

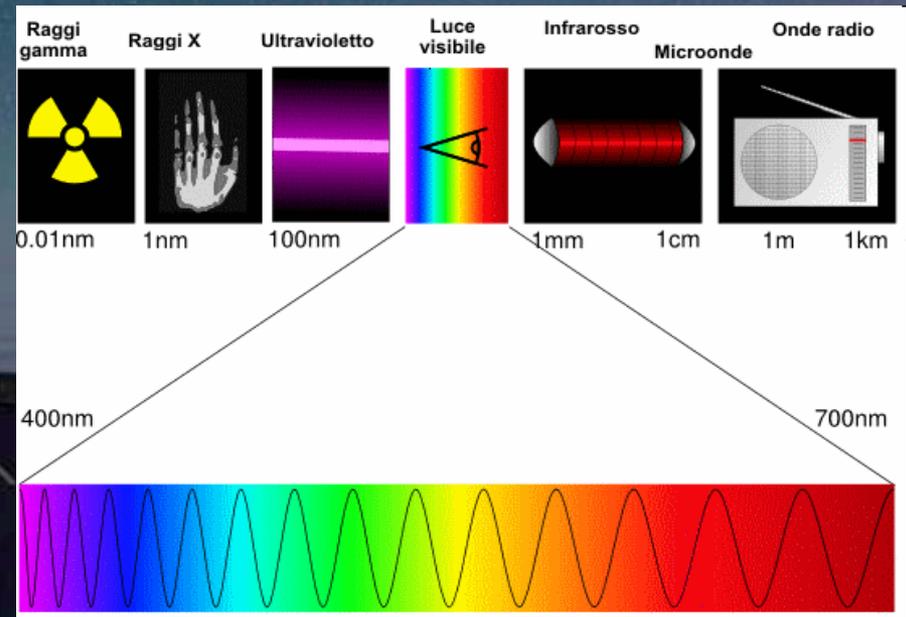
KM3NeT: la nuova generazione di rivelatori sottomarini di neutrini

Vladimir Kulikovskiy



Astronomia: la luce visibile

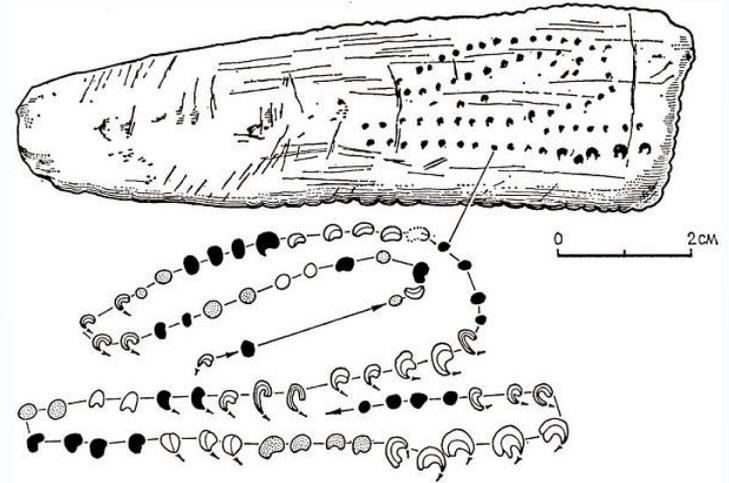
- **Scienza dell'osservazione del cielo.**
- **Inizialmente gli scienziati hanno studiato l'universo osservando la luce proveniente dalle stelle con i telescopi.**
- **I primi telescopi utilizzati sono stati telescopi ottici: viene osservata la luce visibile proveniente dai corpi celesti.**



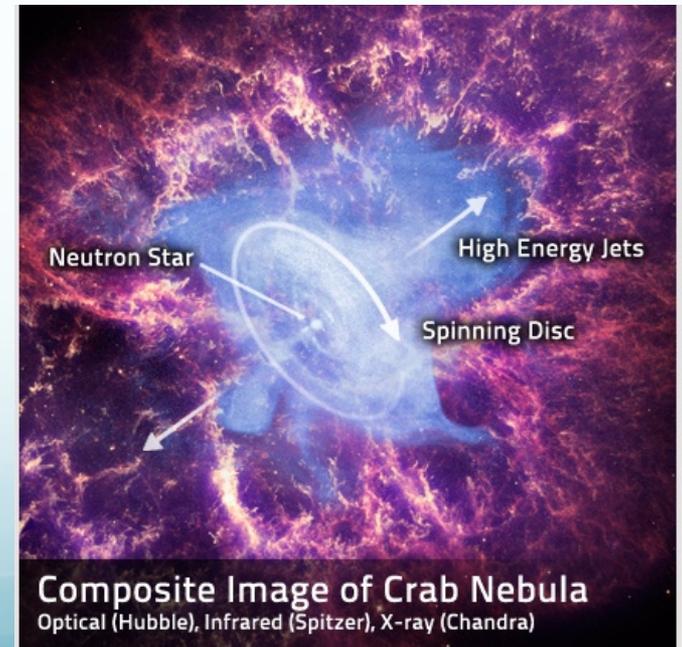
La luce visibile è solo una minima parte dello spettro di luce che un corpo celeste può emettere.

I messaggeri spaziali

- Fotoni ottici – da 32.000 BC
- Karl Yansky osserva l'emissione radio dal centro della galassia -1932.
- Infrarossi ~1960 (Harold Jonson crea fotometro near-infrared) le misure ~1000 stelle
- 1962 la prima sorgente raggi-X (Scorpio 1962)
- Il primo telescopio raggi gamma sulla orbita (Explorer 11) vede <100 fotoni gamma distribuiti uniformemente sul cielo).
 - 1987 Osservazione di gamma di progenitore di SN1987A.
- 14 Settembre 2015 onde gravitazionali da collisione di due buchi neri.
- La prima evidenza dell'esistenza di neutrini cosmici di alta energia – 2013 (~20 neutrini, uniformemente distribuiti in tempo e sul cielo).
 - Prime sorgenti???



Moon calendar c.32,000 B.C.



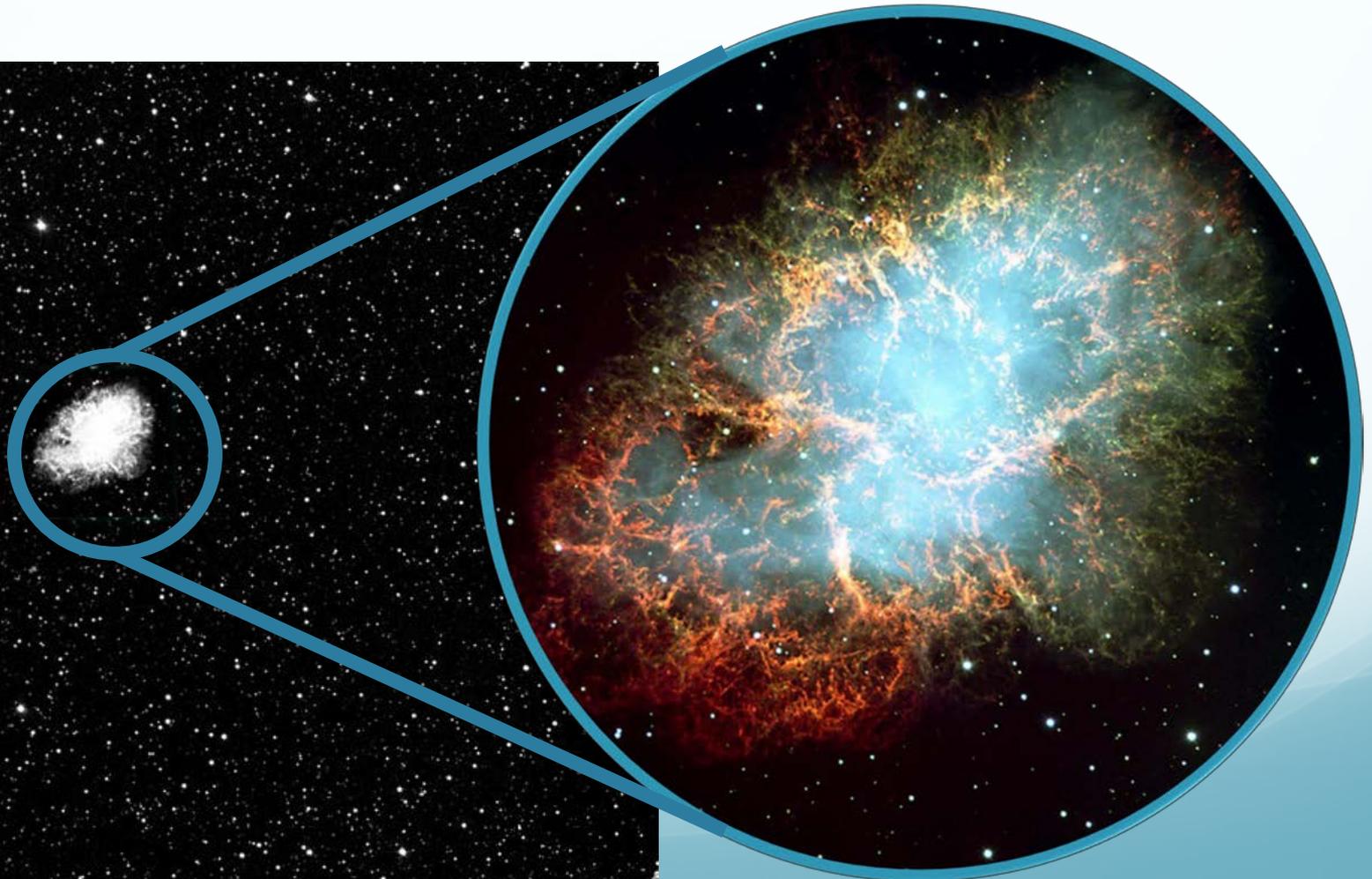
Un esempio: la nebulosa del granchio

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



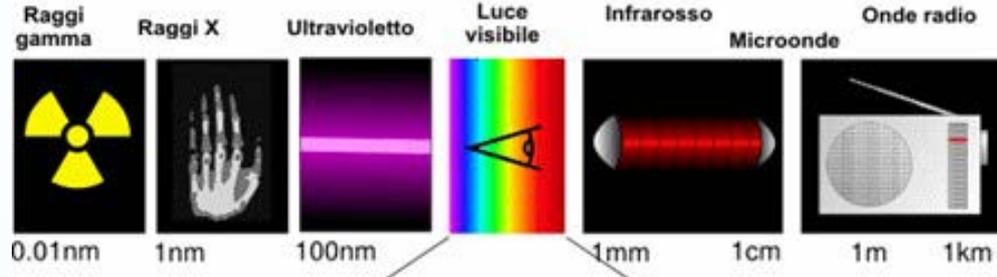
Un esempio: la nebulosa del granchio

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



Sonde differenti ci svelano i segreti delle stelle

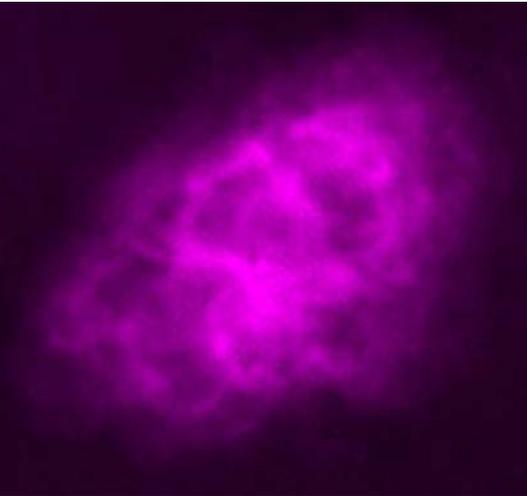
Luce visibile



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

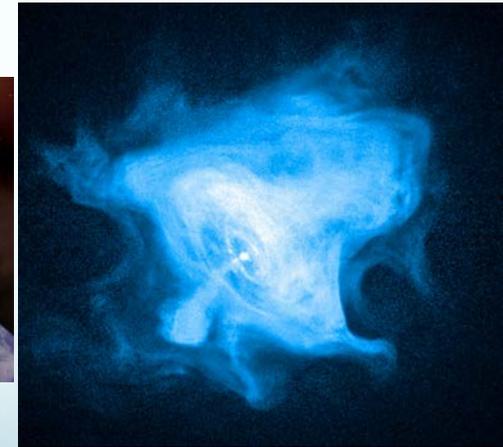


Onde radio



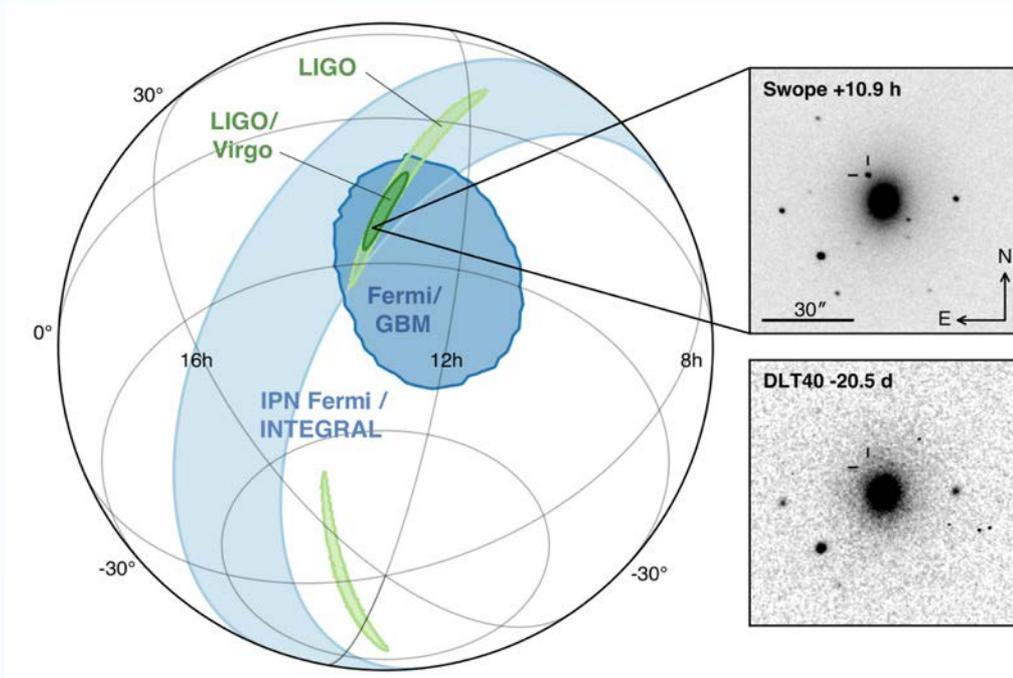
STRUTTURA ESTERNA

Chandra (raggi X)

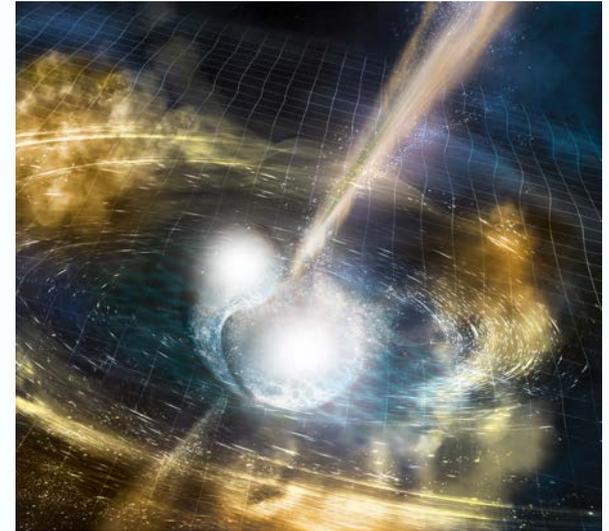


STRUTTURA INTERNA (pulsar)

I messaggeri spaziali

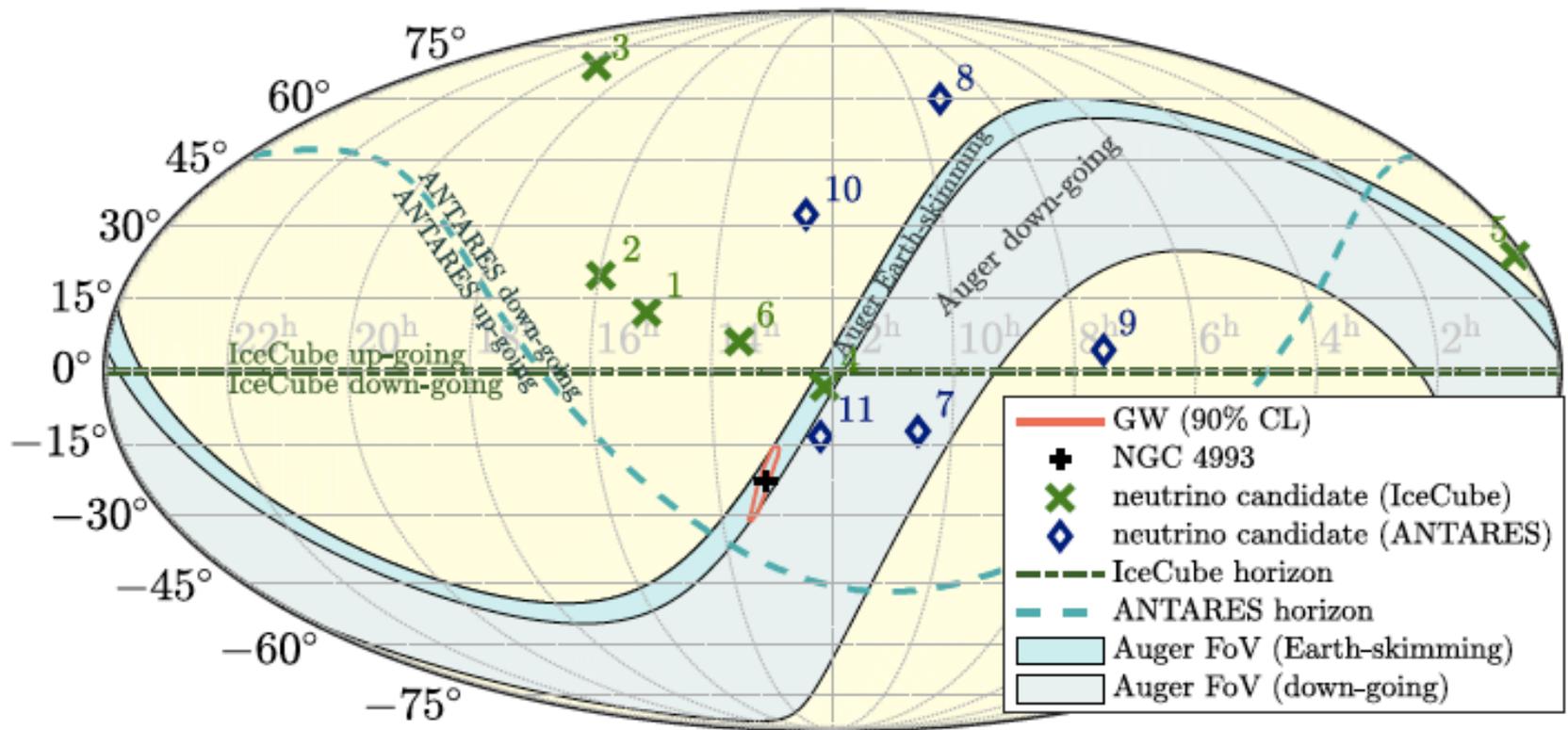


<http://ligo.org/science/Publication-GW170817MMA/>



- 17 Agosto 2017 – allerta dagli esperimenti di onde gravitazionale. Si rivela una collisione di due stelle di neutroni.
- Osservazione ottica (telescopio Swope in Chile) localizza la sua origine (Galassia NGC 4993).
- Le successive 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 contenuto nell'Universo (e sulla Terra)!

I messaggeri spaziali



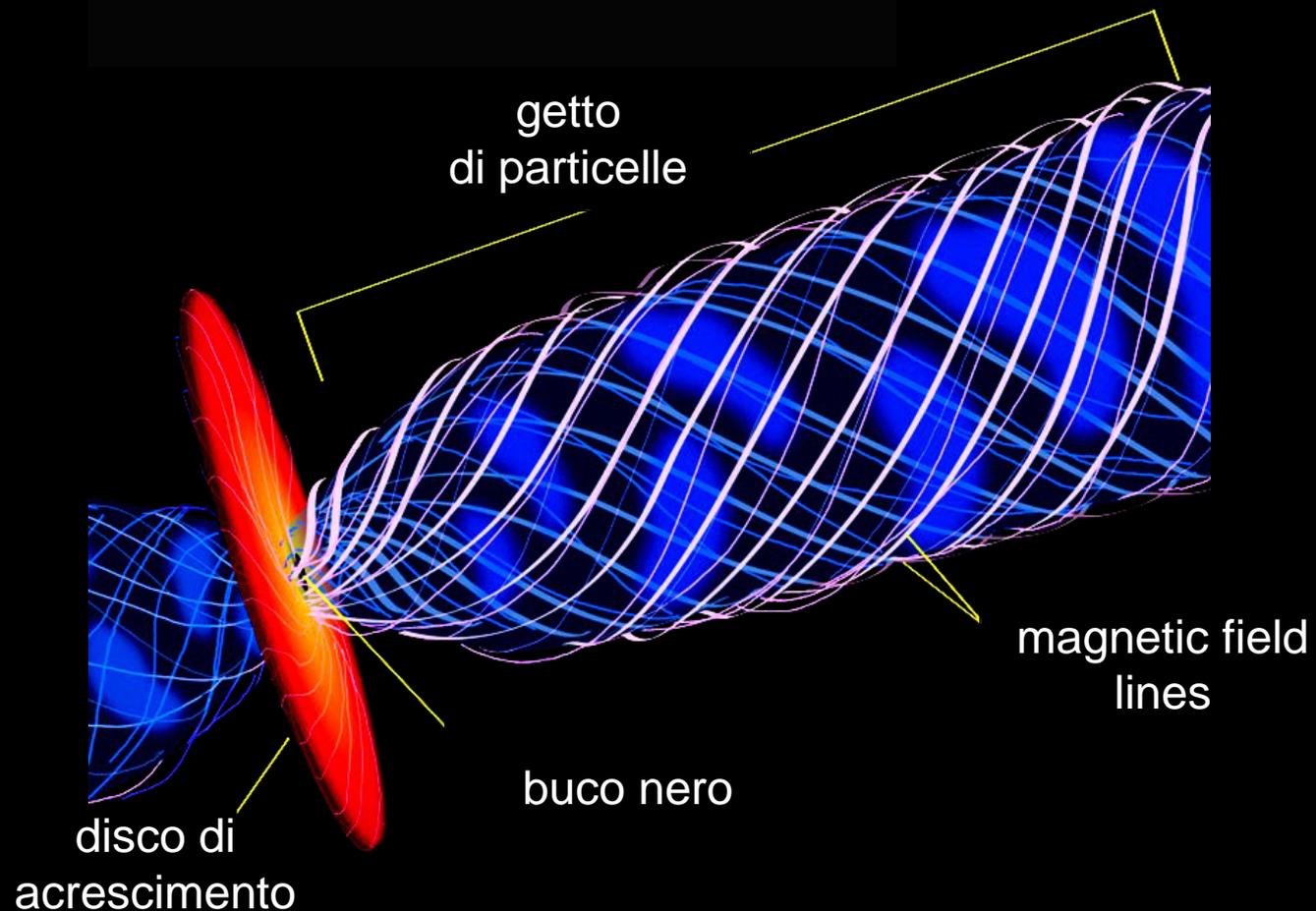
- Il 17 Agosto 2017 non sono stati osservati neutrini. Eravamo troppo fuori dall'asse di jet?



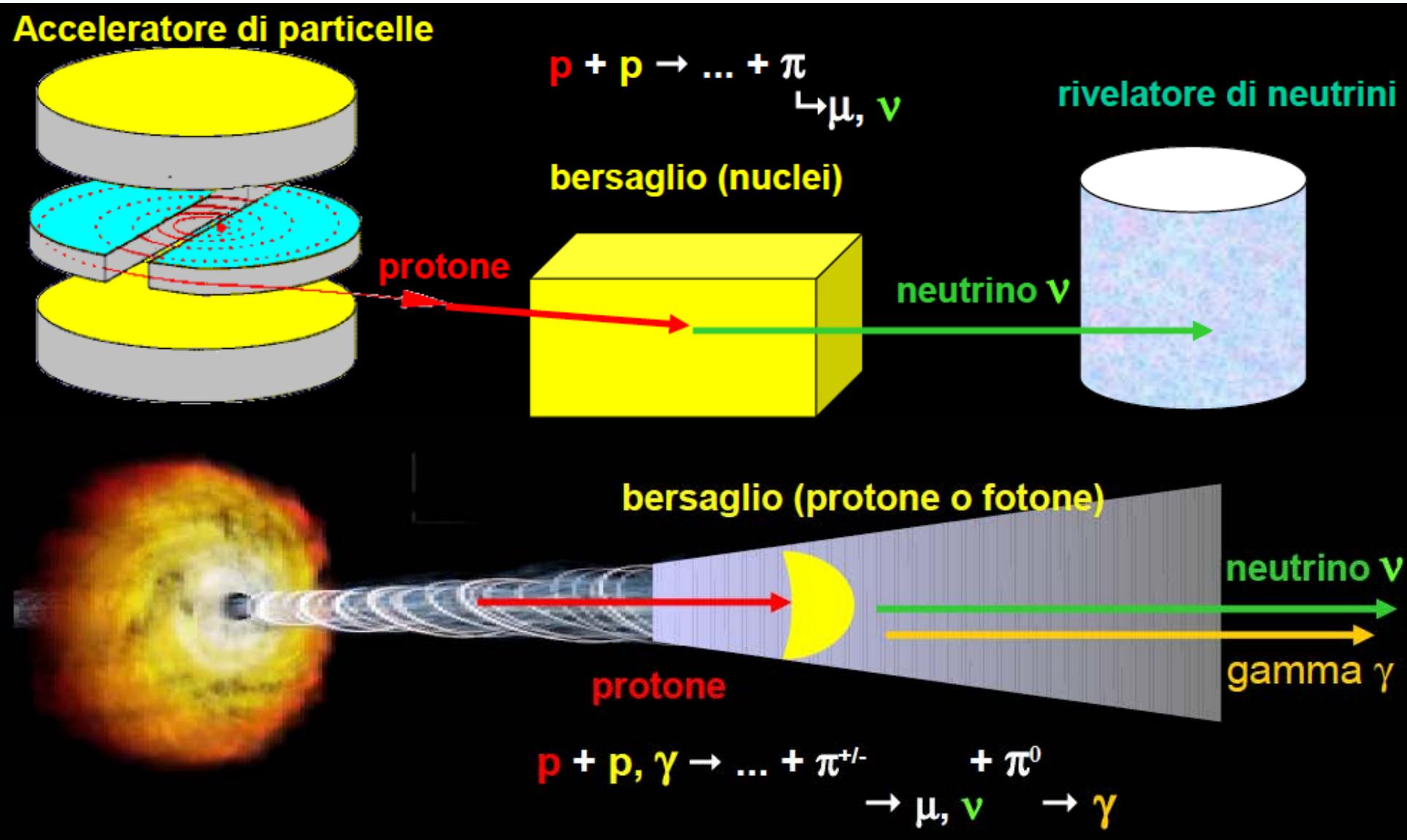
22 Settembre 2017 – la prima coincidenza tra EHE neutrino (IceCube) e un flusso di gamma da blazar TXS 0506+056 (Magic)

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**.

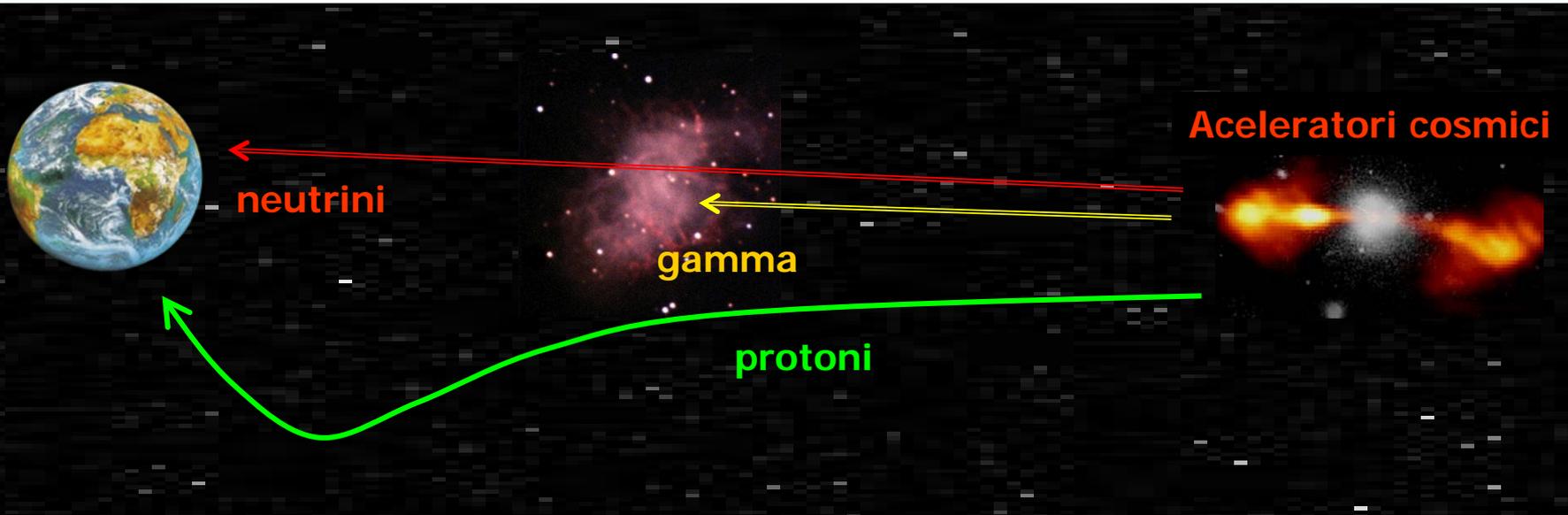


L'astrofisica con neutrini di altissima energia



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

Il neutrino: una “buona” sonda astronomica



Raggi gamma: possono essere assorbiti dalla polvere cosmica e dalla radiazione.

Protoni: arrivano sulla Terra ma sono deviati dal campo magnetico galattico e intergalattico.

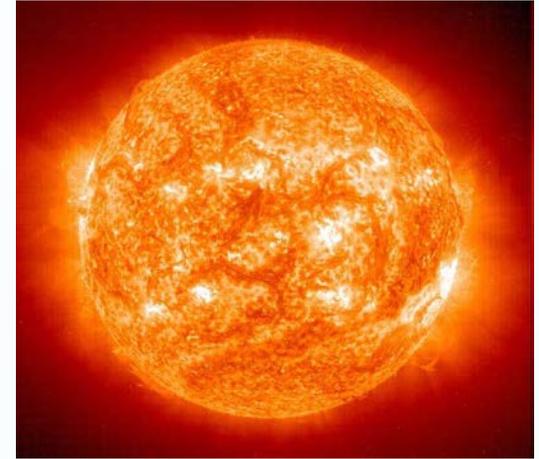
Neutrini: sono elettricamente neutri → non vengono deviati dai campi elettromagnetici interagiscono molto poco con la materia → attraversano distanze intergalattiche.

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.

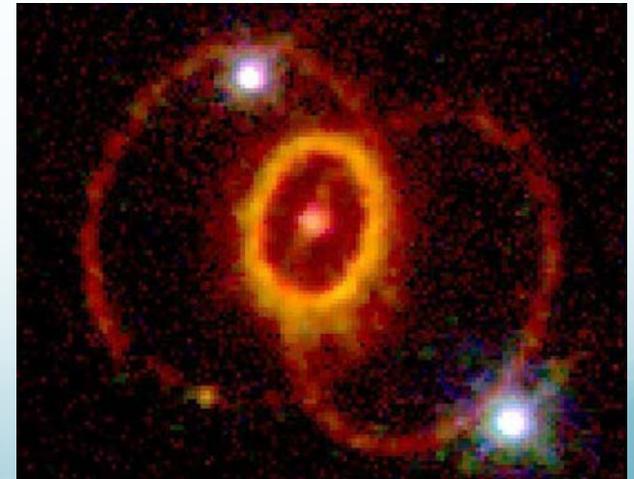
Il neutrino: una “buona” sonda astronomica

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.

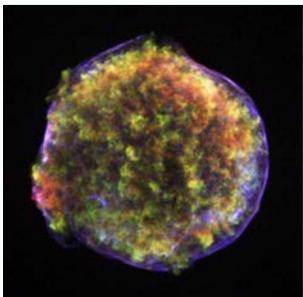


Anche l'esplosione di una Supernova genera un enorme flusso di neutrini che può essere osservato dalla Terra. Come avvenuto nel 1987 quando furono “catturati” circa 20 neutrini provenienti dall'esplosione della SN1987A, nella “vicina” Grande Nube di Magellano, a circa 200 mila anni luce dalla Terra.

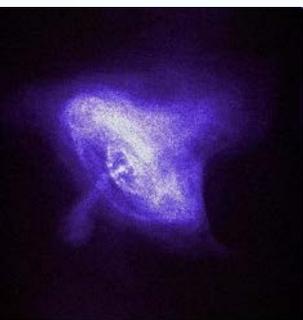


Le sorgenti di neutrini ad alta energia

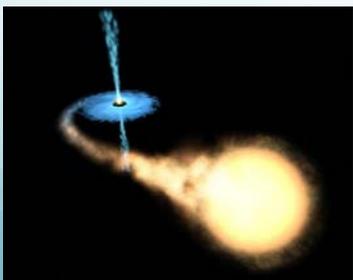
GALATTICHE



Resti di SN



Pulsars

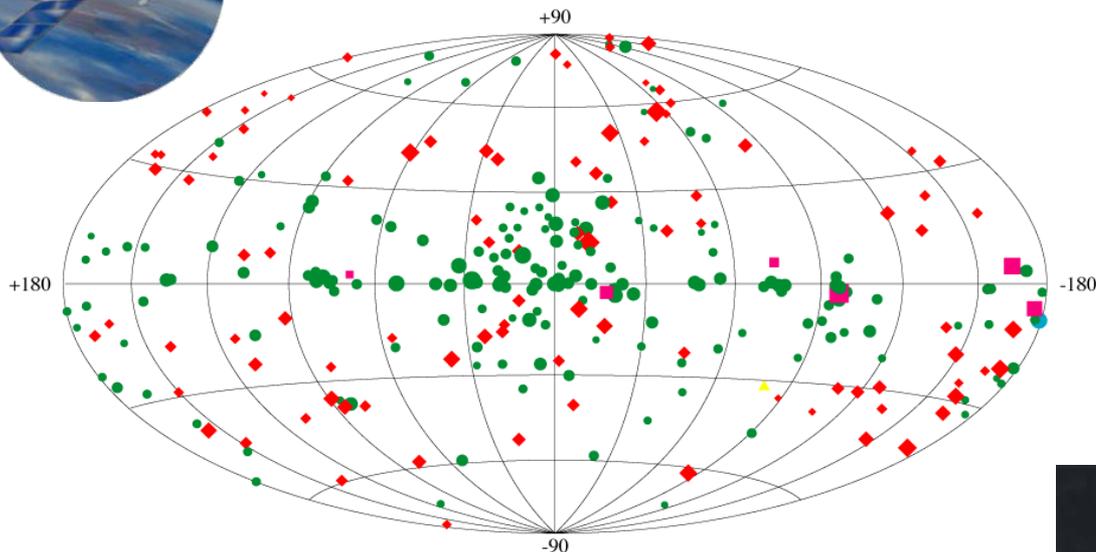


Microquasar



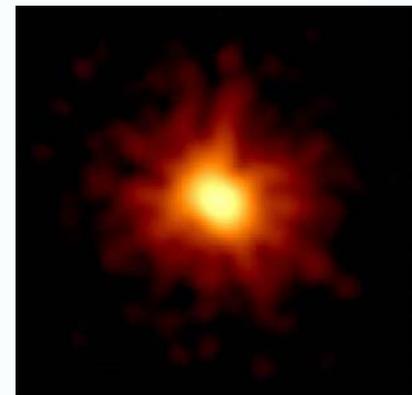
Third EGRET Catalog

$E > 100 \text{ MeV}$



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

EXTRA-GALATTICHE

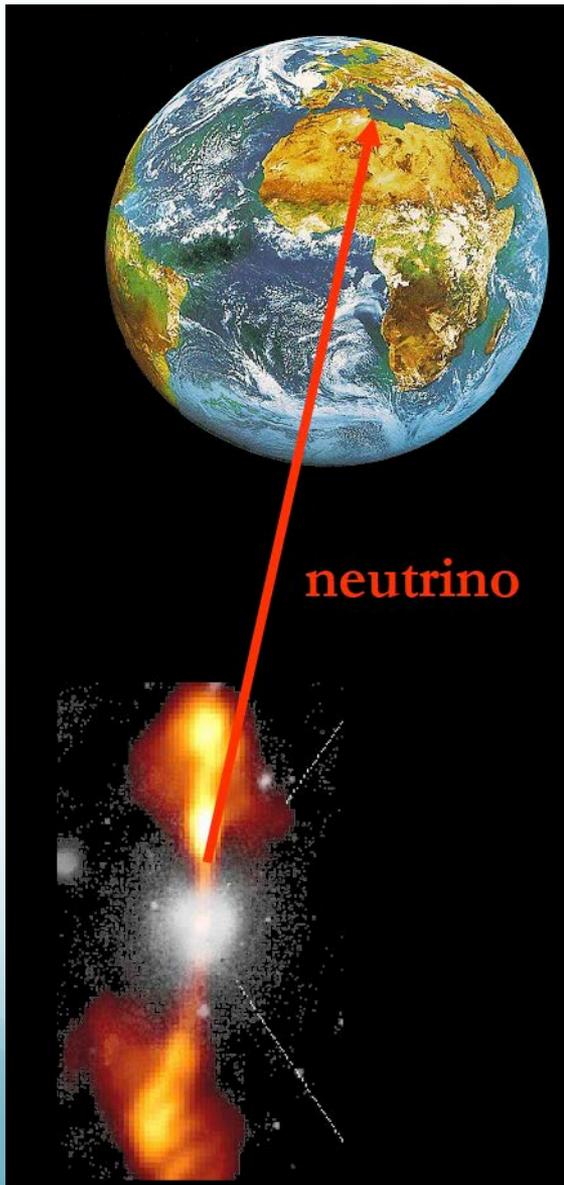


GRB



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 lato!

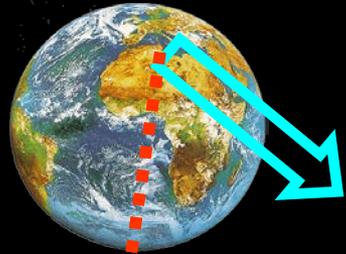
È possibile realizzare un rivelatore così grande?



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

Come si "vedono" i neutrini di altissima energia ?

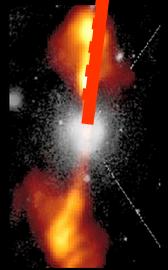
Solamente i neutrini possono attraversare la Terra



neutrino

Radiazione luminosa Cherenkov prodotta dal passaggio del muone

Rete di sensori ottici



Abissi Marini:
Profondità
>1000 metri

Connessione in fibra ottica da terra

Muone μ

43°

Fondale marino

interazione

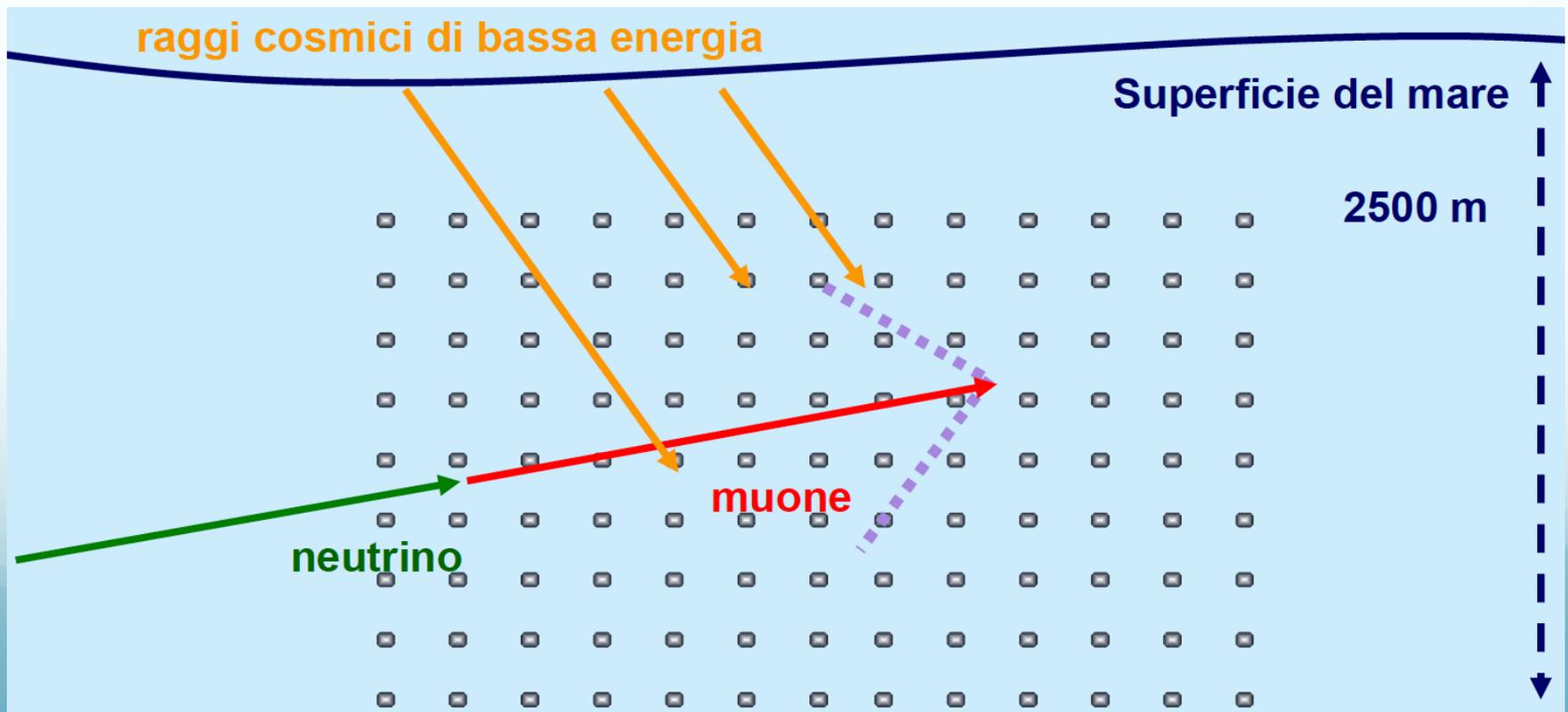
Il neutrino è una particella "invisibile" ma può interagire con un nucleo, nella roccia

neutrino ν

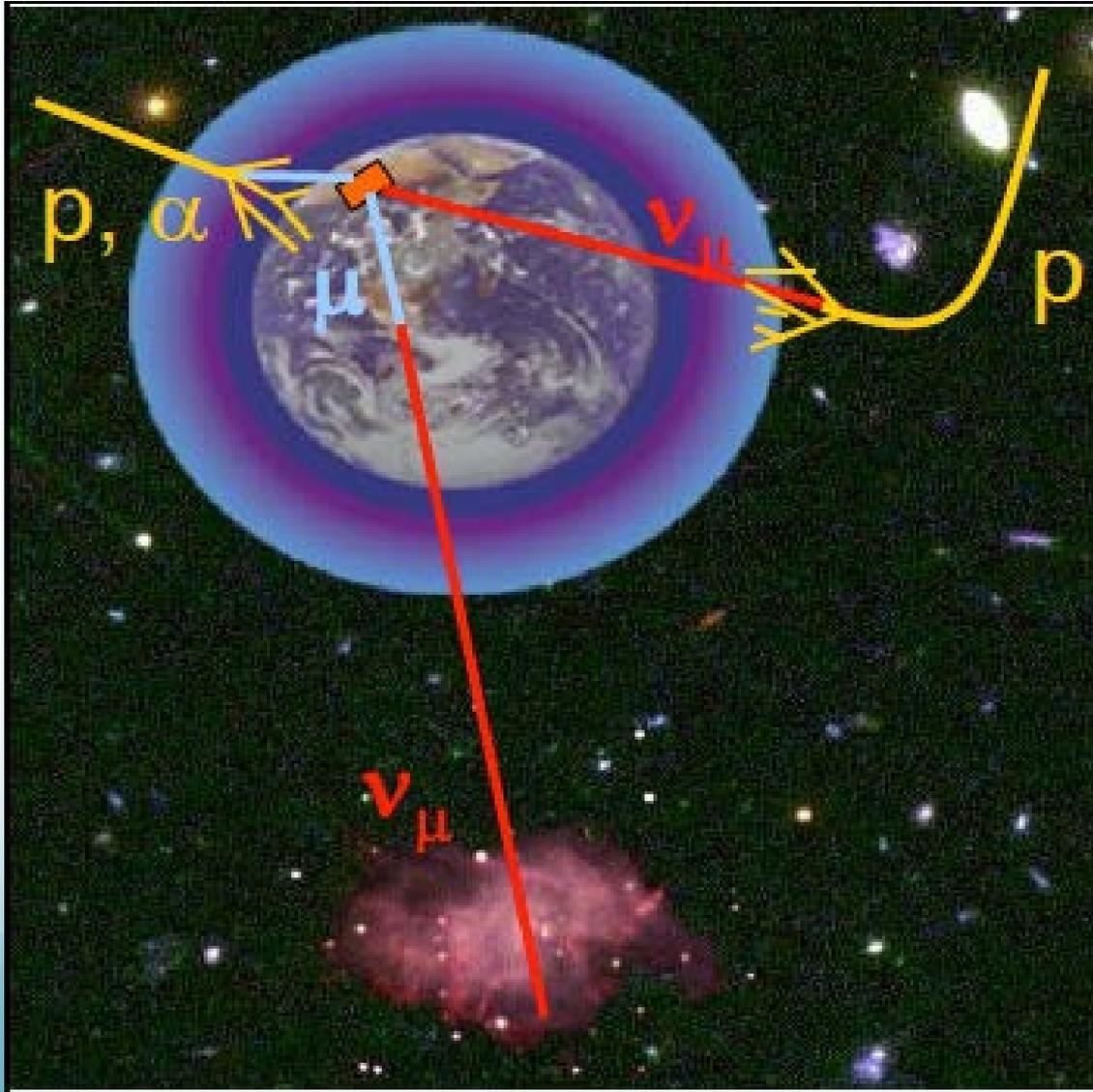
Il neutrino è rivelato usando la traccia del muone (rivelazione indiretta).



- 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 sulla sorgente.

Come possiamo distinguere I neutrini cosmici da eventi di fondo?

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

Dove?

ANTARES - KM3NeT
Mediterraneo

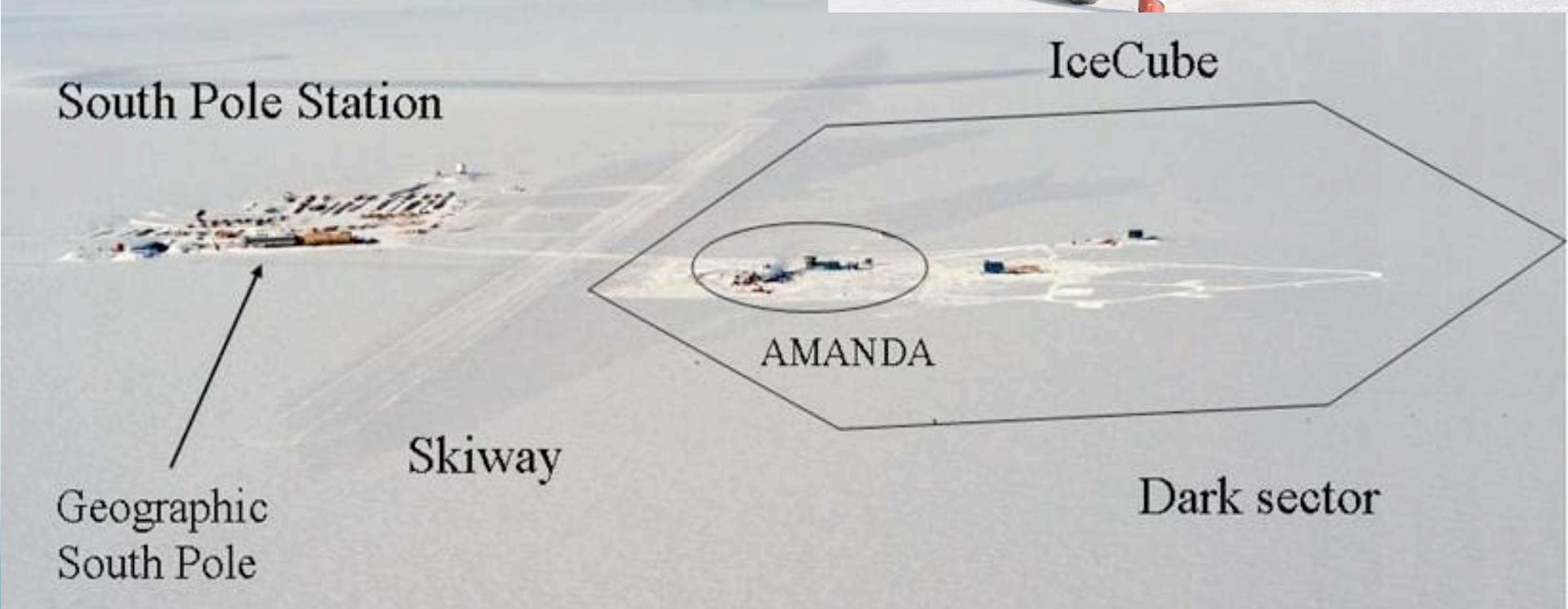
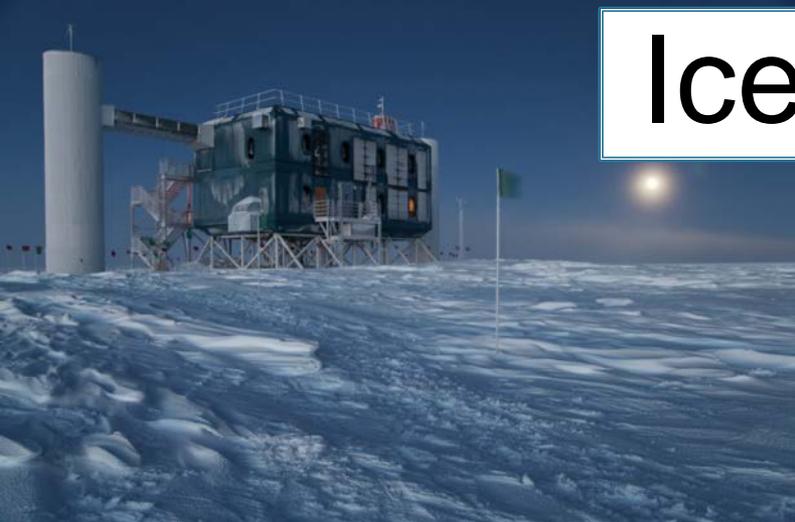


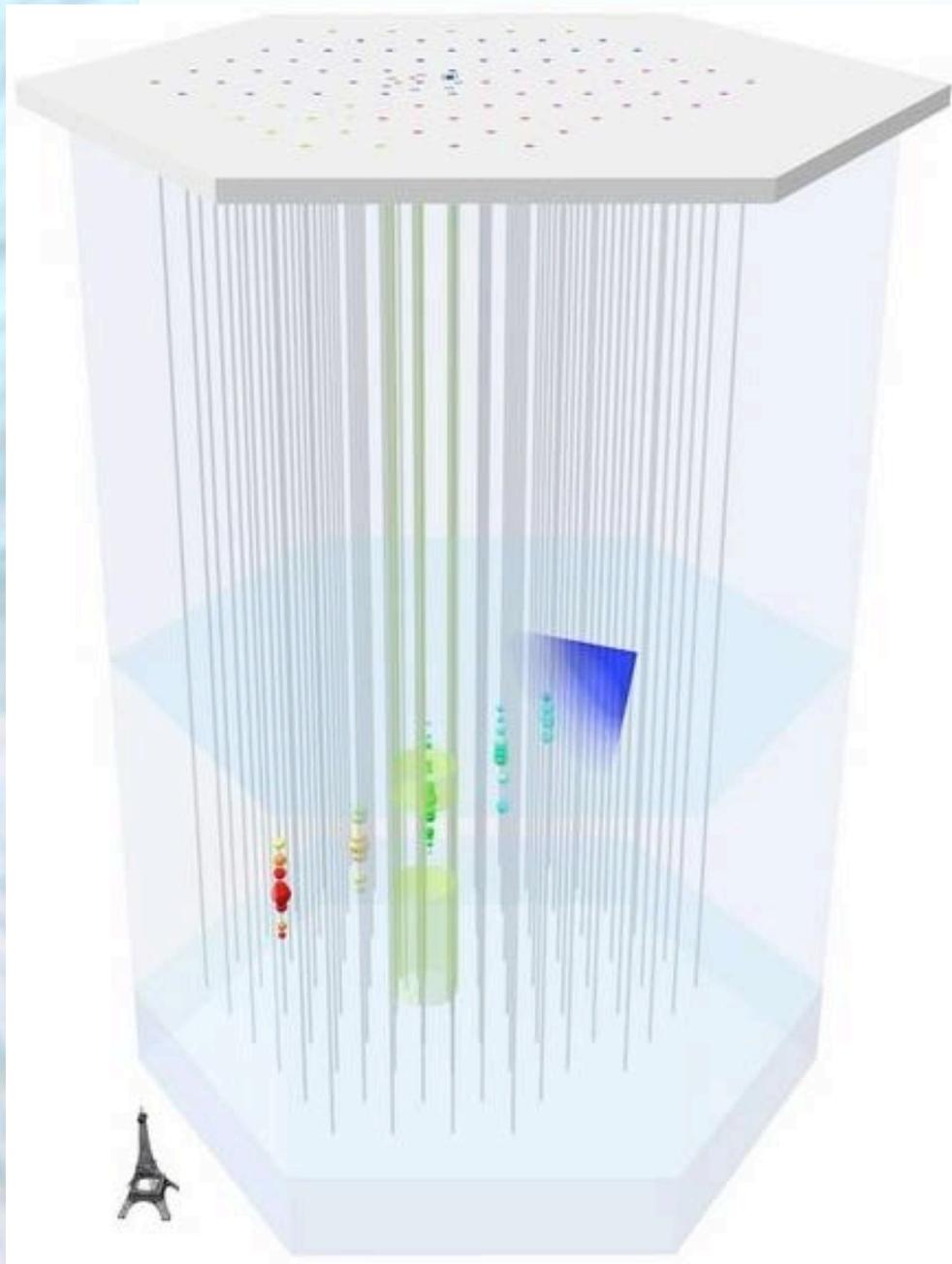
Baikal

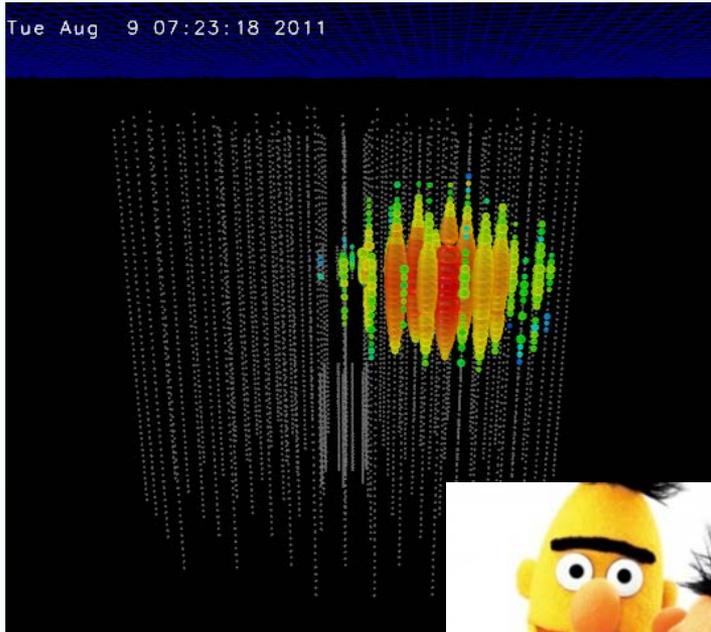


IceCube

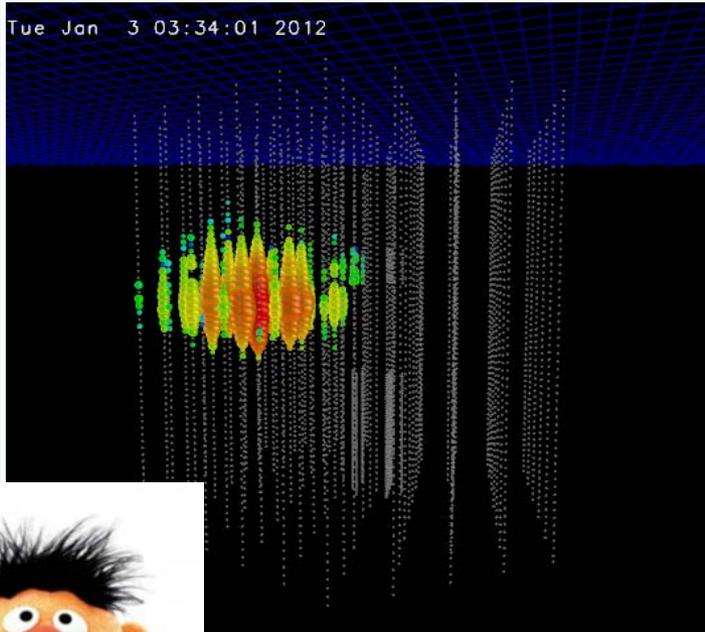
IceCube







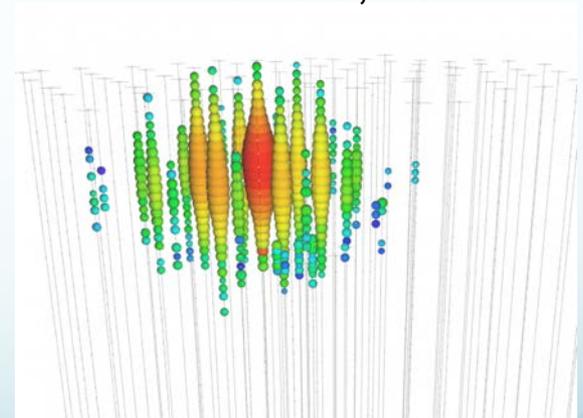
1 PeV



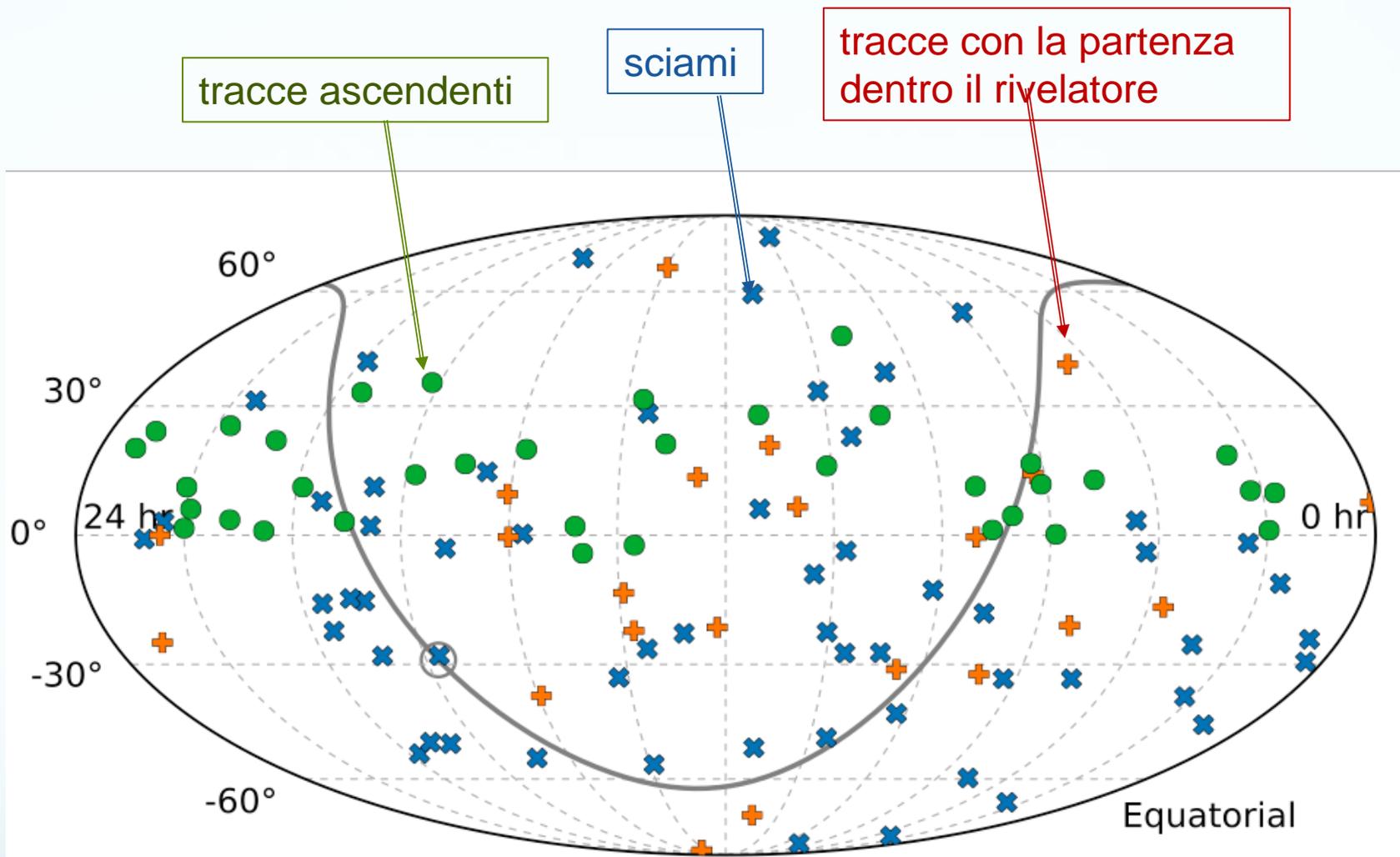
1 PeV



4 Dicembre, 2012



2 PeV

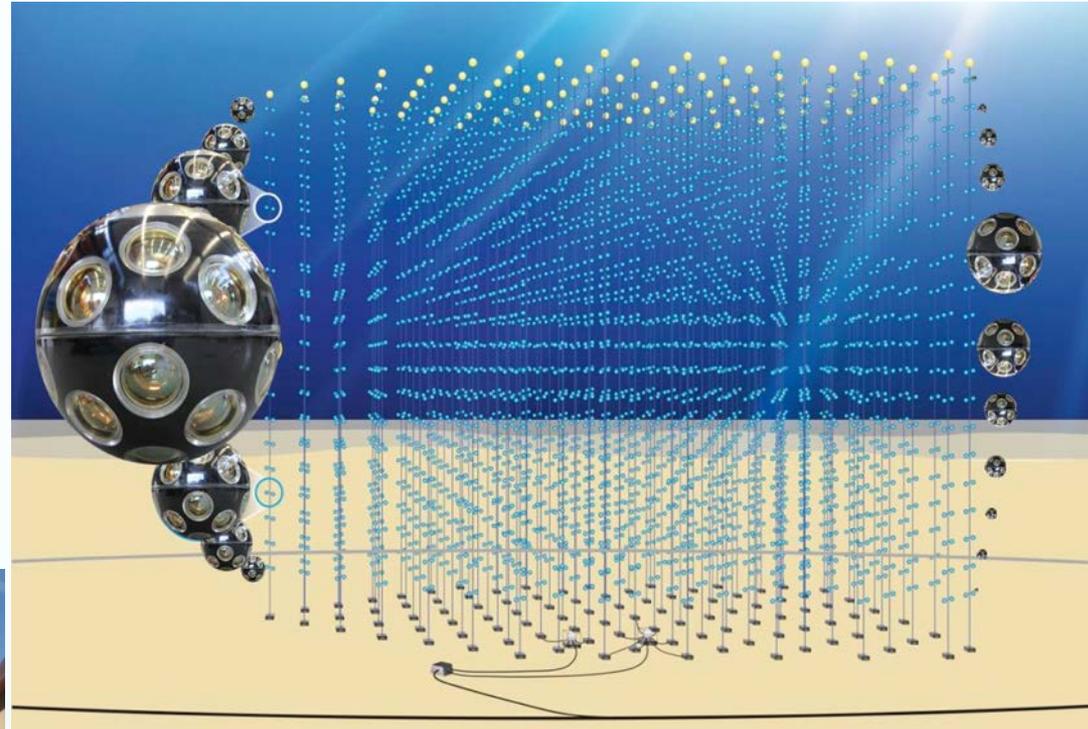


Eventi con l'energia > 200 TeV (>50% sono astrofisici)

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 telescopio per osservare la nostra Galassia.

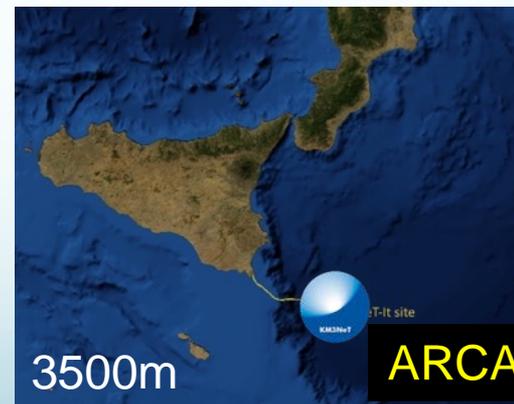
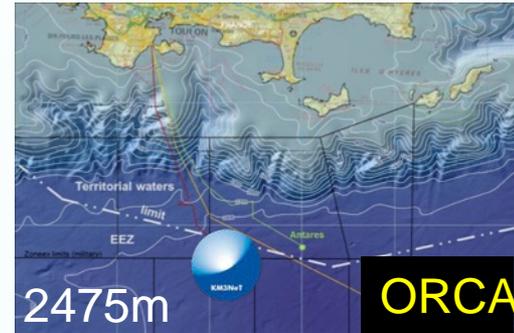
KM3NeT



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

KM3NeT

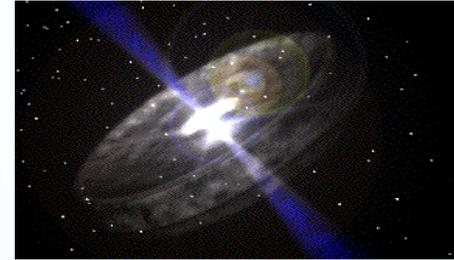
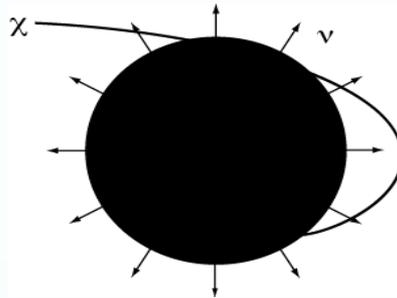
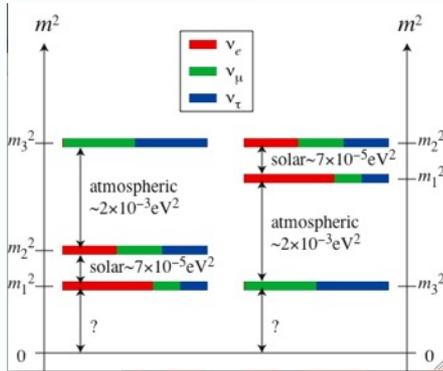
Multi-site deep-sea neutrino research



Stessa collaborazione, stessa tecnologia. Due siti +



Fisica di ARCA/ORCA



<p>Energia Bassa $3 \text{ GeV} < E_\nu < 50 \text{ GeV}$</p>	<p>Energy Media $10 \text{ GeV} < E_\nu < 1 \text{ TeV}$</p>	<p>Energia Alta $E_\nu > 1 \text{ TeV}$</p>
--	---	---

Oscillazioni di ν
 Gerarchia di massa di ν

Ricerca della DM
 + Ricerca esotica

Sorgenti astrofisici di ν
 Origine di CR



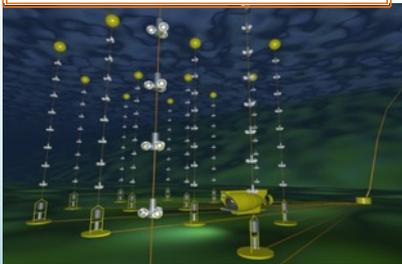
**Oscillation Research with
 Cosmics in the Abyss
 (ORCA)**

**Astroparticle Research with
 Cosmics in the Abyss
 (ARCA)**

Le misure dei telescopi sottomarini

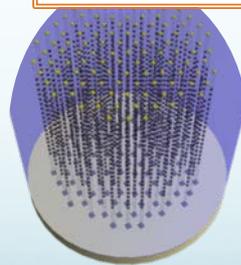
	ANTARES	ORCA (+denso)	ARCA (+grande)
Massa efficace	10 Mt	5.7 Mt	1 Gt
Lunghezza linee	350 m	200 m	650 m
Distanza tra le linee	70 m	20 m	90 m
Spazio vert.	14.5 m	9 m	36 m

12 lines
25 sectors/line

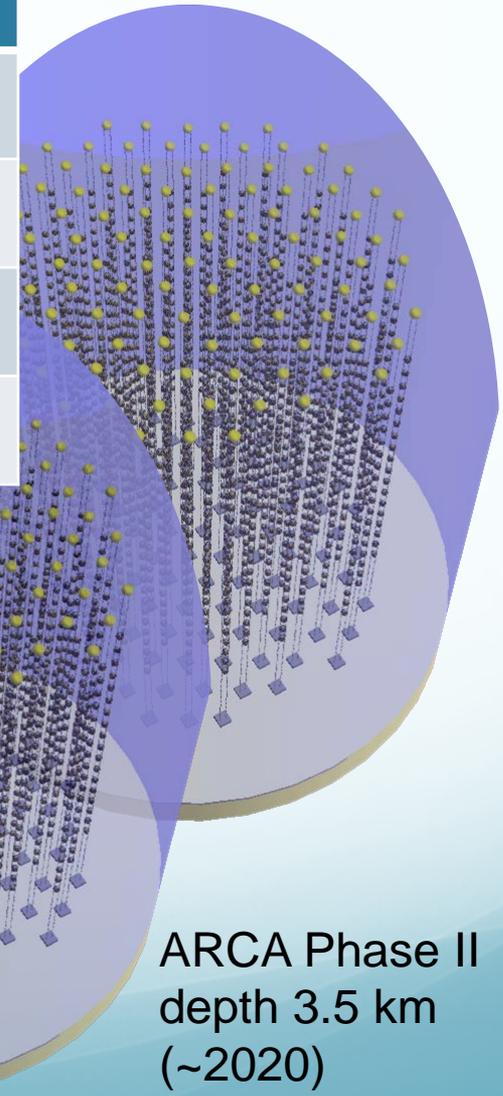


ANTARES
depth 2.5 km
(completed since 2008)

115 lines
18 DOMs/line



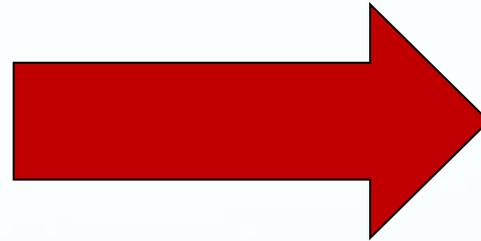
ORCA
depth 2.5 km
(~2020)



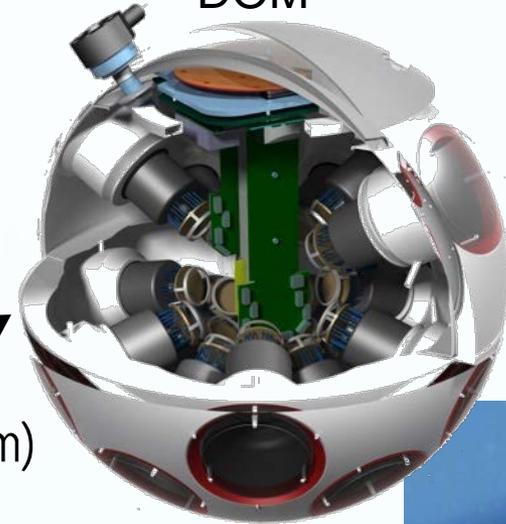
ARCA Phase II
depth 3.5 km
(~2020)

Technologia

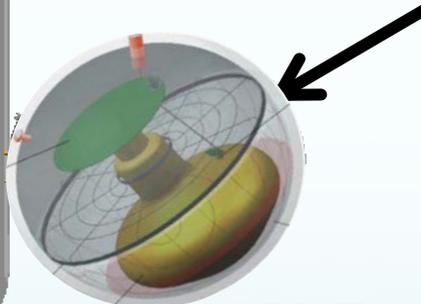
Piano di ANTARES



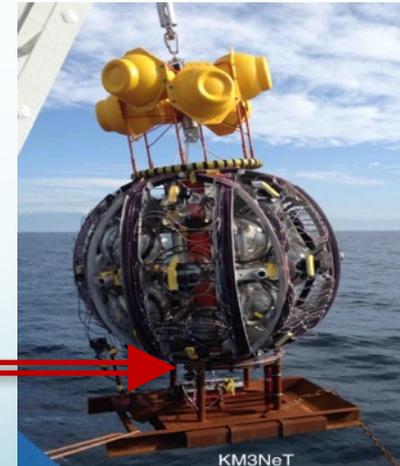
DOM



Stessa sfera (R=43 cm)



3*10" PMTs -> 31*3" PMTs
Stessa area di fotocatodo
+compatto
+angolo di vista
+informazione direzionale
+conto di fotoni
-prezzo

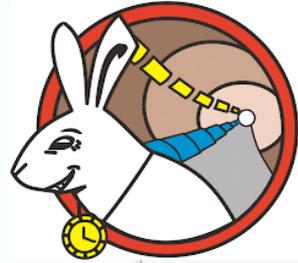
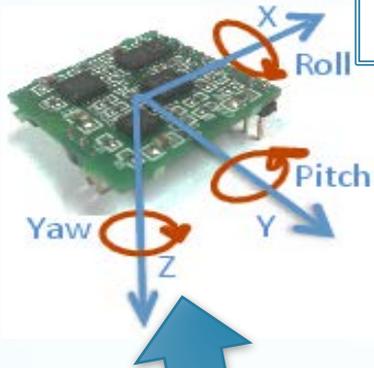


rapid deployment
autonomous unfurling
recoverable



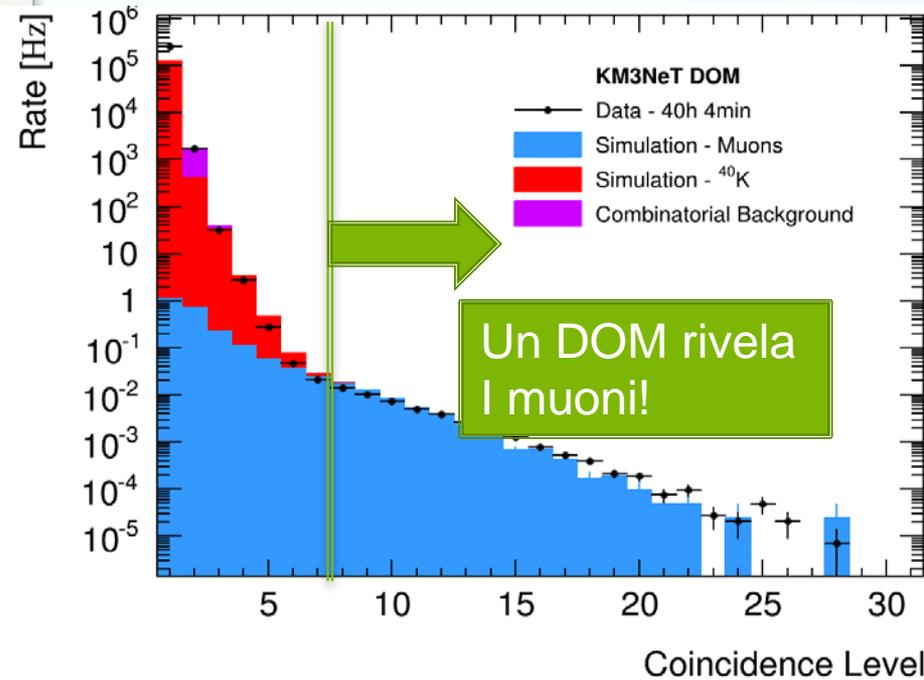
Modulo ottico direzionale

Bussola per la definizione dell'orientamento

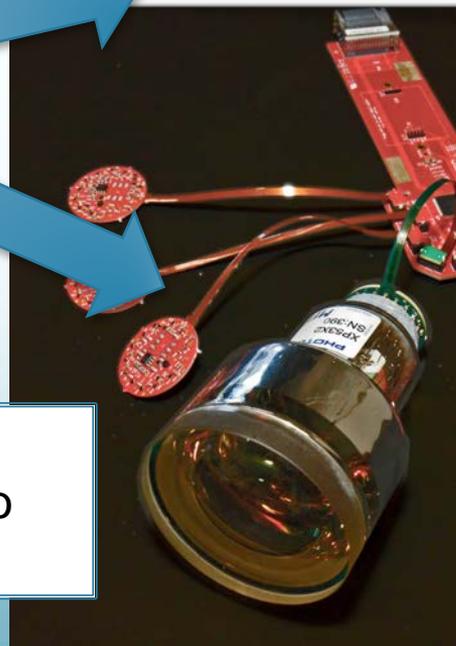


White Rabbit (CERN)
per la sincronizzazione al sub-ns

FPGA per la digitalizzazione di
segnali, controllo e
trasferimento di dati



Piezo per il
posizionamento
acustico



Installazione di KM3NeT (ORCA)

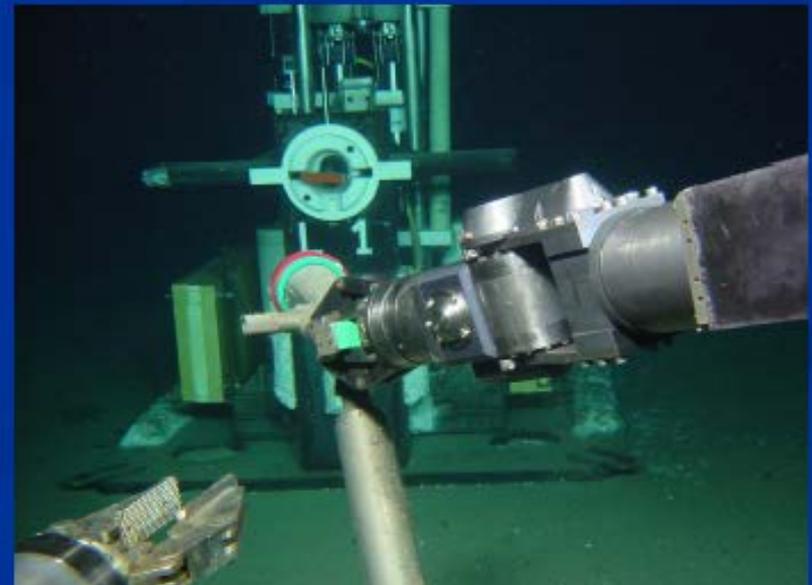


- Stessa nave ~15 anni dopo!
- Possiamo immergere fino a 4 Du alla volta (notare la seconda DU in fondo)

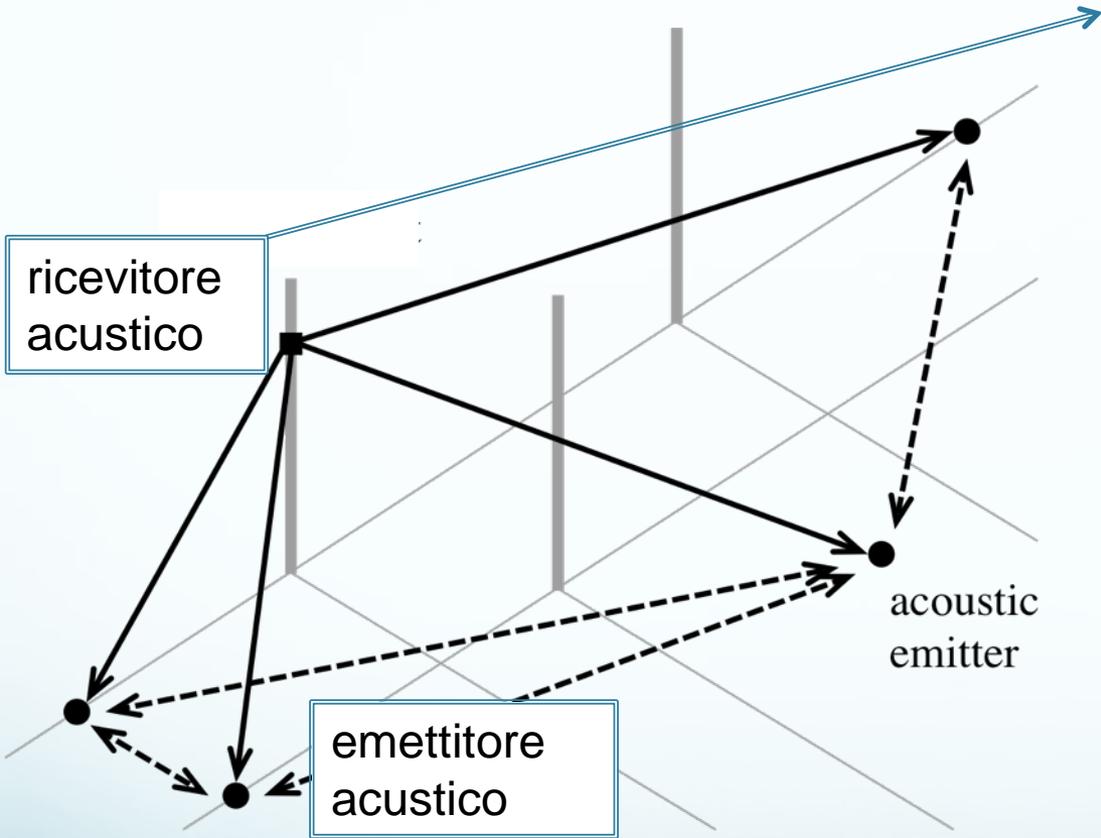
La connessione delle linee con il ROV



- ROV « VICTOR » dell'IFREMER



Posizionamento acustico



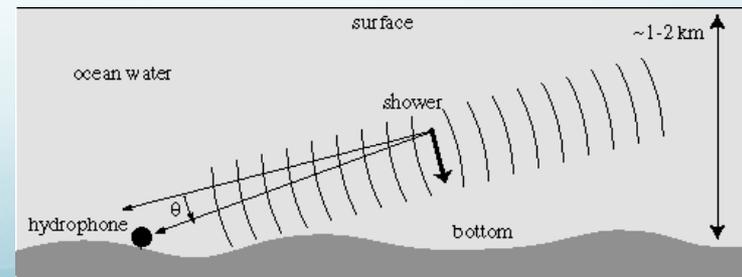
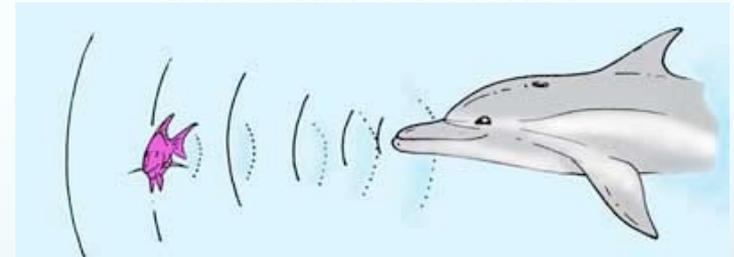
piezo



idrofono



Rivelatore acustico di neutrini e balene?



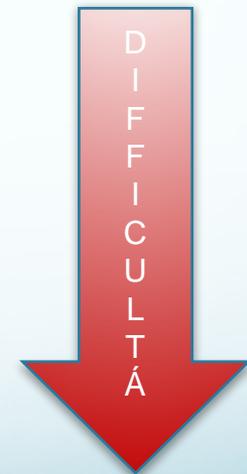
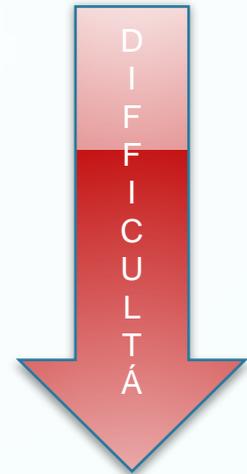
Fisica di ARCA/ORCA

- ARCA

- Misura di flussi visti con IceCube.
 - Misura più sensibile al piano galattico (verifica della presenza della componente galattica).
- Misure di flussi dal Piano/Centro della Galassia.
- Misure di flussi dagli sorgenti più promettenti.
 - Elevata sensibilità per le sorgenti galattiche. La soglia di energia è più bassa di IceCube.

- ORCA

- Misura di apparizione di ν tau.
- Misura della gerarchia di massa dei neutrini.
- Ricerca interazioni non-standard e neutrini sterili.
- Ricerca della materia oscura (dentro il Sole, GC).
- Misura di CP (fascio esterno).



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

ARCA

Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss

Flusso diffuso

IceCube ha scoperto l'esistenza di un flusso di neutrini cosmici. L'origine è sconosciuta.

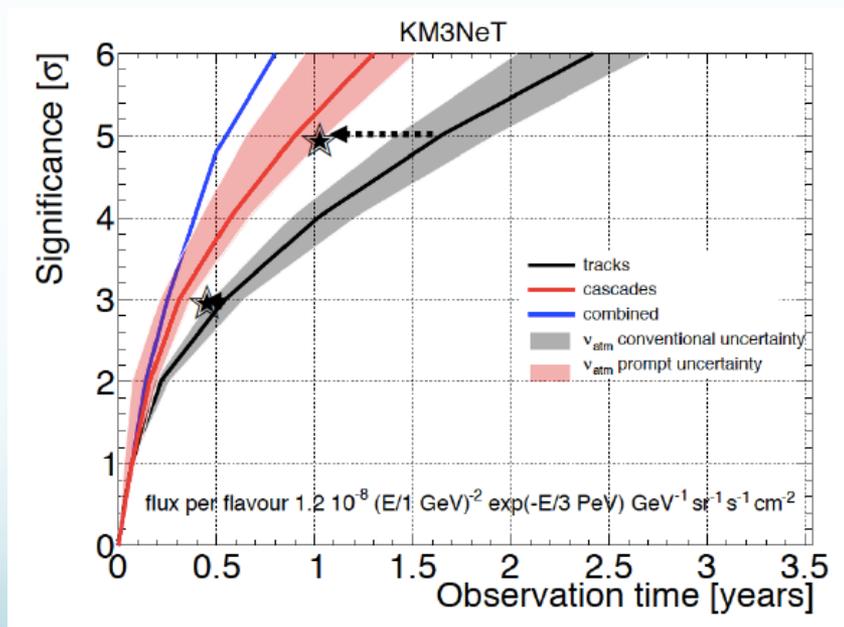
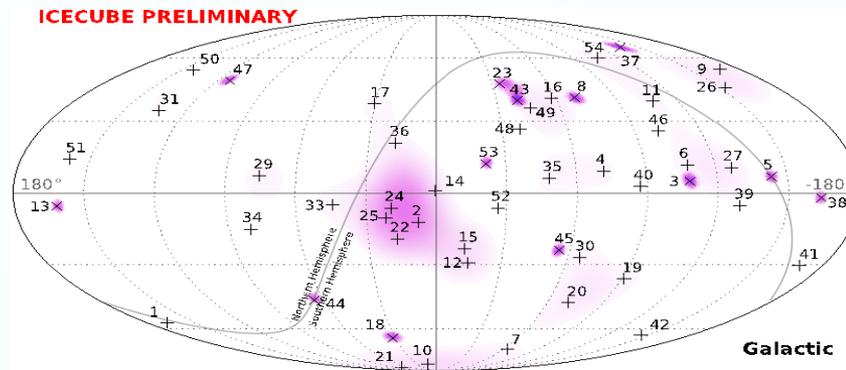
- **Canale tracce**

Analisi per eventi up-going, massimizzazione della verosimiglianza.

Preselezione $\theta_{zen} > 80^\circ$, qualità di ricostruzione e N_{hit} (proxy per l'energia di muone)

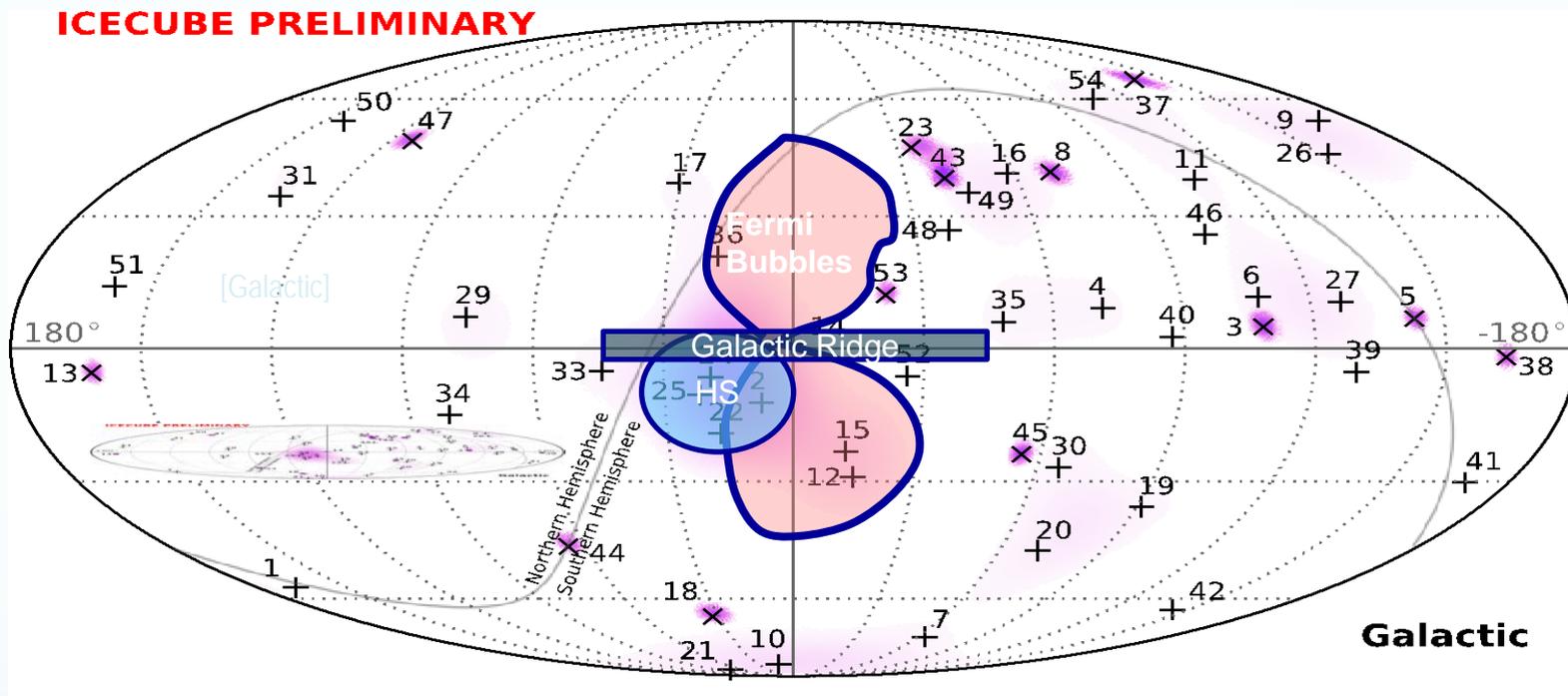
- **Canale sciame**

Eventi con il vertice contenuto dentro il rivelatore per filtrare i muoni atmosferici. Analisi basata su BDT e massimizzazione di verosimiglianza.



★ miglioramento con l'analisi multivariata

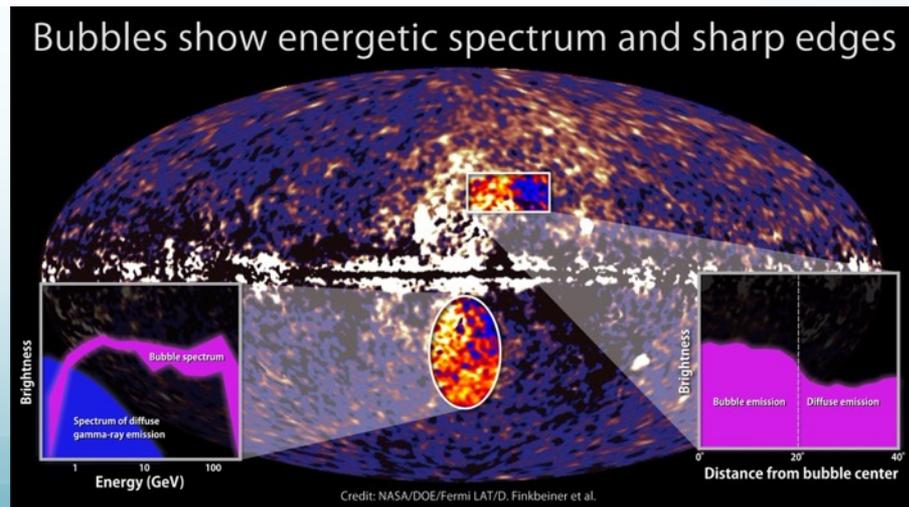
Regioni estese



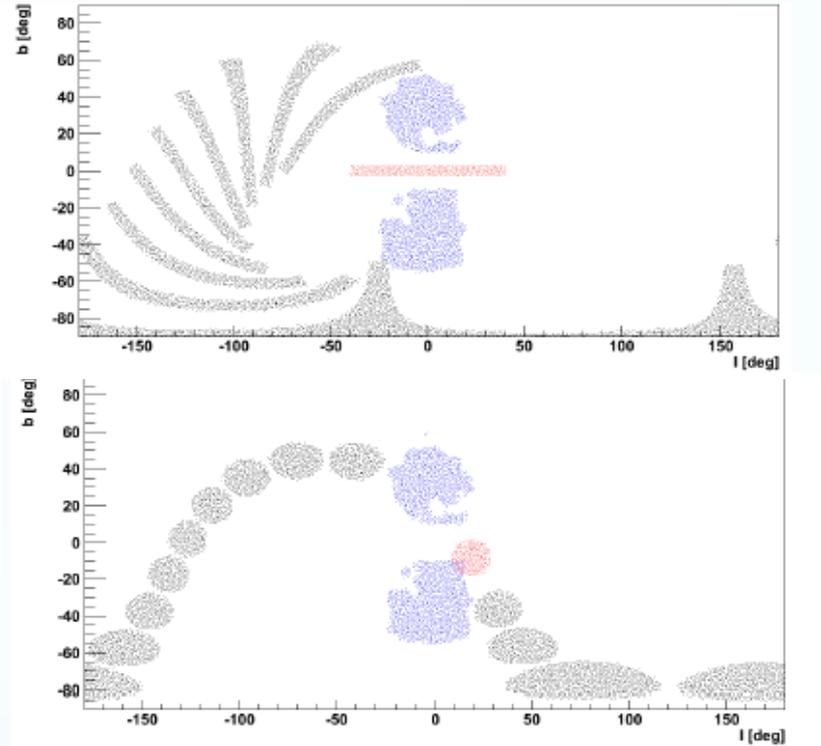
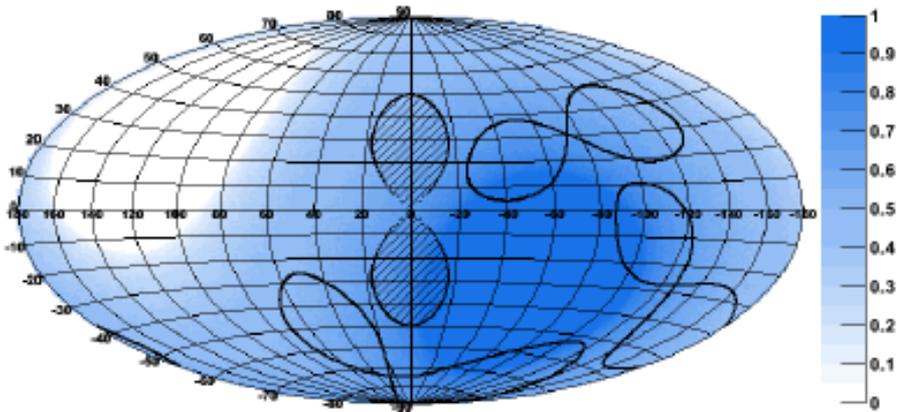
Regioni estese:

- Piano della galassia
- Fermi bubbles
- IceCube “Hot Spot”

V. Kulikovskiy, KM3NeT, INFN Genova



Regioni estese



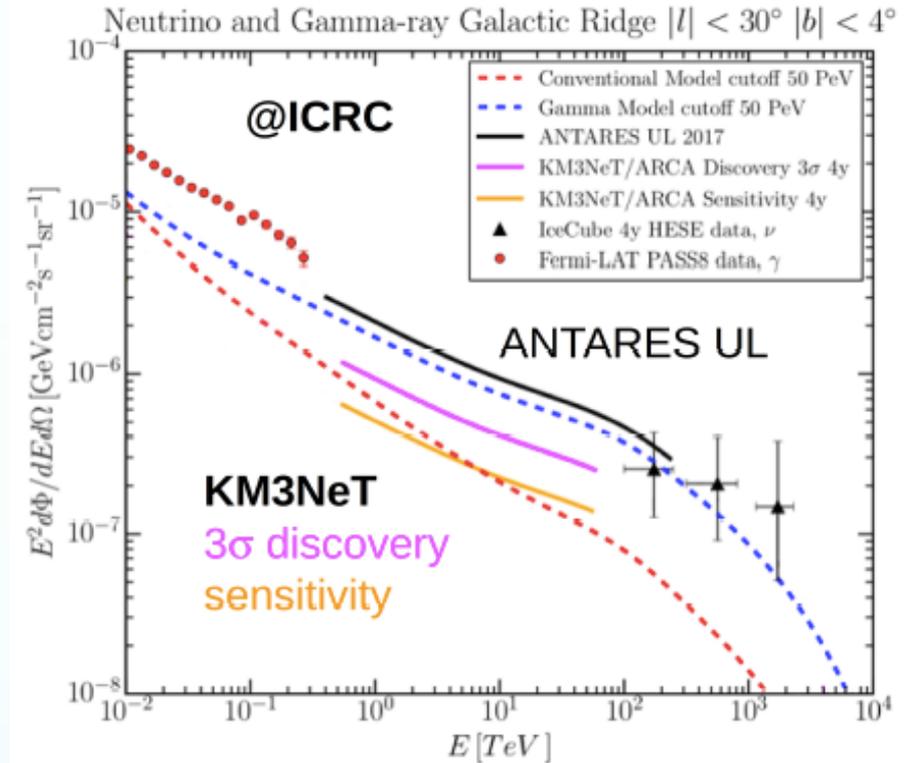
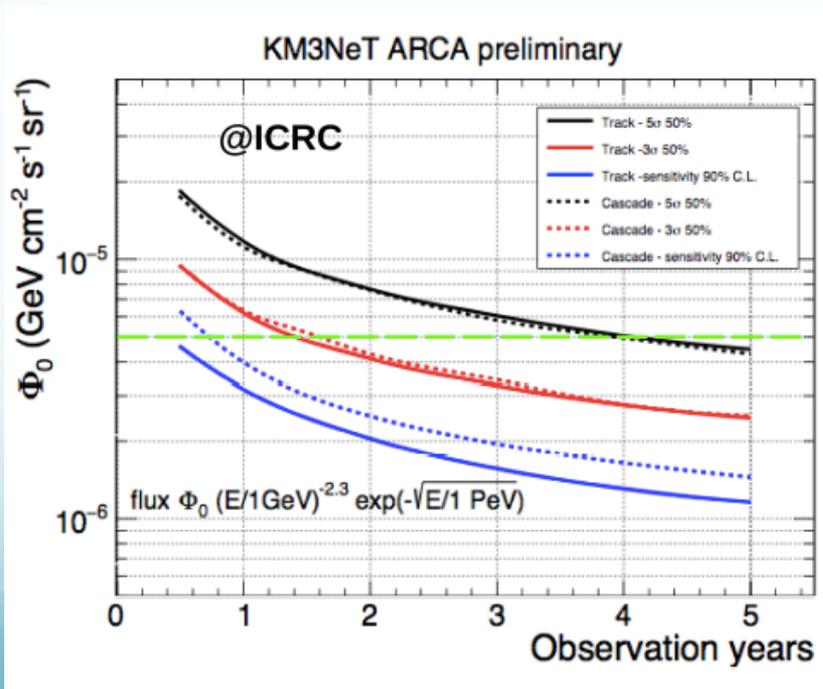
Le analisi sono più robuste rispetto a tutto il cielo: il fondo si misura nelle regioni OFF con la stessa efficienza locale.

📖 La prima realizzazione nella mia tesi V. Kulikovskiy, ISBN 978-3-319-20412

Il piano galattico

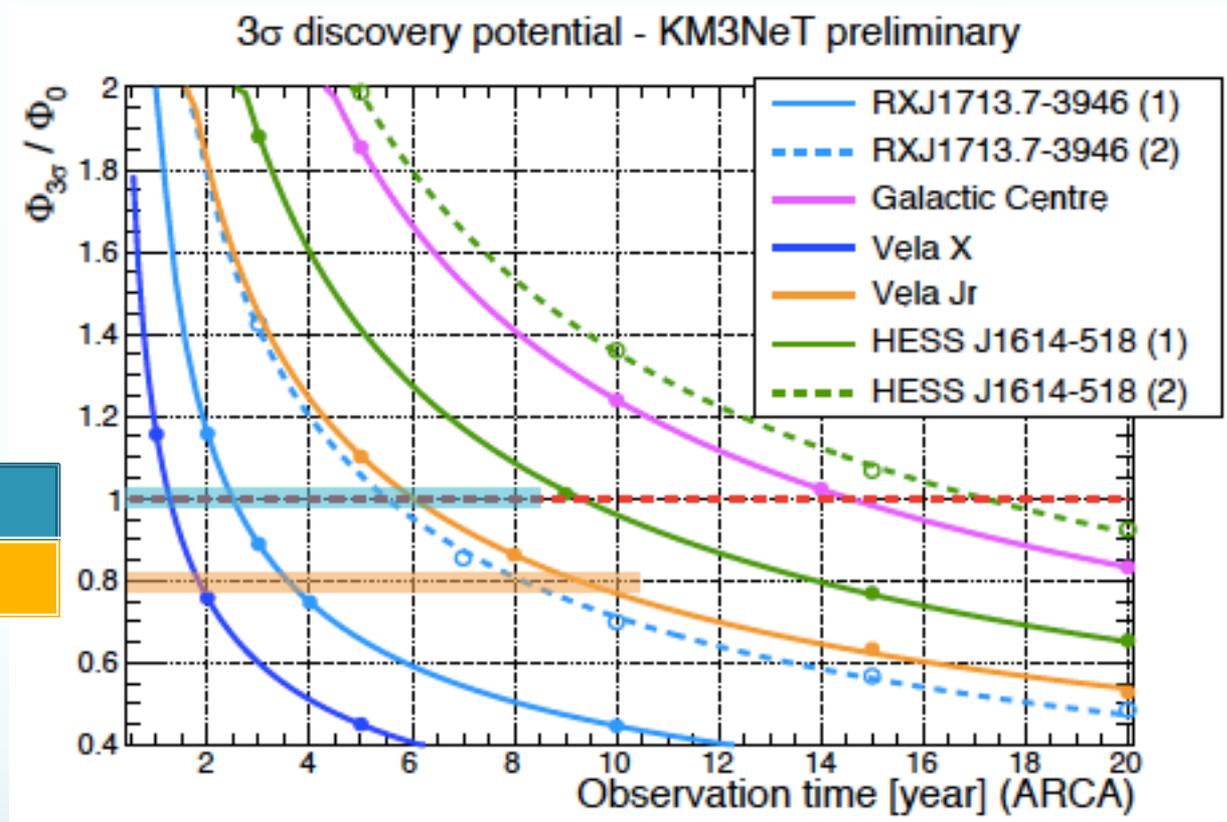
I limiti 2017 di ANTARES

Potenziale di scoperta
3 sigma e sensibilità per
ARCA (tracce) per 4 anni.



La prestazione dell'analisi con tracce e sciame sono simili per gli regioni estesi all'emisfero sud.

Point-like sources



100% hadronico

80% hadronico

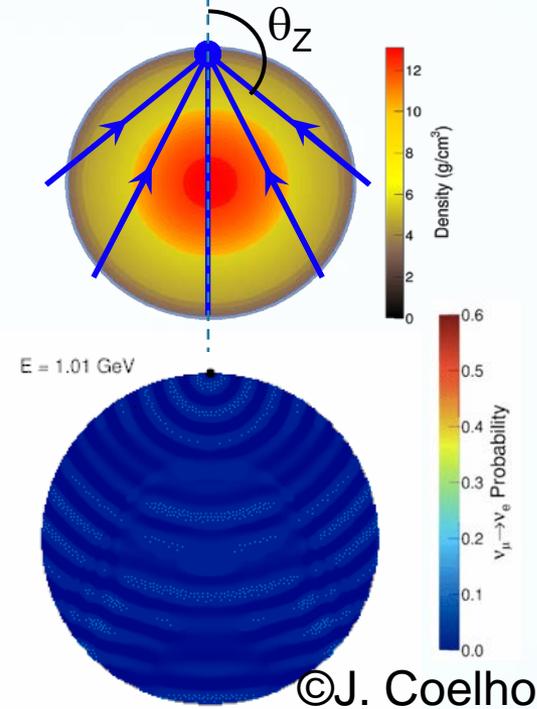
- Quasi tutte le promettenti sorgenti galattiche possono essere scoperte in pochi anni sono effettivamente acceleratori adronici.

ORCA

Oscillation Research with Cosmics in the Abyss

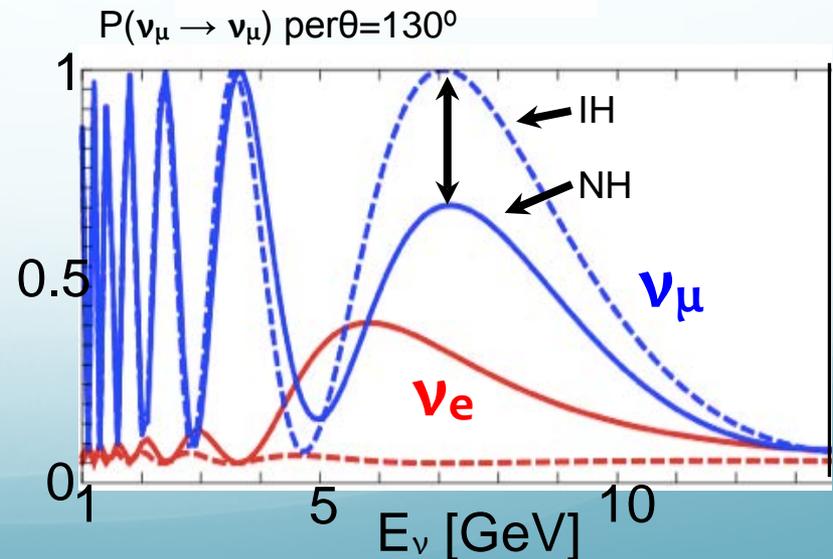
Misura della gerarchia di neutrini

- Un “fascio” gratuito di composizione nota (ν_e, ν_μ)
- Ampia scelta di baseline (50 \rightarrow 12800 km) e energie (GeV \rightarrow PeV)
- Oscillazioni alterate dalla materia (dipende dalla gerarchia):
 - Differenza massima IH vs NH a
 - $\theta=130^\circ$ (7645 km) e $E_\nu = 7$ GeV
- Effetto opposto sui anti- ν : IH(ν) \approx NH(anti- ν)
- MA ci sono differenze nei flussi e nelle sezioni d'urto:
 - $\Phi_{\text{atm}}(\nu) \approx 1.3 \times \Phi_{\text{atm}}(\text{anti-}\nu)$
 - $\sigma(\nu) \approx 2\sigma(\text{anti-}\nu)$ per basse energie



Procedimento di analisi:

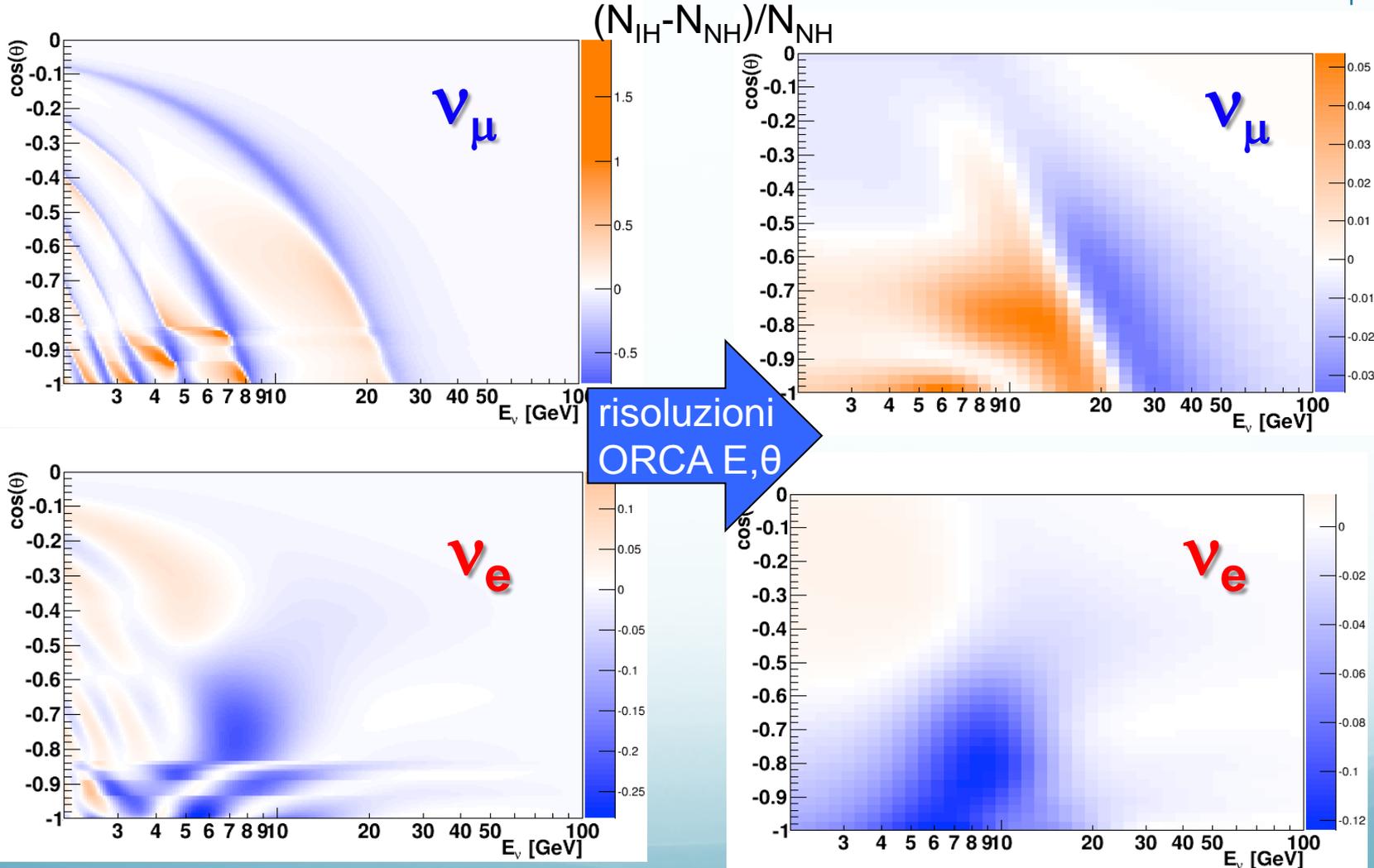
- Misura dell'angolo di zenit e l'energia dei neutrini atmosferici 1-20 GeV,
- Conteggio dei ν_e e ν_μ .
- Confronto con 2 ipotesi – NH e IH
- Stima dei sistematici.



Segno distintivo di NMH

La differenza tra le gerarchie si vede per ν_μ e ν_e .

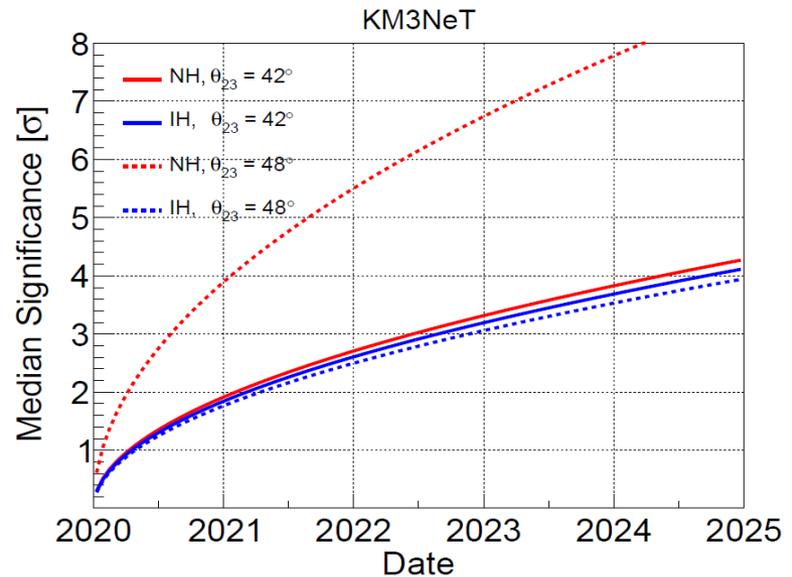
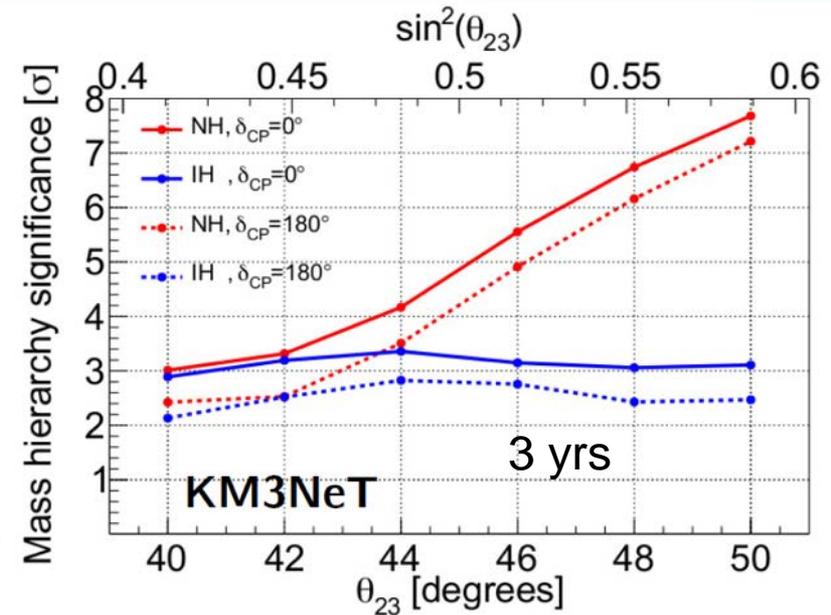
L'analisi per ν_e è più efficiente grazie alla risoluzione del rivelatore.



Sensibilità per la gerarchia

~3 σ in 3 anni

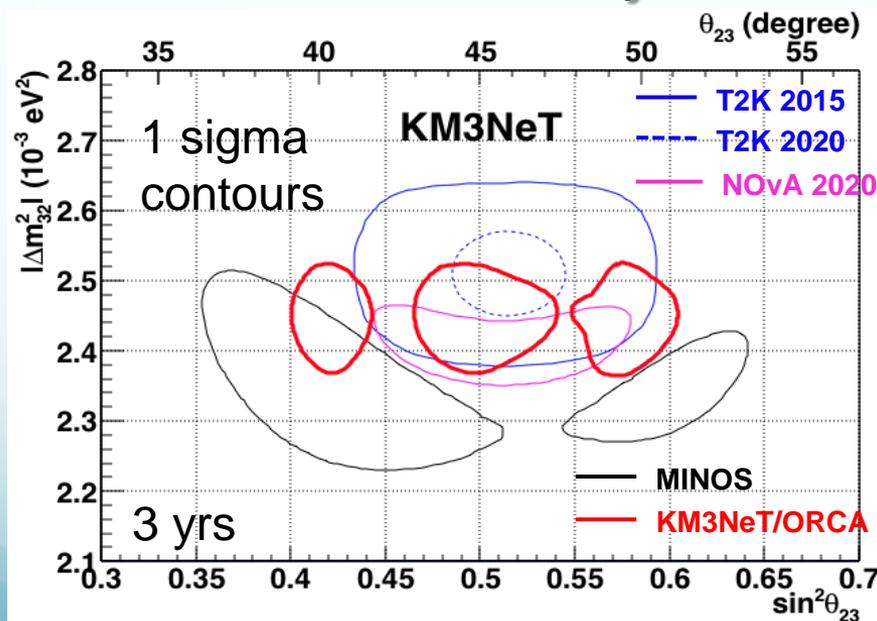
- Per **NH e l'ottante superiore** di θ_{23} sensibilità più alta (**5 σ in 3 anni**)
- Per IH, sensibilità quasi indipendente da θ_{23}
- Il valore di δ_{CP} ha un impatto piccolo ma significativo



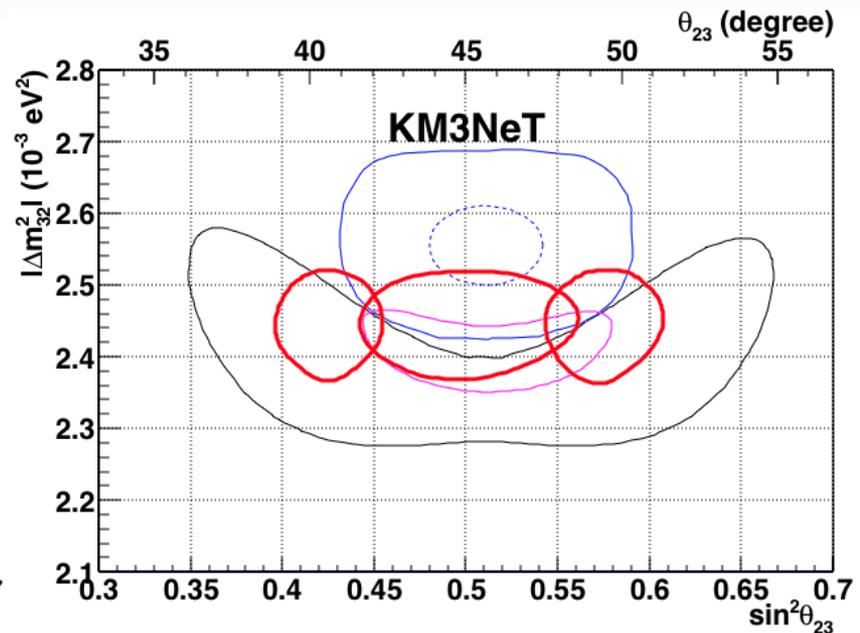
Misura di Δm^2_{32} e $\sin^2\theta_{23}$

- Alta statistica e ottima risoluzione
- 2-3% precisione per Δm^2_{32} e 4-10% per $\sin^2\theta_{23}$

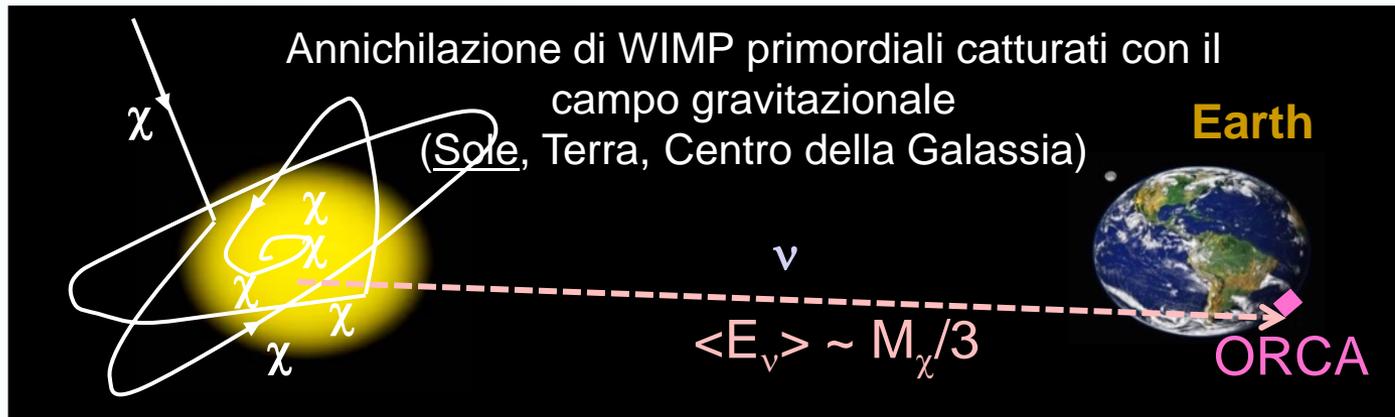
Normal Hierarchy



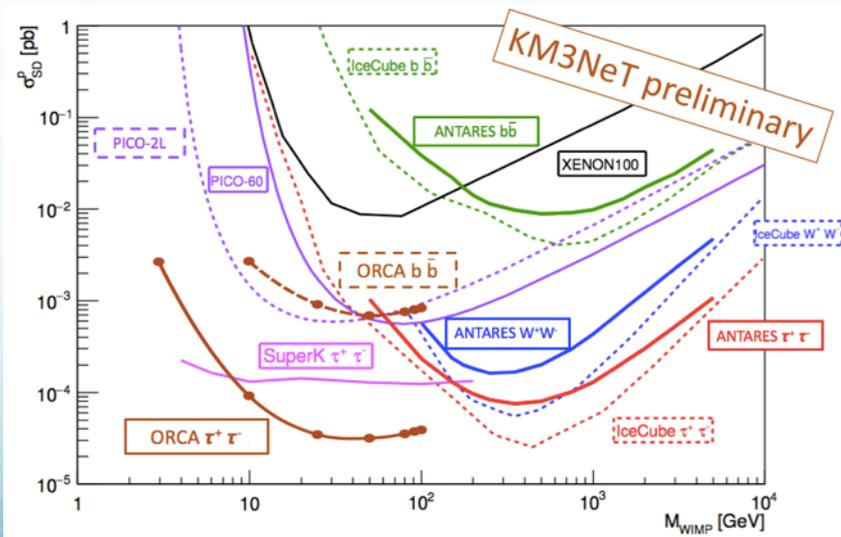
Inverted Hierarchy



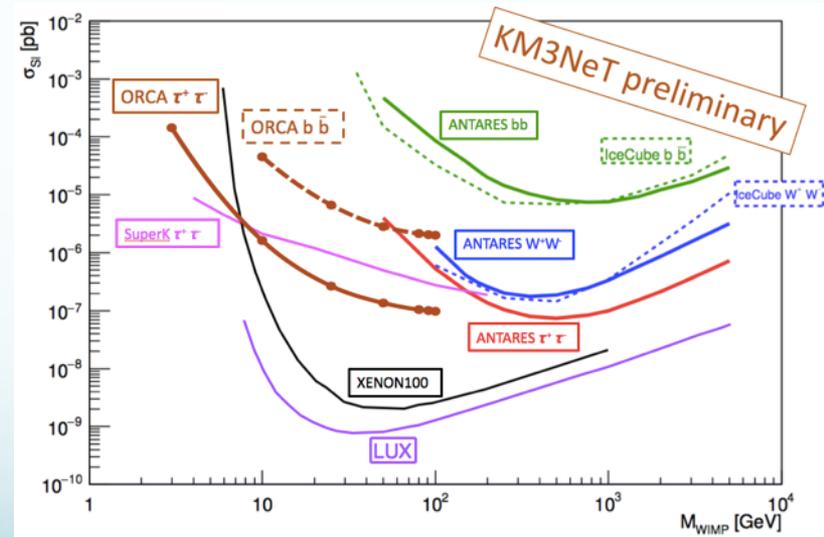
Rivelazione di materia oscura



Spin Dependent



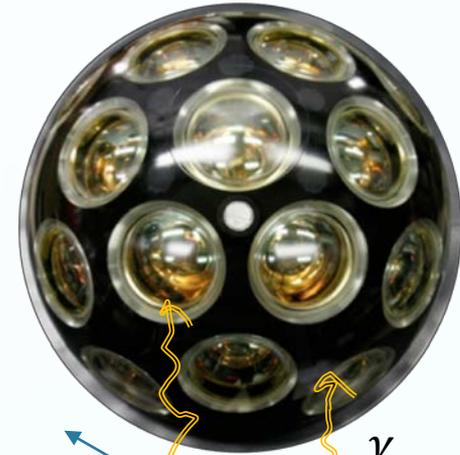
Spin Independent



ORCA 3 anni- tracce + sciame (made in Genova)

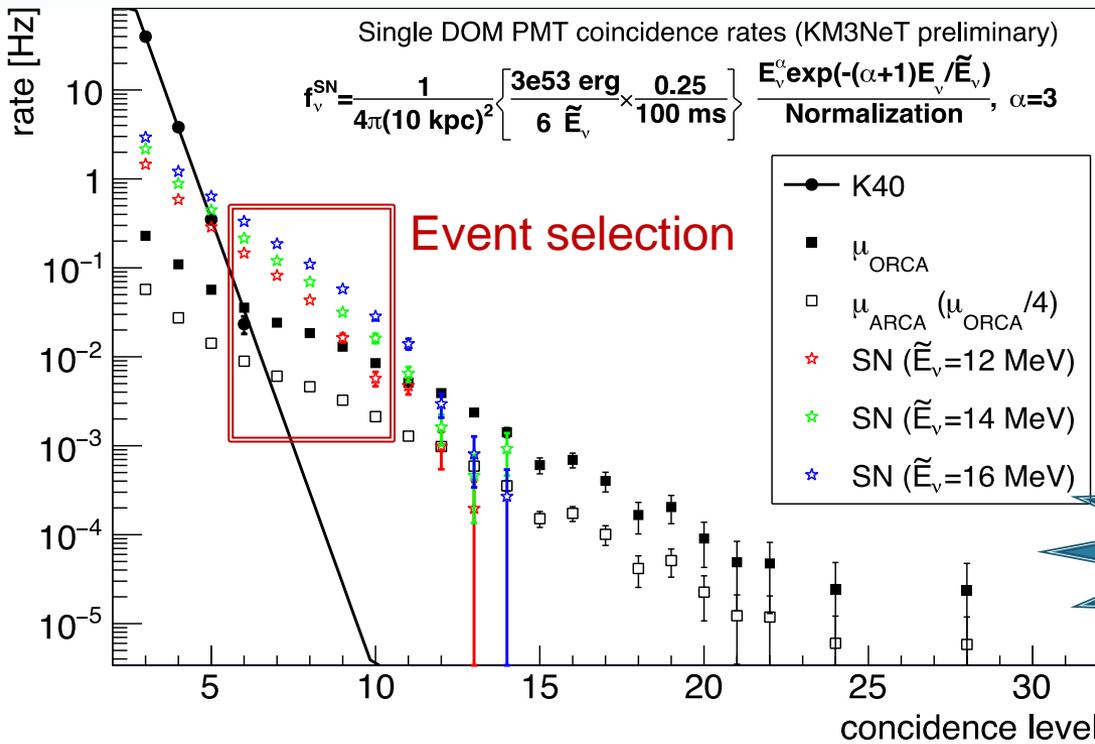
Rivelazione di supernove

- Le coincidenze doppie causate da ^{40}K (~ 1.3 MeV e^-) si usano in ANTARES e KM3NeT per calibrare i tempi dei PMT.
- e^+ dovuta a SN aumentano le coincidenze di ordine 6-10.



e^+ (~ 10 MeV)

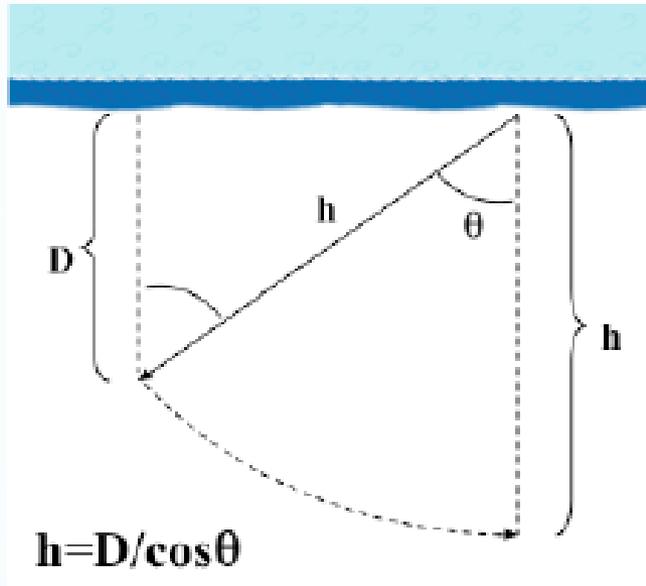
>80% of all Galactic SN with a single detector block!



Lo stato attuale di KM3NeT

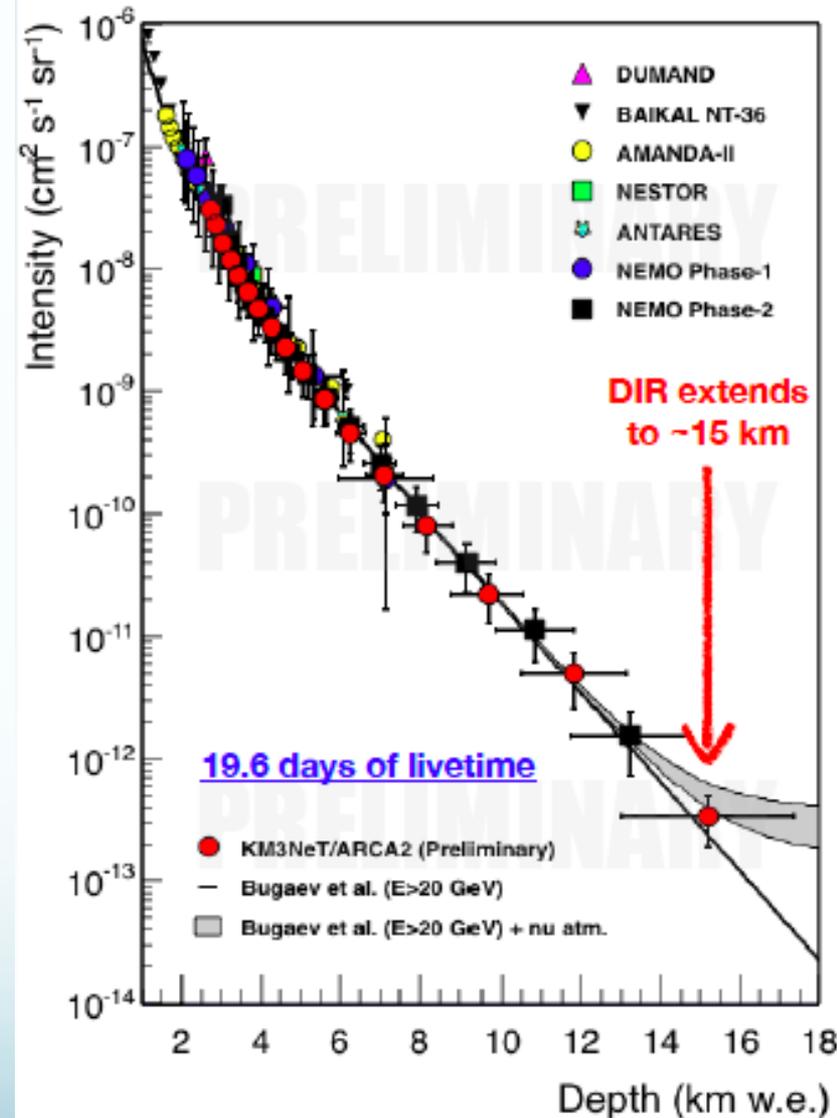
- 2 DU installate per ARCA. 1 DU installata per ORCA. La seconda verrà installata a fine anno.
 - Questi dati aiutano a migliorare il MC, studiare i fondi.
 - Miglioramento dei software e firmware per l'acquisizione di dati.
 - Miglioramenti nel design meccanico.
- Letter of Intent e nuove analisi:
 - Nuova ricostruzione delle tracce per ARCA
 - Studi per la rivelazione di SN (nuovo trigger per l'acquisizione dei dati).
 - Migliore muon veto.
 - Studi di sensibilità a un fascio esterno per ORCA.

ARCA2: Relazione profondità intensità



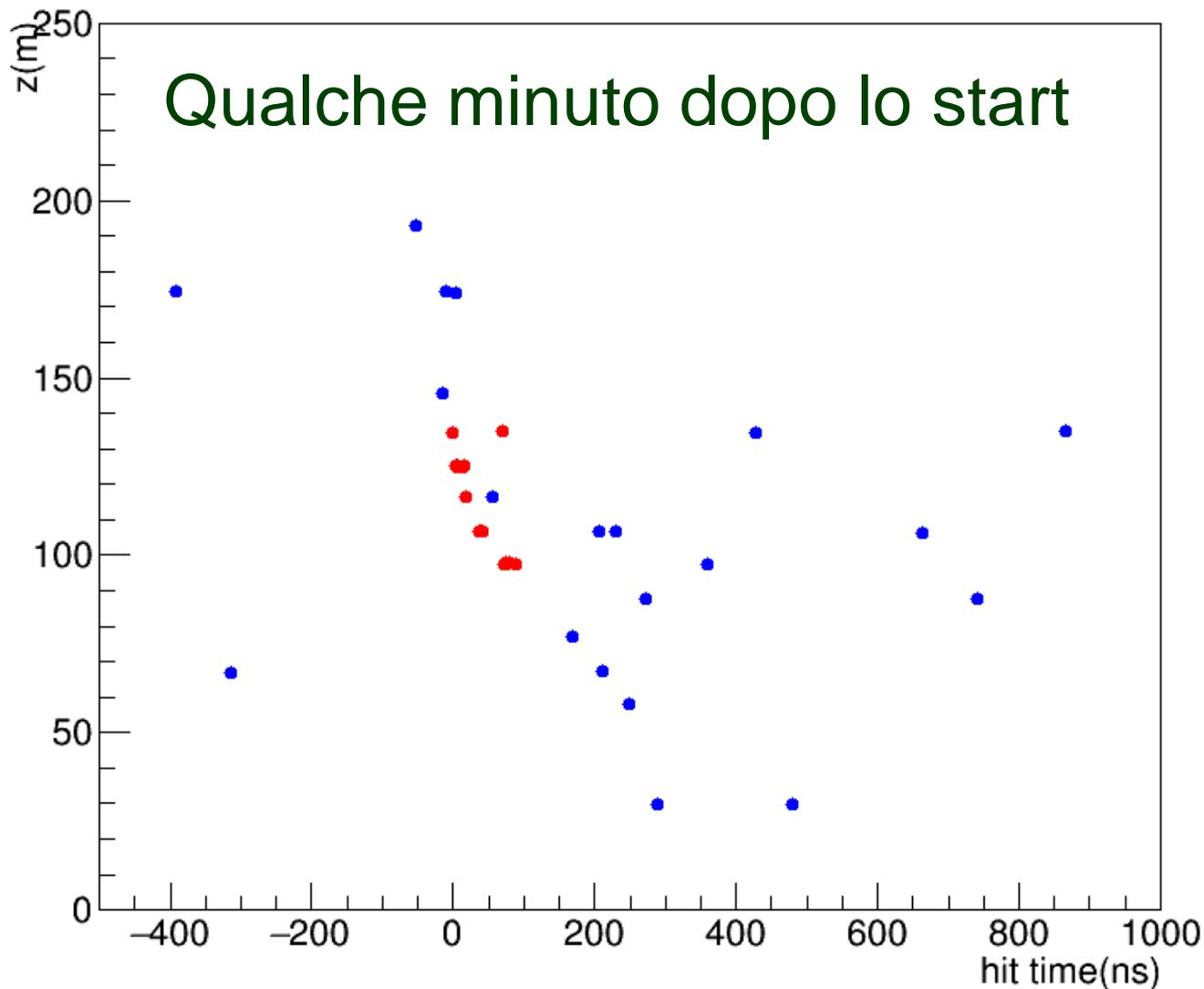
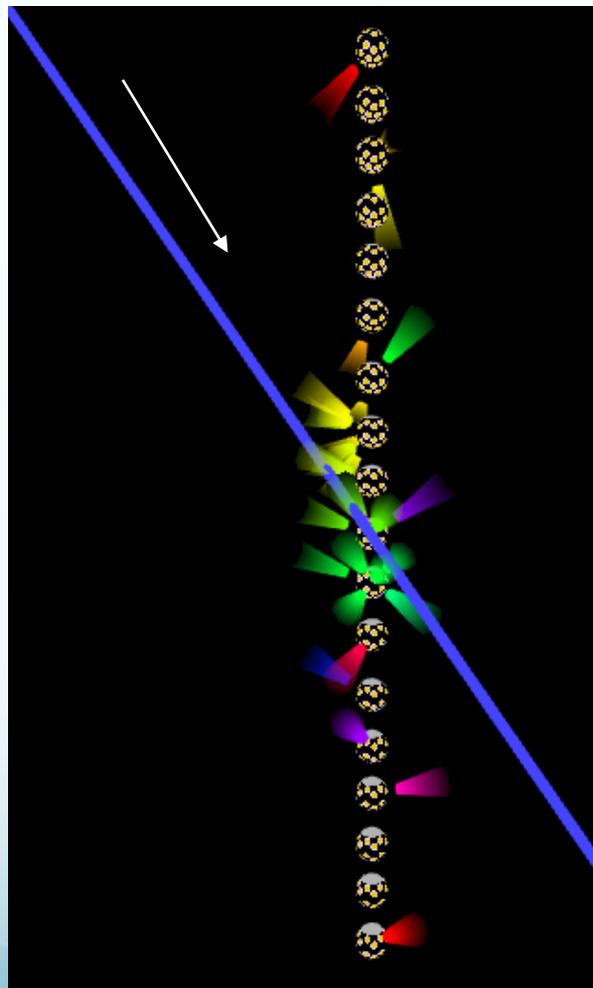
$$D = h \cdot \cos(\theta_\mu) \cdot c_{\text{corr}}(\theta_\mu)$$

$c_{\text{corr}}(\theta_\mu)$ correction factor
(curvature of Earth)



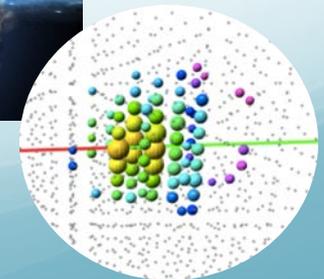
Il primo evento di ORCA con la traccia ricostruita

Evt: id=1 run_id=2280 #hits=83 #mc_hits=0 #trks=0 #mc_trks=0



Attività a Genova

- Coordinamento del progetto:
 - M. Taiuti – spokesperson,
 - M. Anghinolfi – ex-responsabile tecnico per il sito di ARCA,
 - V. Kulikovskiy – coordinatore per le simulazioni.
- Progettazione delle schede elettroniche per i DOM.
 - Organizzazione della produzione delle schede con EES (M. Cresta, P. Musico).
- Integrazione delle linee (M. Anghinolfi, V. Kulikovskiy, M. Cresta + un tecnico nuovo).
- Sensibilità per Blazar (M. Sanguineti, A. Domi, collaborazione con il gruppo teorico di Milano).
- Nuova ricostruzione degli sciami per ORCA (A. Domi).
- ...



Conclusione

- Osservare il cielo con sonde differenti (fotoni, onde gravitazionali, neutrini) è importante per cercare di comprendere sempre meglio il nostro Universo.
- I neutrini provenienti da sorgenti astrofisiche possono fornirci un'informazione unica sulla loro struttura interna.
- IceCube ha rivelato i neutrini cosmici di altissima energia ma per ora non ha individuato le sorgenti. Un telescopio nell'altro emisfero è più adatto per osservare le sorgenti Galattiche.
- ANTARES ha dimostrato che è possibile costruire un telescopio di neutrini sottomarino e tenerlo in funzione per 15 anni.
- Stiamo realizzando la costruzione di rivelatori di nuova generazione nel mare.

