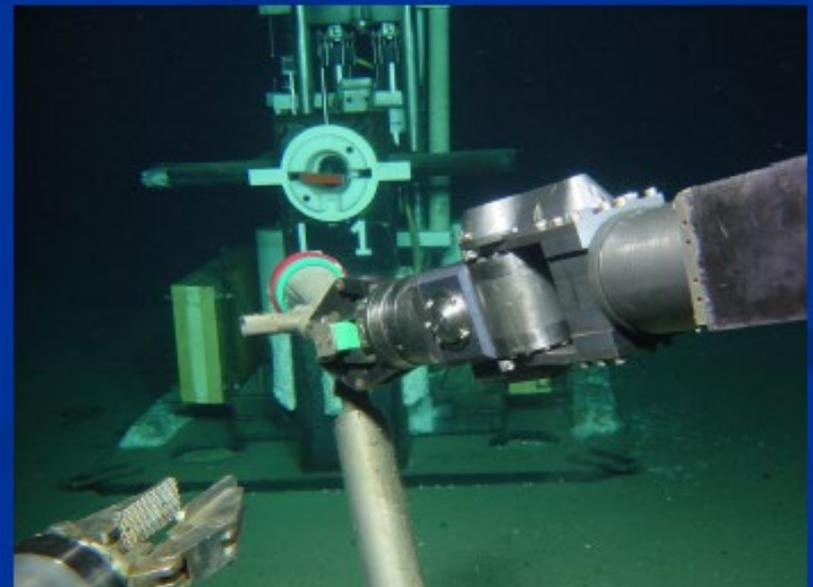


- The same boat ~15 years later!
- We can deploy up to 4 DUs per time (note the rubber boat position and the second DU waiting for the deployment).

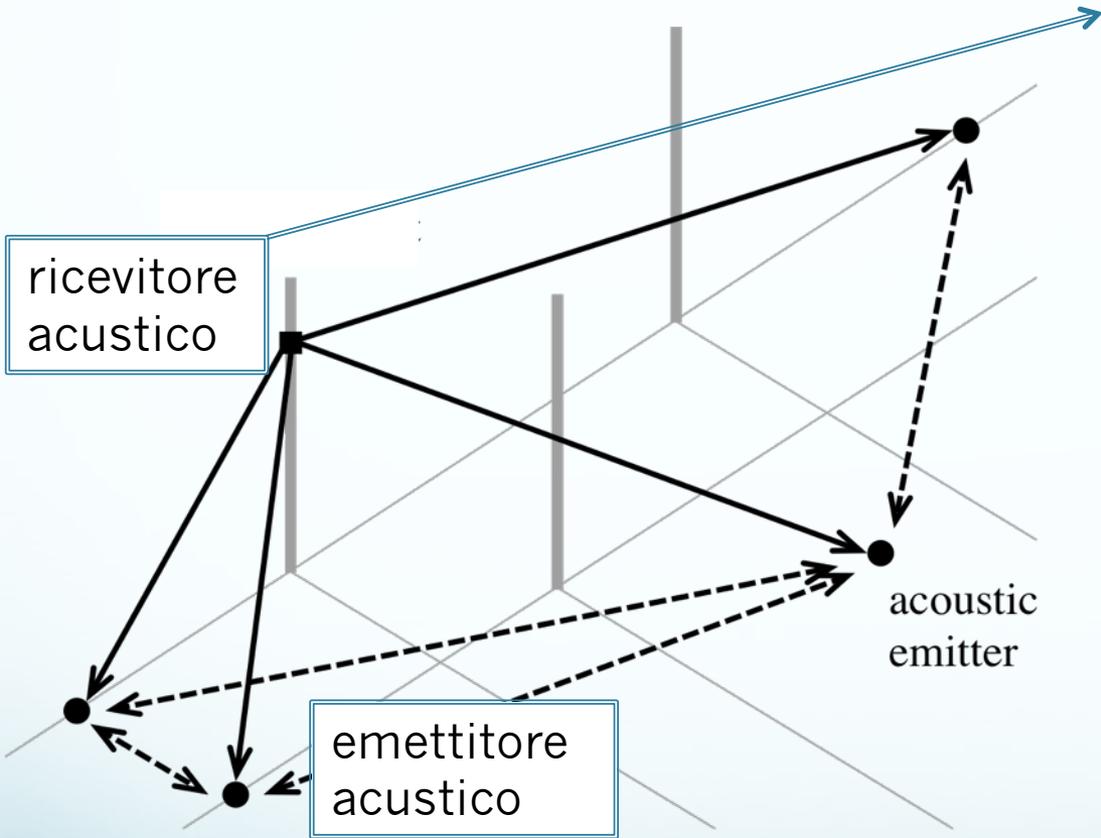
# La connessione delle linee con il ROV



- ROV « VICTOR » dell'IFREMER



# Posizionamento acustico



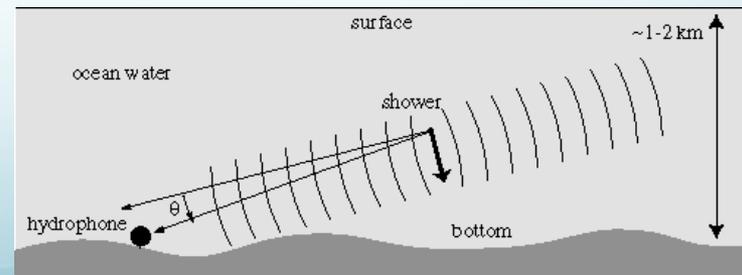
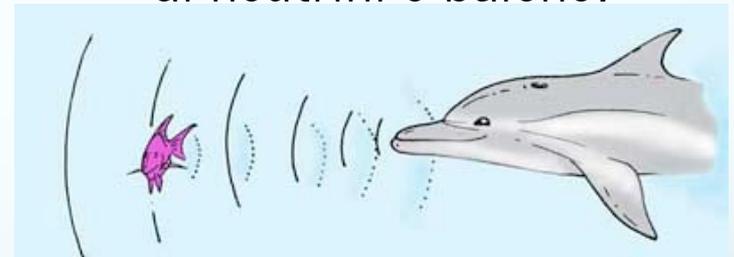
piezo



idrofono



Rivelatore acustico di neutrini e balene?



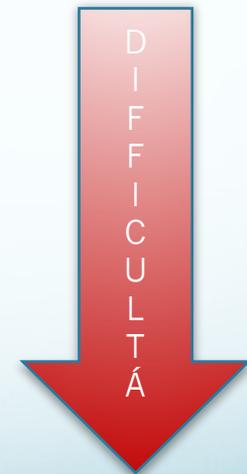
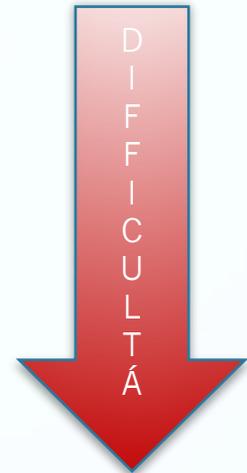
# Fisica di ARCA/ORCA

- ARCA

- Misura di flussi visti con IceCube.
  - Misura più sensibile al piano galattico (verifica di presenza di componente galattica).
- Misure di flussi dal Piano/Centro di Galassia.
- Misure di flussi dai sorgenti più promettenti.
  - Sensibilità per gli sorgenti galattici elevata. La soglia di energia più bassa di IceCube.

- ORCA

- Misura di apparenza di  $\nu$  tau.
- Misura di gerarchia di neutrini.
- Ricerca interazioni non-standard e neutrino sterili.
- Ricerca della materia oscura (dentro il Sole, GC).
- Misura di CP (fascio esterno).



Rivelazione delle supernove (senza la direzionalità, ARCA/ORCA).