

I raggi cosmici: neutrini

Parte 2

Corso di Introduzione all'astrofisica

Anno accademico 2019-2020

Barbara Caccianiga

Neutrini cosmici di altissima energia

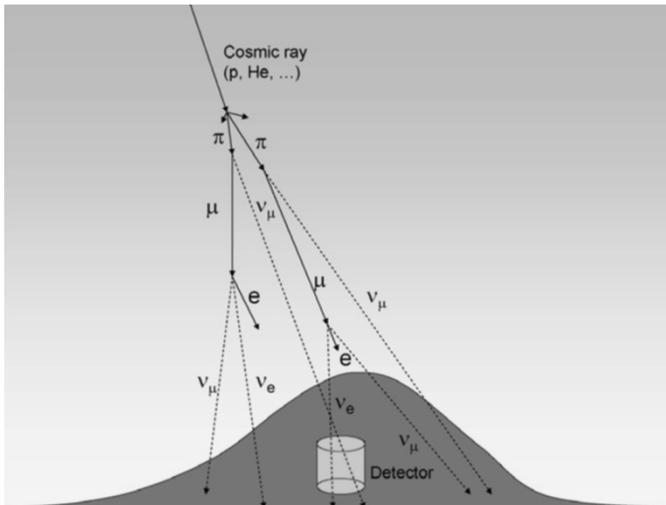
I neutrini cosmici di altissima energia ($E > 1 \text{ TeV}$): da dove vengono?

- **Neutrini atmosferici:**

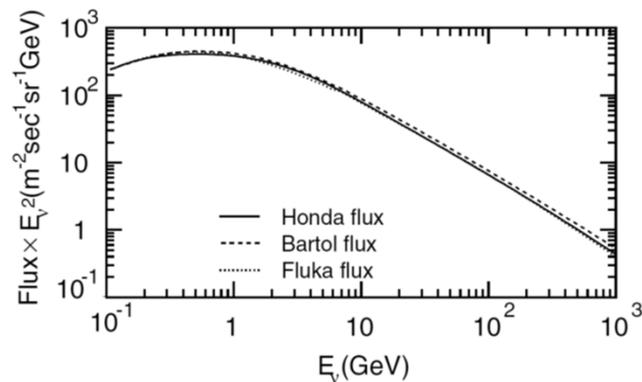
- sono parte degli sciami prodotti dai raggi cosmici primari che colpiscono l'atmosfera terrestre;
- hanno un'energia tipicamente di $\sim 0.1 \text{ GeV}$ ($\Phi \sim 1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$),
- lo spettro si estende anche oltre $1 \text{ TeV} \sim E^{-3.7}$;
- costituiscono un fondo per gli esperimenti che descriverò nel seguito;
- osservati dall'esperimento SuperK, hanno permesso di dare la prima evidenza di oscillazioni di neutrino;

Il problema dei neutrini atmosferici e la scoperta delle oscillazioni

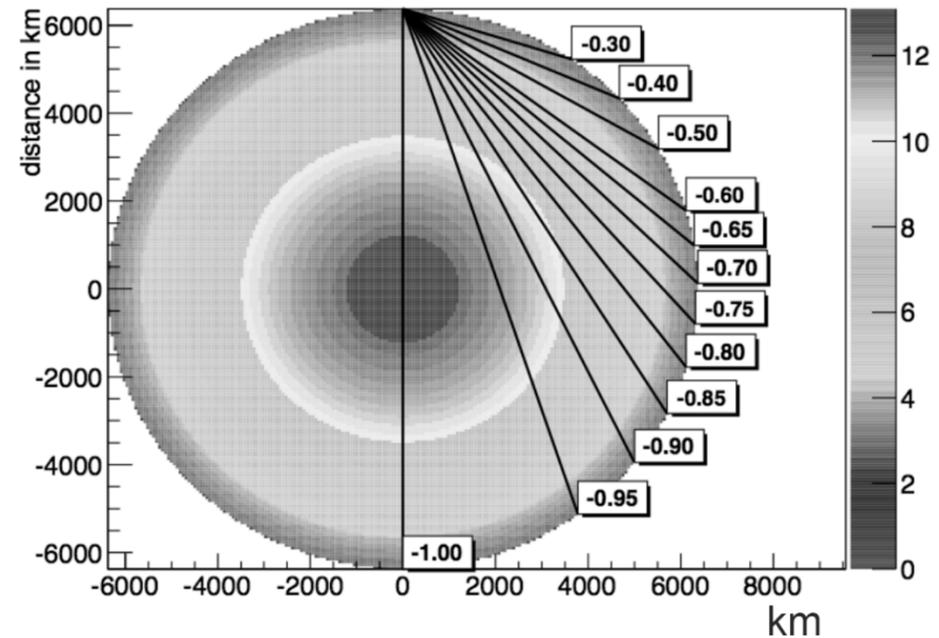
Prodotti secondari dei raggi cosmici nell'atmosfera: ν_e , anti- ν_e , ν_μ , anti- ν_μ ;



Average energy ~ 1 GeV



BASELINE L

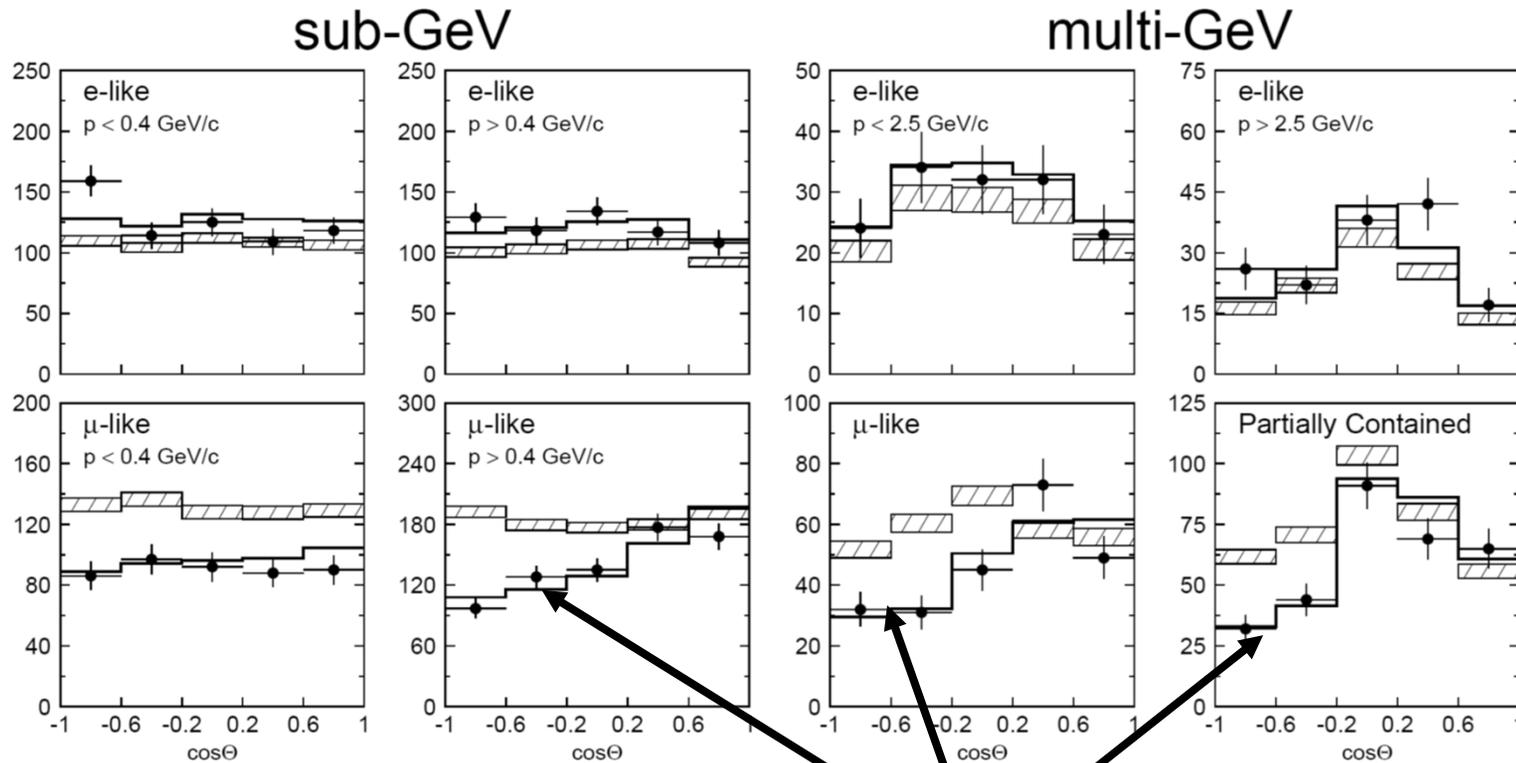


selezionare θ e' equivalente a selezionare L

$E \sim 1$ GeV
 $L \sim 10^4 - 10^7$ m

Il problema dei neutrini atmosferici e la scoperta delle oscillazioni

Anomalia nei risultati di Kamiokande che studiava i neutrino atmosferici in quanto fondo per la ricerca del decadimento del protone



Deficit di ν_μ provenienti dal basso

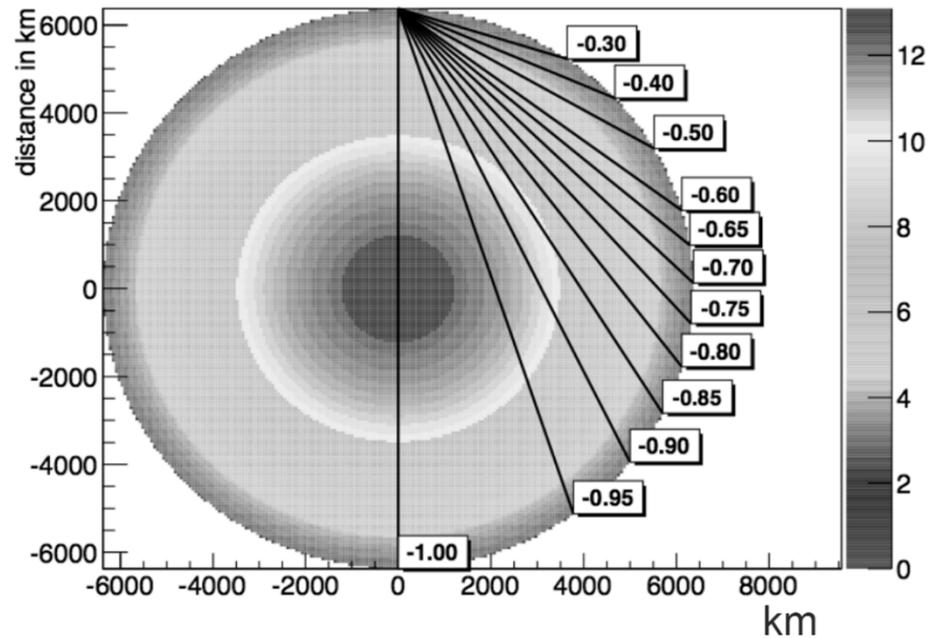
Il problema dei neutrini atmosferici e la scoperta delle oscillazioni

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\pi L}{L_{\text{osc}}}$$

dove $L_{\text{osc}} = 2.48 \left(\frac{E}{\text{MeV}} \right) \left(\frac{\text{eV}^2}{\Delta m^2} \right)$

Se consideriamo
 $E \sim 1 \text{ GeV}$
 $\Delta m^2 \sim 3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

$$L_{\text{osc}} \sim 10^6 \text{ m}$$



La prima evidenza di oscillazioni di neutrino viene da qui!

Il premio Nobel del 2015 è per metà assegnato a SuperKamiokande per la scoperta delle oscillazioni nei neutrini atmosferici e per metà a SNO per la scoperta delle oscillazioni dei neutrino solari.

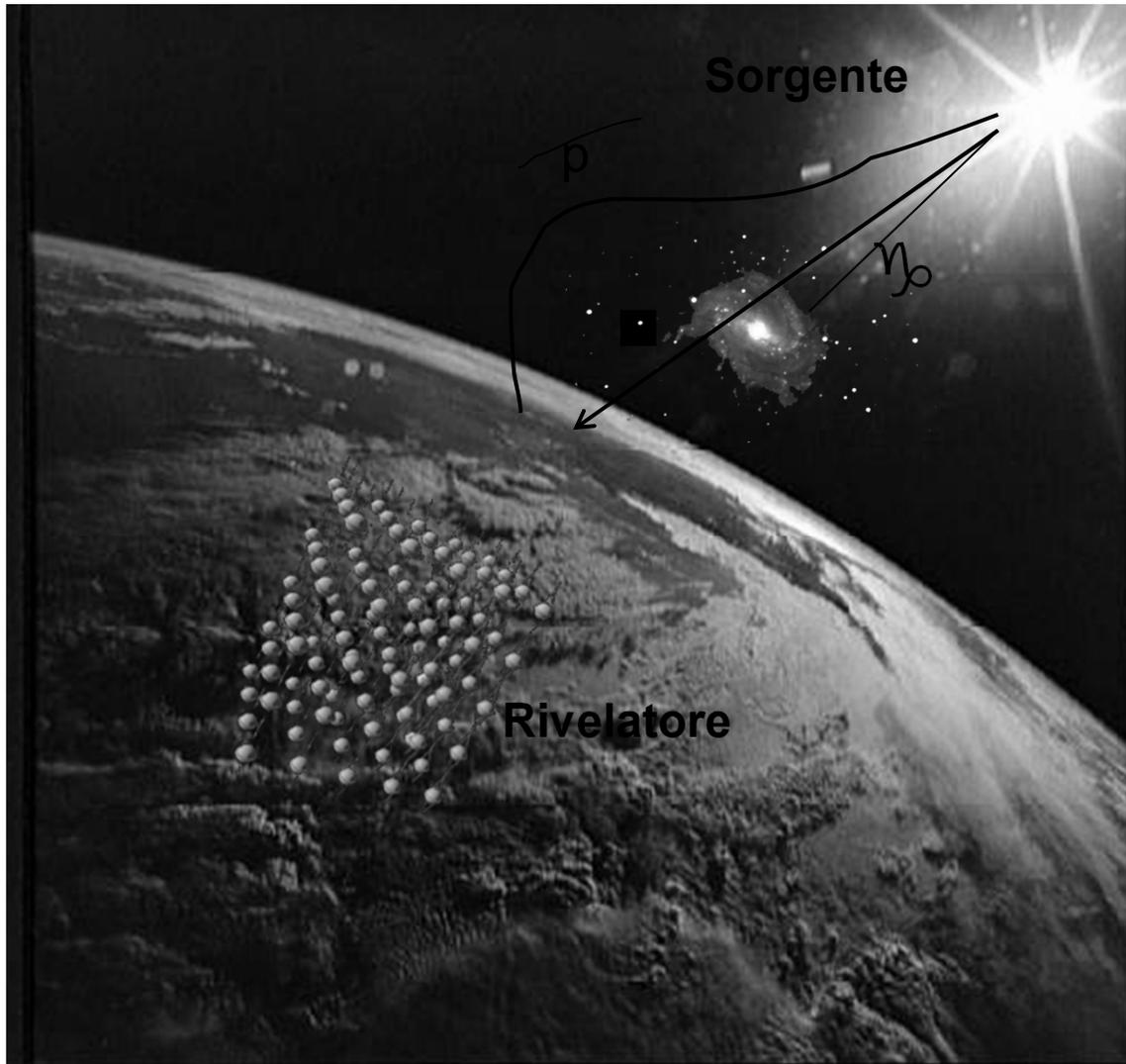
I neutrini cosmici di altissima energia ($E > 1 \text{ TeV}$): da dove vengono?

- **Neutrini atmosferici:**
 - sono parte degli sciami prodotti dai raggi cosmici primari che colpiscono l'atmosfera terrestre;
 - hanno un'energia tipicamente di $\sim 0.1 \text{ GeV}$ ($\Phi \sim 1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$),
 - lo spettro si estende anche oltre $1 \text{ TeV} \sim E^{-3.7}$;
 - costituiscono un fondo per gli esperimenti che descriverò nel seguito;
 - osservati dall'esperimento SuperK, hanno permesso di dare la prima evidenza di oscillazioni di neutrino;
- **Interazione dei raggi cosmici con gas interstellari della nostra galassia:**
 - Provengono prevalentemente dal piano della galassia;
- **Interazione dei raggi cosmici extra-galattici con la radiazione di fondo a micro-onde;**
 - Hanno origine diffusa;
 - Potrebbero raggiungere anche $E \sim 10^{18} \text{ eV}$;
- **Annichilazione di WIMPs nella galassia o nel sole:**
 - Come abbiamo visto, l'annichilazione di neutralini che si accumulano all'interno del sole o al centro della galassia possono portare all'emissione di neutrini di alta energia;

I neutrini cosmici di altissima energia ($E > 1 \text{ TeV}$): da dove vengono (2) ?

- **Annichilazione di particelle esotiche:**
 - L'annichilazione di particelle esotiche come difetti topologici o particelle supersimmetriche supermassive possono produrre neutrini di altissima energia (come abbiamo visto nei modelli top-down per spiegare i raggi cosmici al di sopra del GZK cutoff);
- **Gamma Ray Burst:**
 - Il modello “fireball” che descrive l'emissione γ nei GRB prevede anche l'emissione di neutrini tramite la reazione $p + \gamma \rightarrow \pi^\pm + X$ dove π^\pm decade producendo neutrini;
 - L'energia dei neutrini potrebbe raggiungere $\sim 100 \text{ TeV}$ e oltre;
- **AGN:**
 - i modelli che li descrivono prevedono che i Nuclei Galattici Attivi oltre che essere sorgenti di γ e raggi cosmici di alta energia emettano anche neutrini di alta energia;
 - I neutrini possono raggiungere la terra da distanze molto maggiori rispetto a γ e raggi cosmici, dandoci preziose informazioni su AGN piu' lontani;

I neutrini cosmici di altissima energia ($E > 1 \text{ TeV}$): da dove vengono (3) ?



Produzione

- $p + \gamma \rightarrow \pi^\pm + X$
- $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$;
- $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e$;

Propagazione

- fotoni: possono essere assorbiti dal mezzo;
- protoni: vengono deviati dai campi magnetici;
- fotoni e protoni: interagiscono con CMB

Solo i neutrini viaggiano pressocche' indisturbati!

Come si rivelano i neutrini di altissima energia?

- In tutti gli esperimenti che descrivero' si sfrutta la reazione:



- Dove viene rivelato il muone uscente;
- La sezione d'urto per alte energie del neutrino e' $\sigma \sim 10^{-38} \text{ cm}^2$;
- La direzione del muone uscente e' tanto piu' vicina a quella del neutrino entrante quanto piu' alta e' la sua energia;

- Per le energie che stiamo considerando possiamo assumere che il muone sia collimato con il neutrino padre;

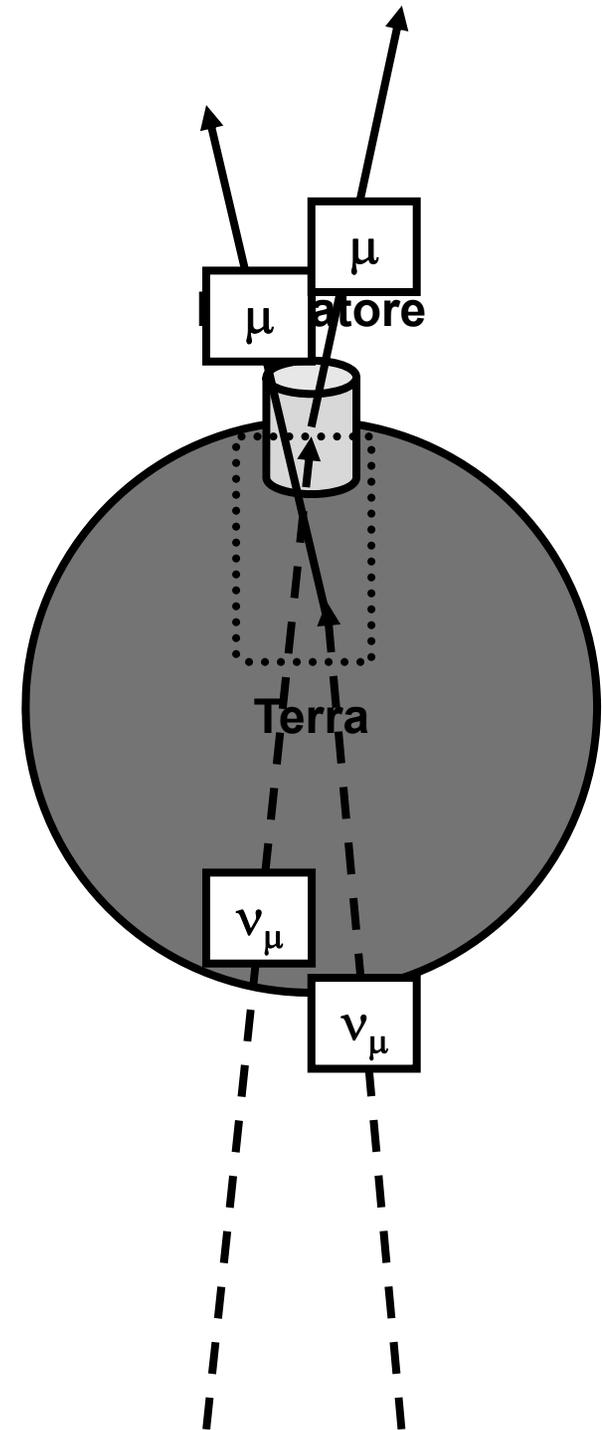
$$\theta_{\mu} = \frac{1.5^{\circ}}{\sqrt{E_{\mu} (\text{TeV})}}$$

- La direzione del muone punta quindi verso la sorgente che ha prodotto il neutrino;
- Notiamo inoltre che il muone prodotto ha tipicamente energie elevate ($\sim 1 \text{ TeV}$) e quindi puo' percorrere $\sim \text{Km}$ prima di fermarsi;

- Per esempio in acqua si ha che:

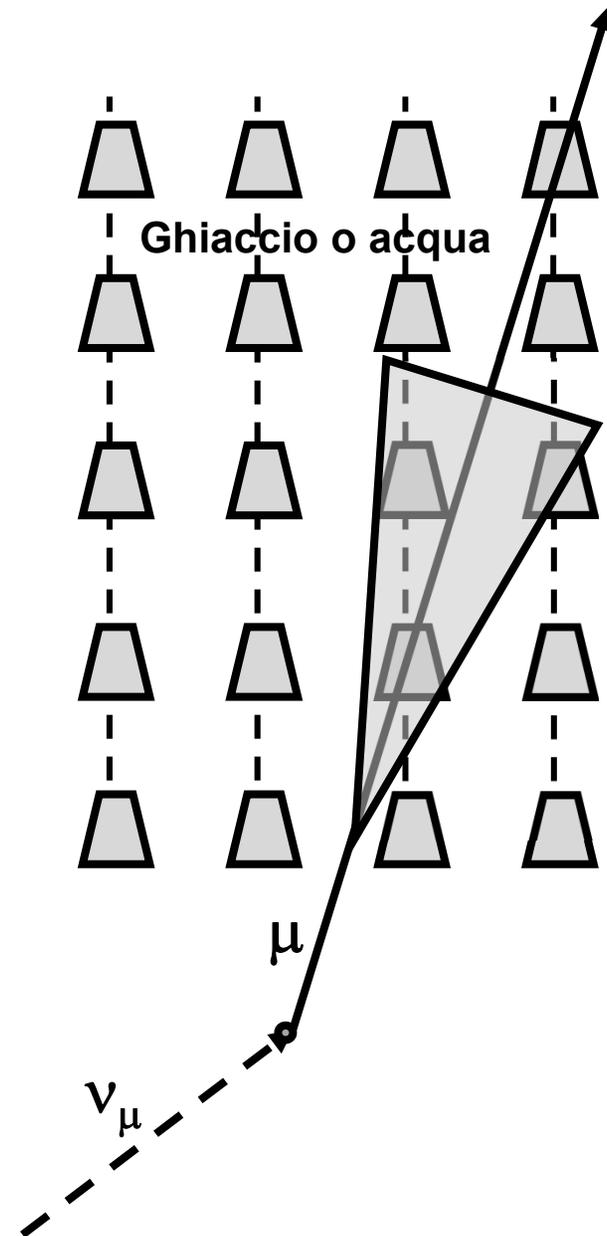
$$R_{\mu} = 2.5 \ln \left(2 \cdot \frac{E_{\mu}}{1 \text{ TeV}} + 1 \right) \text{ Km}$$

- Come al solito stiamo parlando di eventi rari → bisogna avere rivelatori con massa grande;
- N.B.: il muone uscente ha un range grande ~ Km quindi una volta prodotto percorre molta strada;
- Consideriamo il caso in cui un muone viene prodotto fuori dal rivelatore, e lo raggiunge successivamente venendo rivelato: lo scopo è raggiunto ugualmente;
- Possiamo quindi considerare una specie di volume efficace di rivelazione (le cui dimensioni dipendono dal range del muone) che non coincide con il rivelatore stesso, ma è più grande;
- È un po' come se si usasse una porzione della terra stessa (o del mezzo in cui è immerso il rivelatore, per esempio il mare) come “convertitore” di neutrini in muoni;
- Notiamo inoltre che gli eventi indotti da neutrini di più alta energia sono quelli a cui corrisponde un volume efficace maggiore;



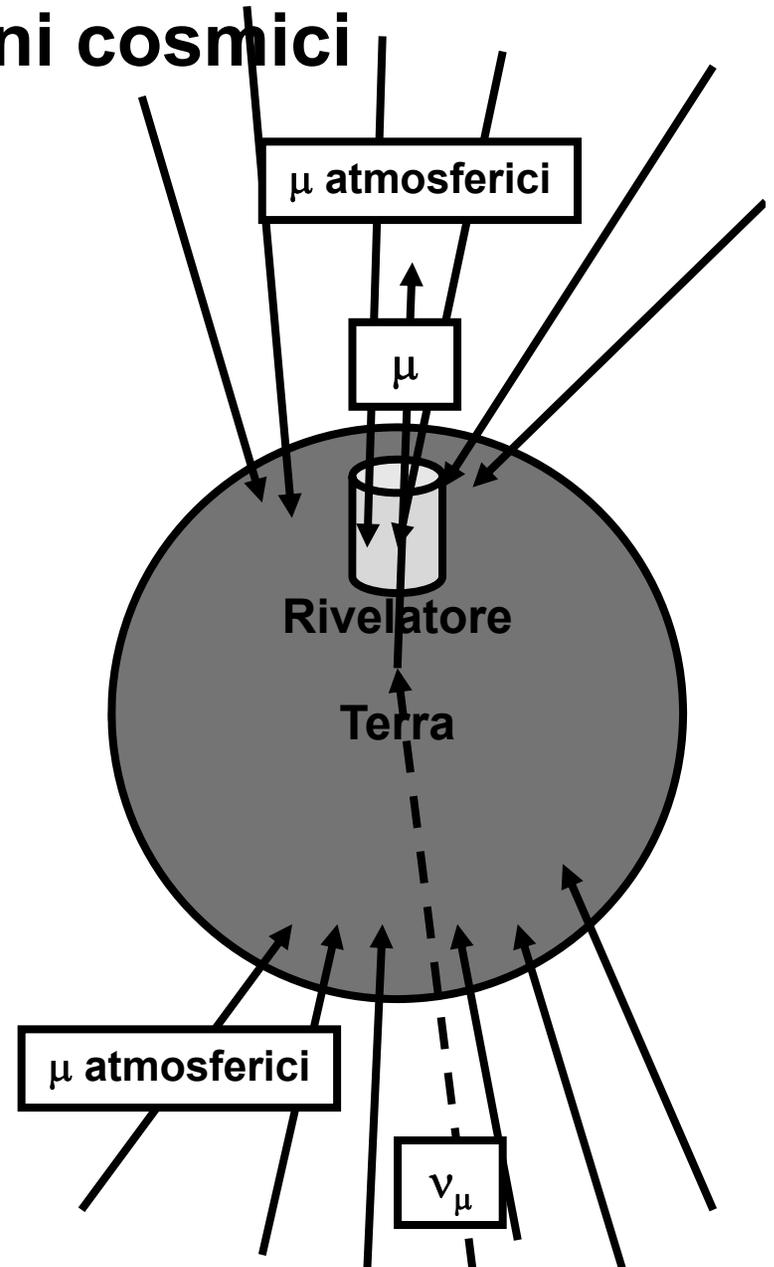
Come si rivelano i neutrini di altissima energia?

- Per aumentare la probabilita' di interazione del neutrino, si sfrutta il mezzo circostante al rivelatore propriamente detto;
- I muoni prodotti dall'interazione del neutrino vengono rivelati grazie alla luce Cerenkov prodotta quando attraversano il rivelatore;
- L'idea e' di immergere stringhe di fototubi nell'acqua (mare o lago) o di incastonarle nel ghiaccio per rivelare la luce Cerenkov emessa dai muoni;
- La direzionalita' della luce Cerenkov permette di avere informazione sulla direzione del muone e quindi del neutrino;
- Sono inoltre in grado di capire se il μ sta andando verso il basso o verso l'alto dal t di arrivo della luce ai PMT;



Il fondo dovuto ai muoni cosmici

- Il fondo piu' fastidioso per questo tipo di rivelatori sono i muoni atmosferici, quelli cioe' generati da raggi cosmici primari nell'atmosfera;
- Il flusso dei muoni atmosferici sulla superficie terrestre e' di $\sim 6 \times 10^5 \mu/h/m^2$ quindi sicuramente soverchiante sul segnale;
- I muoni atmosferici che arrivano al rivelatore saranno per la maggior parte diretti dall'alto verso il basso, poiche' il flusso di muoni proveniente dagli antipodi e' schermato dalla terra intera!
- Quindi se guardo esclusivamente i muoni che vanno dal basso verso l'alto, riduco praticamente a zero il contributo dei muoni atmosferici;



I grandi rivelatori in acqua e ghiaccio: parametri costruttivi importanti

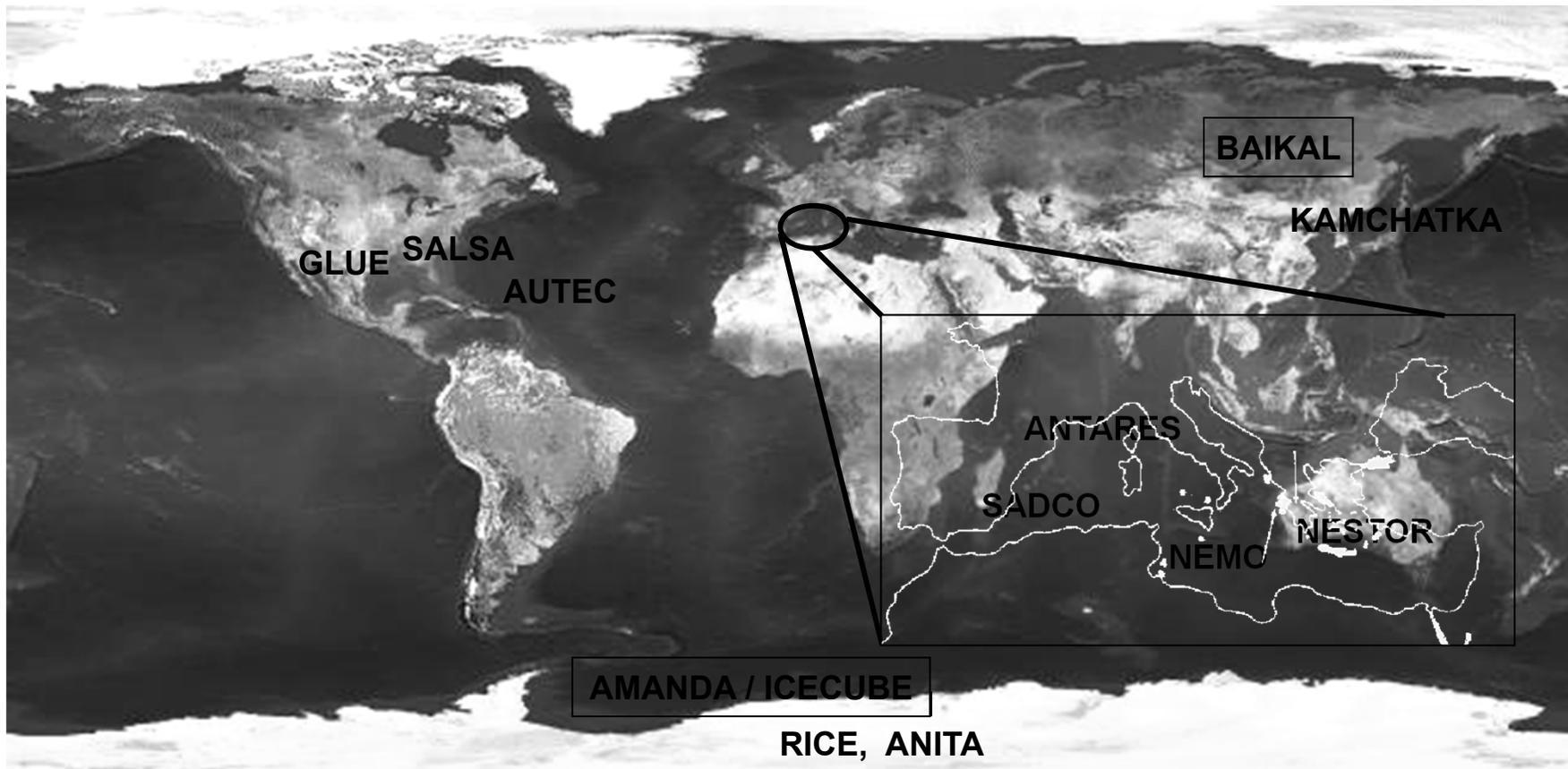
- **Stiamo parlando di rivelatori di grandi proporzioni: ciascuna stringa di fototubi puo' raggiungere, a seconda del progetto, anche 1 Km di lunghezza!**
- **Due parametri sono fondamentali per la riuscita di un esperimento di questo tipo:**
 - **Lunghezza di attenuazione della luce nel mezzo (L_{att})** : indica la trasparenza del mezzo alla luce Cerenkov emessa; e' un parametro cruciale per stabilire la granularita' del rivelatore, ovvero quanto ravvicinati devono essere i fototubi;
 - **Lunghezza di scattering della luce nel mezzo (L_{scatt})** : indica la probabilita' che la luce venga diffusa dal mezzo; e' un parametro cruciale per la bonta' di ricostruzione della direzione della traccia del muone;

• **Notiamo che il ghiaccio e' molto buono da un punto di vista della trasparenza;**

• **L'acqua di mare e' invece eccellente per quanto riguarda lo scattering della luce;**

	L_{att}	L_{scatt}
Ghiaccio (Amanda, IceCube)	110m (@400nm)	20m (@400nm)
Acqua (lago) (Baikal)	25m (@480nm)	60m (@480nm)
Acqua (Mediterraneo) (Nestor, Nemo, Antares)	~60m (@470nm)	100-300m (@470nm)

Esperimenti presenti e futuri per la rivelazione di neutrini di altissima energia

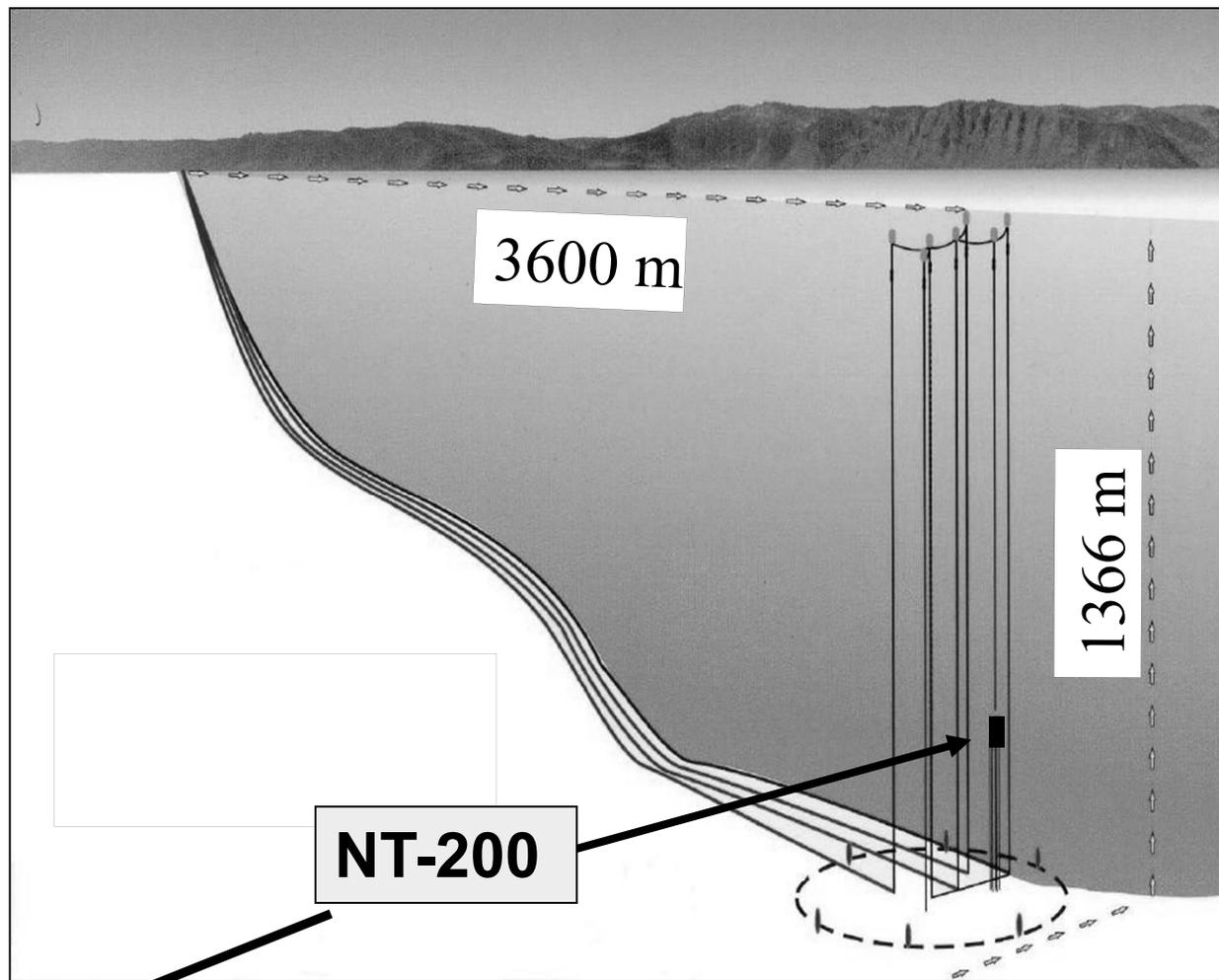
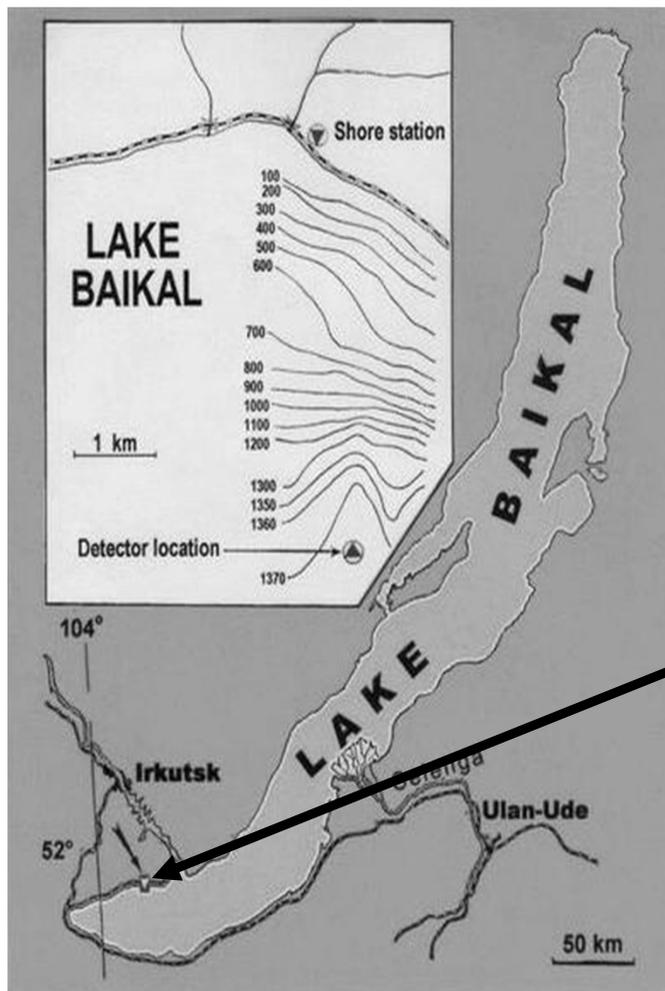


CERENKOV
RADIO
ACUSTICI



Solo per energie estremamente elevate ($E > 10^{18}$ eV)

L'esperimento nel lago Baikal (Siberia)



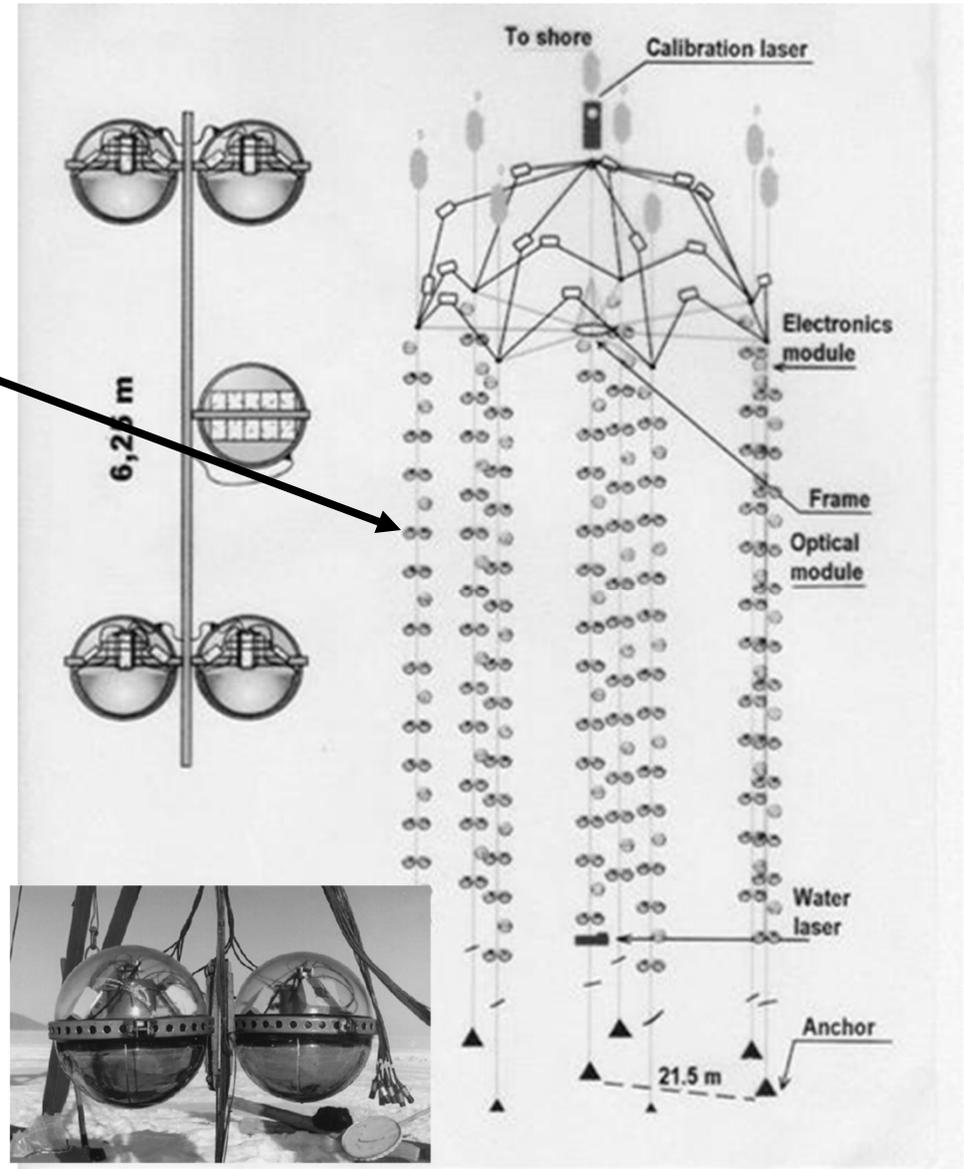
- L'istallazione e' avvenuta quando il lago era ghiacciato;

<http://www-zeuthen.desy.de/baikal/baikalhome.html>

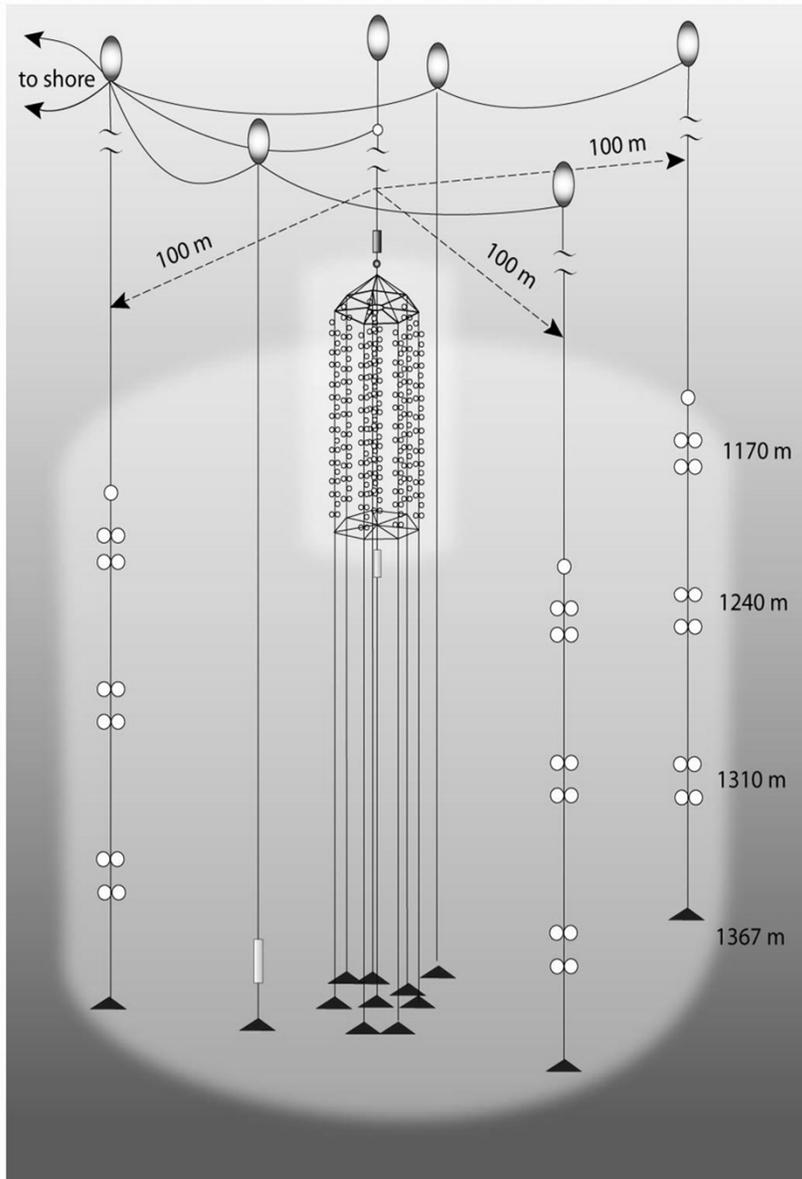


Il rivelatore Baikal

- Ha cominciato a prendere dati nel 1998;
- 8 stringhe lunghe 72 m con 384 tubi fotomoltiplicatori l'una;
- Le stringhe sono situate a 1070m di profondita' e sono ancorate al fondo;
- I PMT sono rivolti verso il basso e sono riuniti a coppie in cosiddetti Optical Module (OM);
- Il rivelatore ha una soglia piuttosto bassa, cioe' puo' rivelare neutrini di energia a partire da $E > 10^{-20}$ GeV;



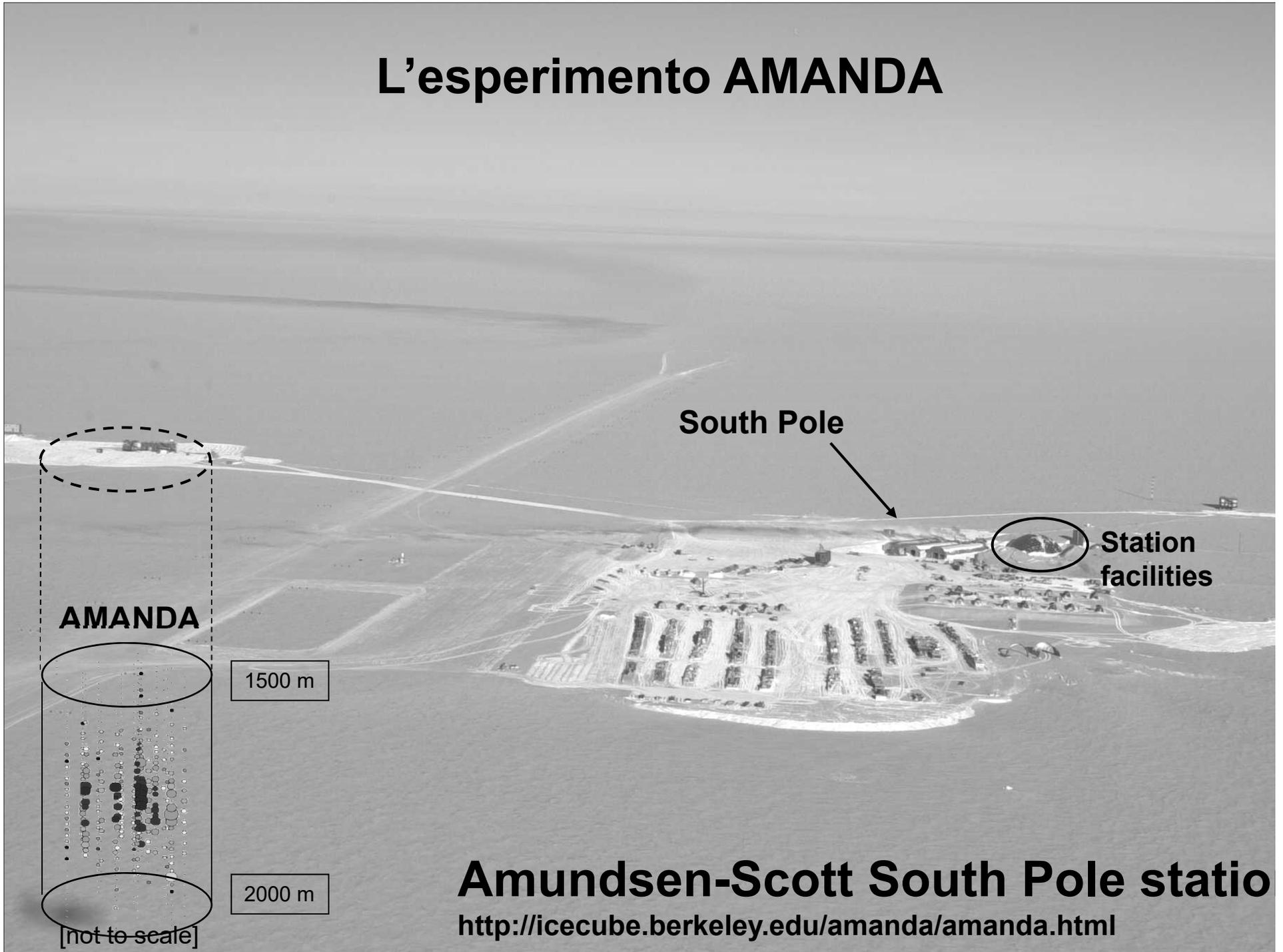
Il rivelatore Baikal (2)

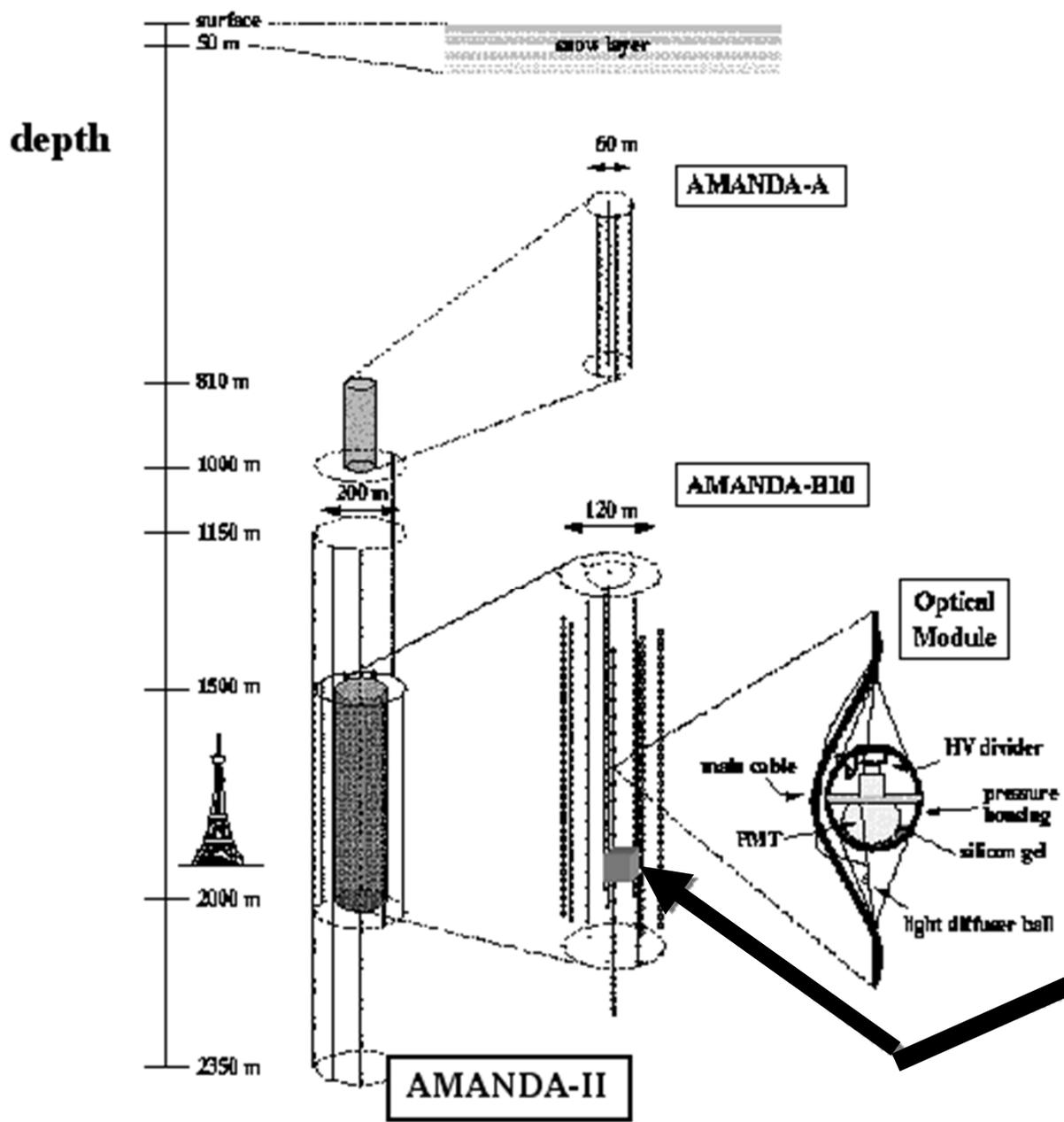


Nel 2005 sono stati fatti dei miglioramenti all'apparato:

- Sono state aggiunte 3 stringhe di fototubi piu' esterne e con granularita' meno fine: in questo modo allargano il volume sensibile e aumentare l'efficienza per neutrini di energia ultra-elevata;
- Hanno equipaggiato il sistema con un laser per fare la temporizzazione dei fototubi: in pratica simulano un emissione luminosa e vedono la risposta dei PMT in tempo;
- N.B.: la sincronizzazione dei PMT e la loro precisione temporale e' molto importante per la ricostruzione delle tracce di muone;

L'esperimento AMANDA





AMANDA-A
 (prototipo con 4-stringhe)
 4 stringhe
 80 OMs
 Anno:1996

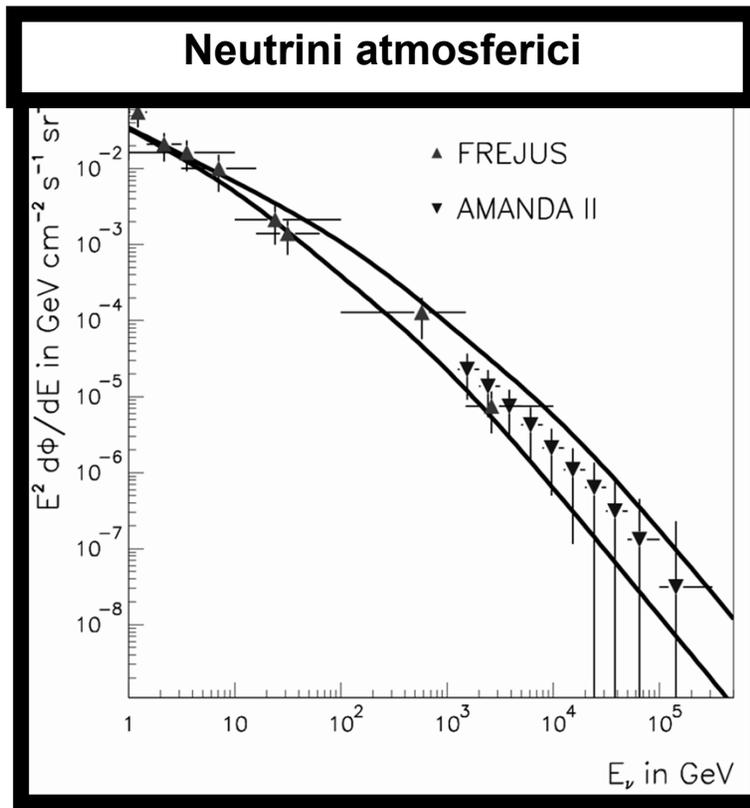
AMANDA-B10
 (cuore di AMANDA-II)
 10 stringhe
 302 OMs
 Anno:1997-99

AMANDA-II
 19 stringhe
 677 OMs
 Anno:2000

AMANDA as of 2000 zoomed in on zoomed in on one
 Eiffel Tower as comparison AMANDA-A (top) AMANDA-II (bottom)

Caratteristiche di AMANDA

• Amanda e' sensibile in diverse regioni di energia e puo' quindi investigare numerose sorgenti di neutrini;



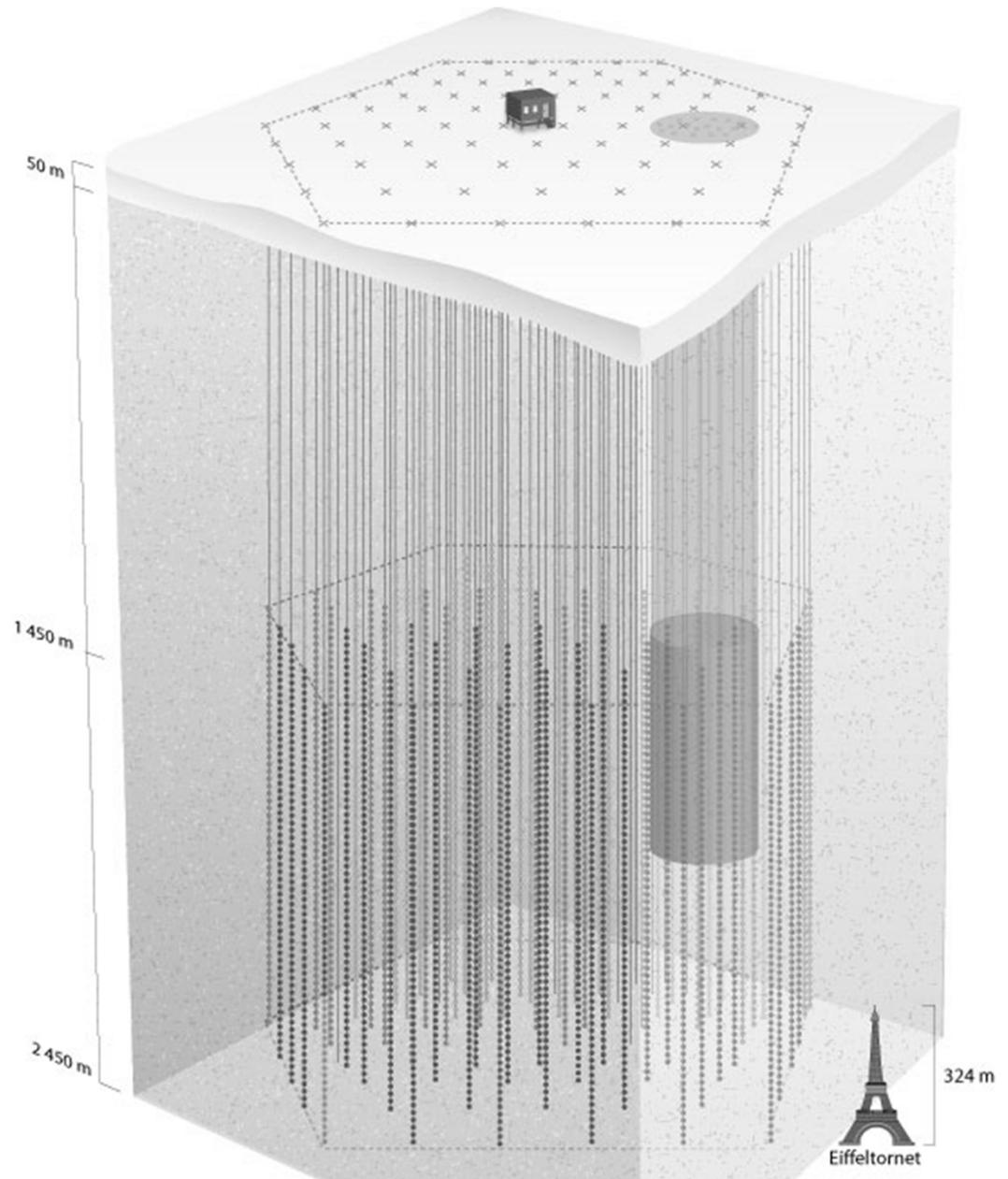
Il flusso misurato e' compatibile con le previsioni teoriche sul flusso di ν atmosferici;

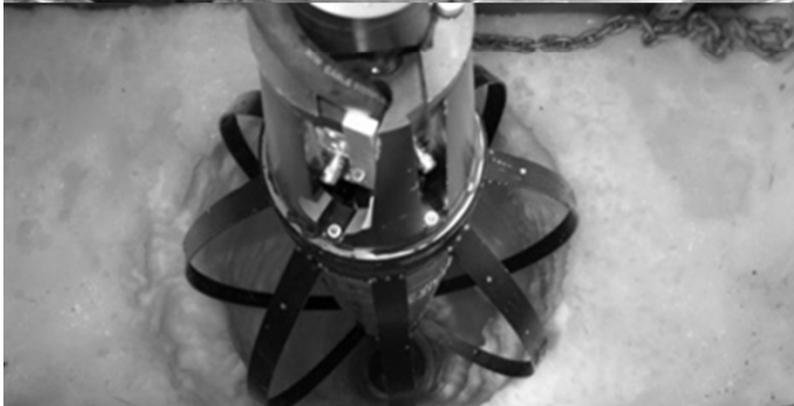
Energia	Produzione
MeV	Supernove
GeV-TeV	Atmosfera, Annichilazione di Wimps, Centro della galassia
TeV_EeV	μ Quasars, SN remnant AGN,GRB

Non hanno ottenuto alcuna evidenza di neutrini di alta energia provenienti da sorgenti "esotiche"

L'estensione di AMANDA: ICECUBE

- Icecube di fatto contiene AMANDA al suo interno;
- E' composto da 80 stringhe con 60 Optical Module ognuna;
- Fra un OM e l'altro ci sono ~ 17m;
- La distanza fra una stringa e l'altra e' di 125m;
- In superficie, in corrispondenza di ogni stringa c'e'una tanica di ghiaccio che funziona da rivelatore Cerenkov come veto per i muoni cosmici (ICETOP);
- $\Delta\theta \sim 0.8^\circ$;
- Range di energia 10^{15} - 10^{18} eV;





- La prima stringa di ICECUBE e' stata calata a gennaio 2005;
- L'intero rivelatore completato 2011;
- Intanto prende dati!

Evidenza di neutrini $E \sim 1$ PeV (10^{18} eV) in IceCube

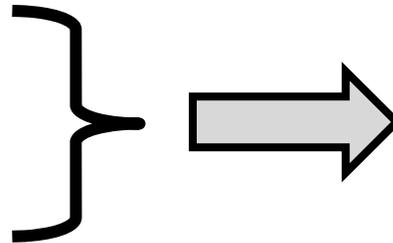
- Nel 2013, IceCube ha annunciato la scoperta di 2 neutrini di $E \sim 1$ PeV;
- Inconsistenti a 4.3σ con lo spettro dovuto a neutrino atmosferici;
- In generale c'è evidenza di un'estensione dello spettro a energie maggiori di quella che ci si aspetterebbe da neutrino atmosferici (26 eventi trovati, evidenza a 3.6σ).
- Bisogna aspettare di aumentare la statistica per dire qualche cosa di più definito



Progetti per rivelatori nel Mediterraneo

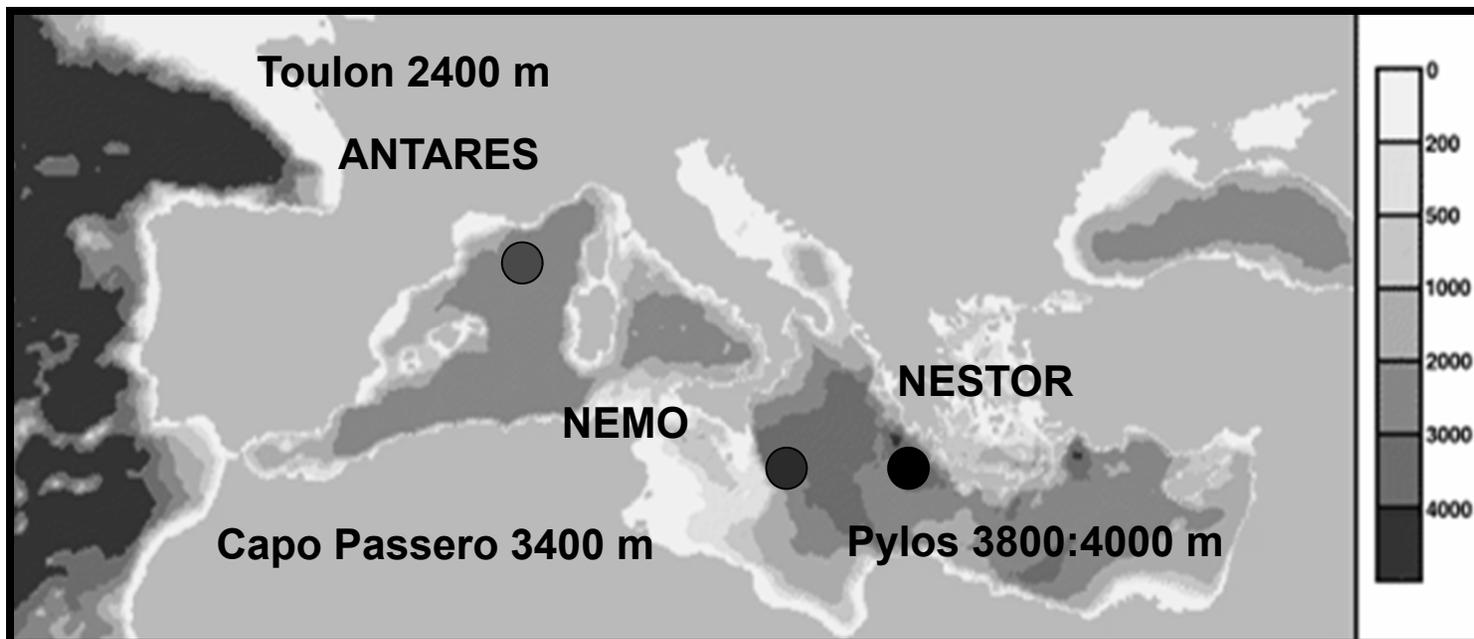
- **3 progetti**

- ANTARES
- NESTOR
- NEMO



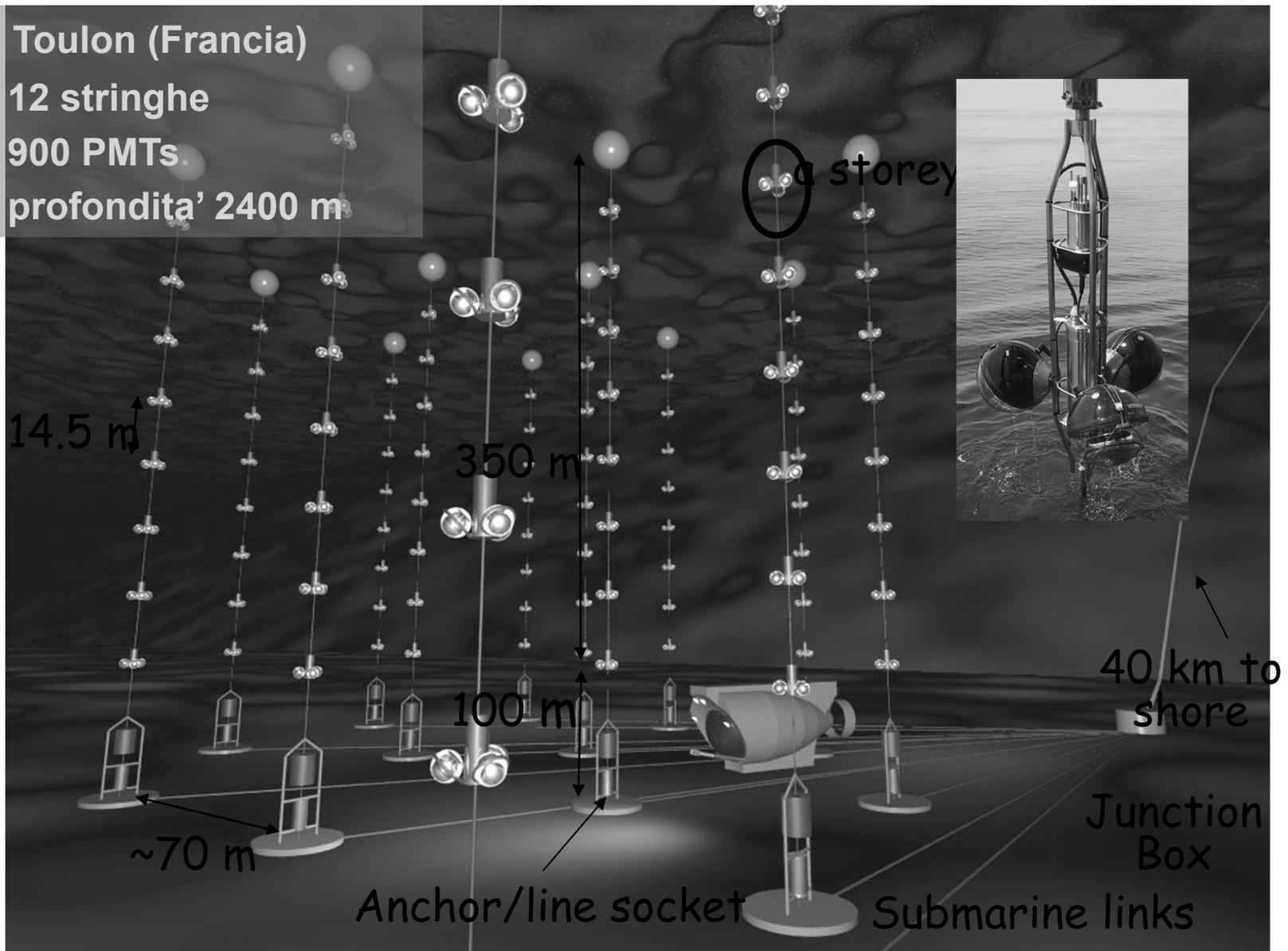
Potrebbero in futuro
convergere nel progetto
KM3NeT

Complementare ad
IceCube, perche' situato
nell'emisfero Nord



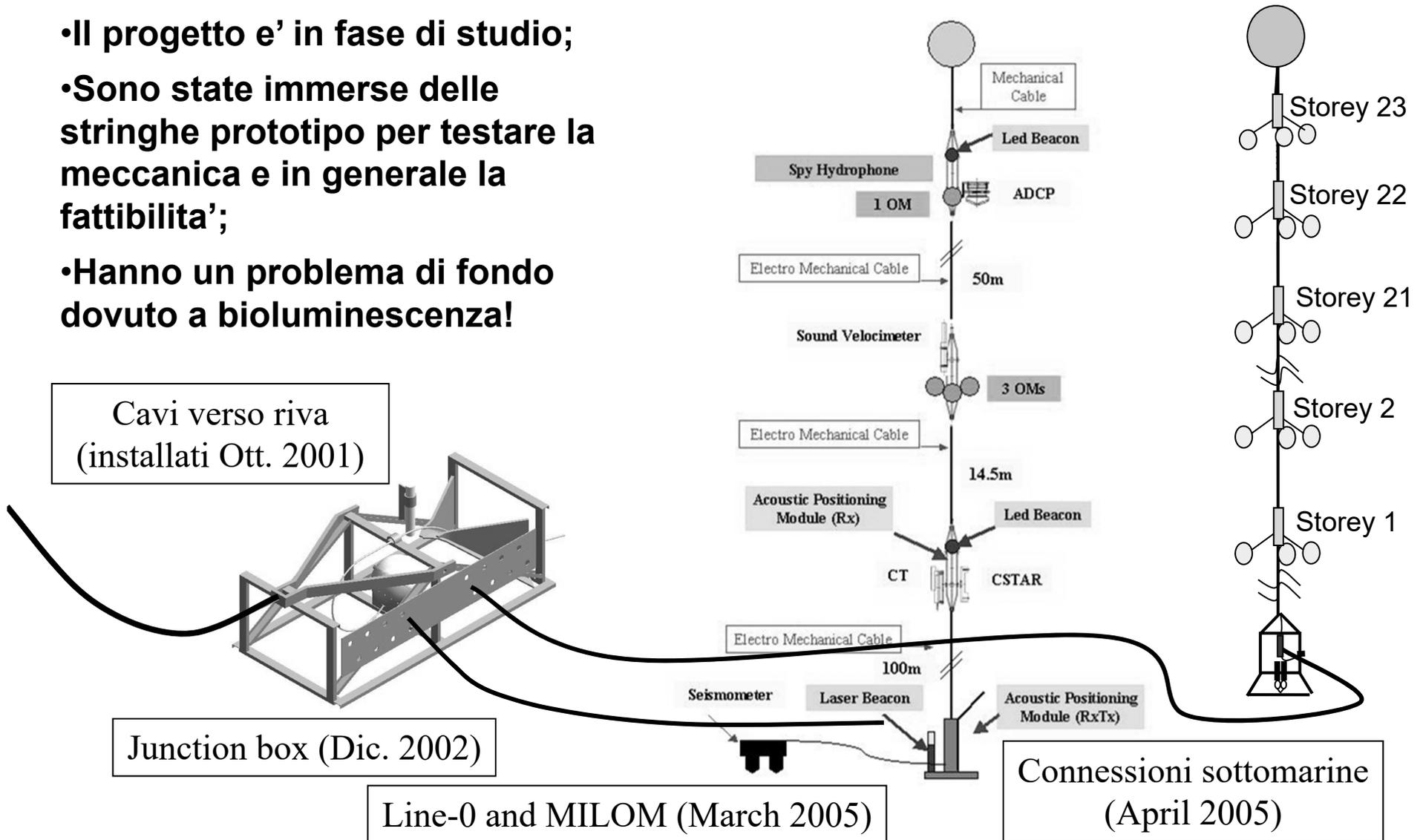
Il progetto ANTARES

- Toulon (Francia)
- 12 stringhe
- 900 PMTs
- profondita' 2400 m



Stato di ANTARES

- Il progetto e' in fase di studio;
- Sono state immerse delle stringhe prototipo per testare la meccanica e in generale la fattibilita';
- Hanno un problema di fondo dovuto a bioluminescenza!



Il sito di ANTARES



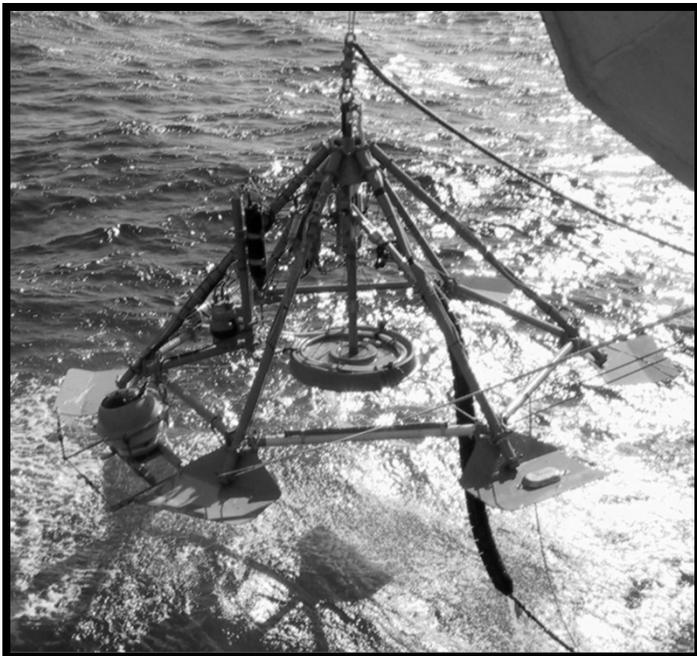
**Sottomarino per l'istallazione
subacquea**



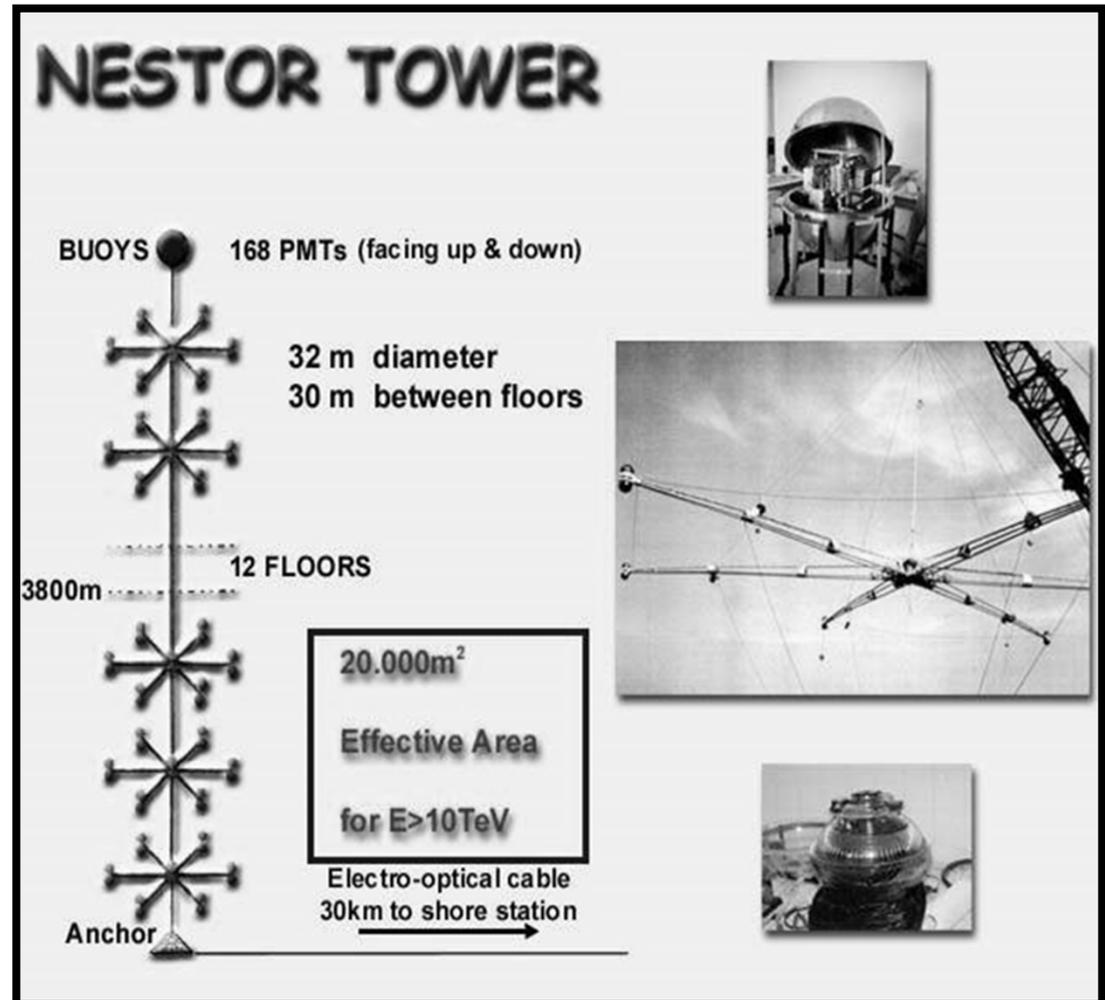
**Junction box a 2400 m di
profondita'**

Il progetto NESTOR

- Il sito proposto e' Pylos in Grecia;
- Profondita' di 3800 m;
- Nel 2003 hanno immerso un prototipo (un piano esagonale) con 12 PMTs;
- Devono mettere altri 4 piani;



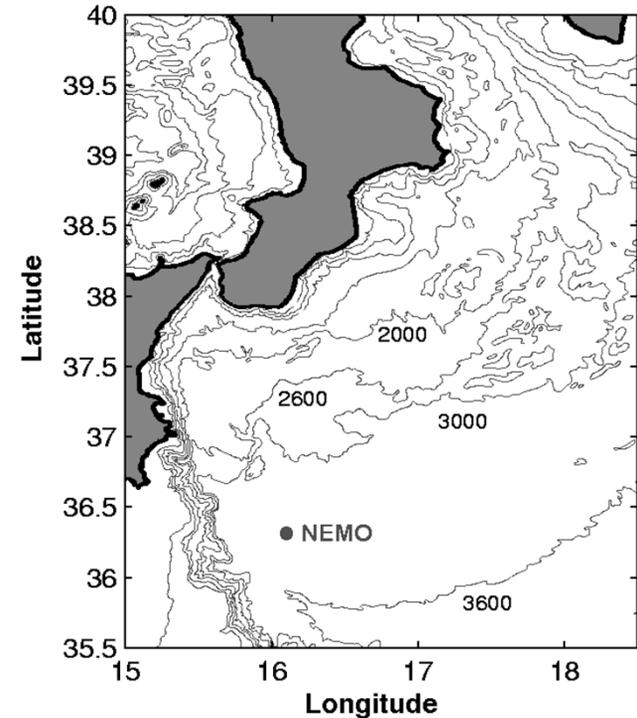
<http://www.nestor.org.gr/>



- Sono gli unici in grado di usare PMT rivolti anche verso l'alto (utili per fare un veto sui raggi cosmici) perche' hanno poca sedimentazione;

Il progetto Nemo

- Dal 1998 sono state fatte numerose campagne per studiare il sito di fronte a Capo Passero (Sicilia) a circa 3500 m di profondità’;
- Le campagne sono state mirate a misurare:
 - Proprieta’ ottiche dell’acqua;
 - Il fondo dovuto a bioluminescenza;
 - Le correnti marine in profondita’;
 - La natura e la quantita’ dei depositi di sedimentazione;



Il progetto KM3NeT

- **Dall'esperienza che si sta maturando nei tre progetti sottomarini NEMO, ANTARES e NESTOR scaturirà un progetto comune denominato KM3NeT;**

Le caratteristiche di questo rivelatore saranno:

- 1. Si svolgerà nel Mediterraneo (il sito dovrebbe essere scelto in base ai risultati ottenuti dai 3 progetti in questi anni di test);**
- 2. Avrà un volume efficace di 1Km^3 (equivalente a quello di IceCube);**
- 3. Dovrebbe raggiungere un'ottima risoluzione angolare sulla direzione dei muoni rivelati $\sim 0.3^\circ$; (migliore di quella di IceCube, in quanto l'acqua ha in generale L_{scatt} maggiore);**
- 4. Dovrebbe avere una soglia di $E \sim 100 \text{ GeV}$;**
- 5. N.B.: risulterà complementare ad IceCube, in quanto, essendo situato nell'emisfero Nord è sensibile a neutrini provenienti dall'emisfero sud;**

Experimental Techniques ($E > 10 \text{ GeV}$)

