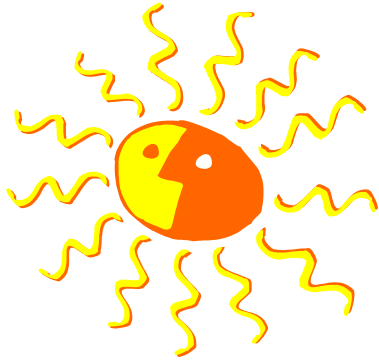




Lezione n. 7

I raggi cosmici: raggi gamma e neutrini

Corso di Introduzione all'astrofisica (III parte)
Anno accademico 2010-2011
Barbara Caccianiga

Astronomia γ ad alta energia

I γ cosmici

- Abbiamo visto che l'atmosfera terrestre e' bombardata da un flusso continuo di raggi cosmici di energie che arrivano fino a 10^{20} eV (e oltre?);
- La componente di γ in questo flusso e' piuttosto limitata ($< 0.1\%$);
- D'altra parte i γ sono interessanti perche' nel loro percorso verso la terra non subiscono deviazioni a causa dei campi magnetici interstellari e intergalattici;
- Per $E < 1\text{TeV}$ i fotoni viaggiano pressocche' indisturbati e la loro direzione punta verso la sorgente che li ha prodotti;

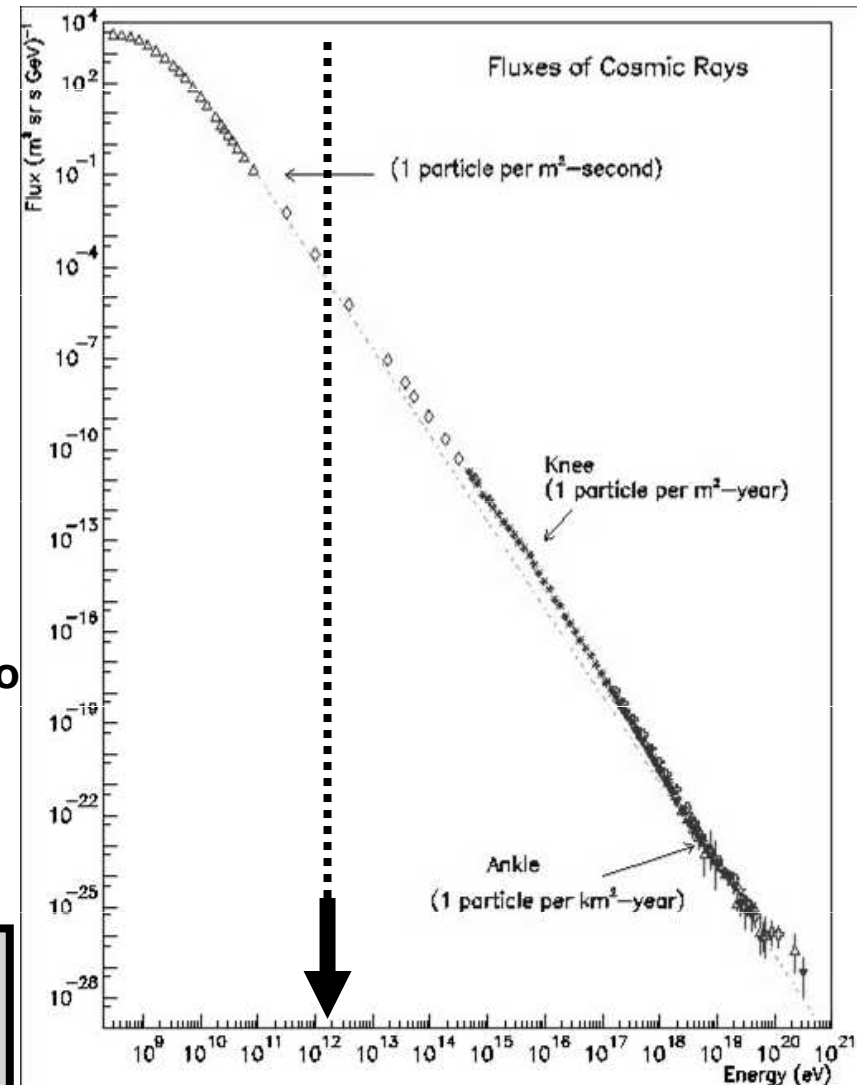
• Le regioni piu' lontane del cosmo possono essere esplorate solo tramite γ di $E < 1\text{TeV}$

- A energia maggiore l'universo tende a diventare "opaco" ai raggi γ poiche' cominciano a diventare possibili reazioni come:

$$\gamma_{\text{HE}} + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow e^+ + e^-$$

$$\gamma_{\text{HE}} + \gamma_{\text{IR}} \rightarrow e^+ + e^-$$

- Per questo motivo i γ piu' energetici ($E > 100\text{TeV}$) ci permettono di esplorare solo una regione relativamente vicina a noi ($d < 100\text{ kpc}$);



Energie dei γ cosmici

- **Analogamente a quanto fatto per i raggi cosmici, possiamo classificare i γ cosmici in base alla loro energia:**
 - High Energy γ (HE): $E \sim 10^4$ - 10^{10} eV (10keV- 50GeV);
 - Very High Energy γ (VHE): $E \sim 10^{10}$ - 10^{14} eV (50GeV - 100TeV);
- **Analogamente a quanto abbiamo visto per i raggi cosmici, i γ “primari” non possono venire rivelati direttamente da terra, perche’ interagiscono con l’atmosfera producendo sciame di particelle secondarie;**
 - High Energy γ : il flusso e’ sufficientemente grande da poter venire misurato direttamente con satelliti al di fuori dell’atmosfera;
 - Very High Energy γ : il flusso si riduce cosi’ tanto da rendere necessaria la misura indiretta, cioe’ dei prodotti secondari dell’interazione dei γ cosmici con l’atmosfera;
- **N.B.: vedremo che il principale fondo con cui si deve combattere per la rivelazione indiretta di γ cosmici a terra e’ quello dovuto a raggi cosmici!**

Sorgenti di γ cosmici

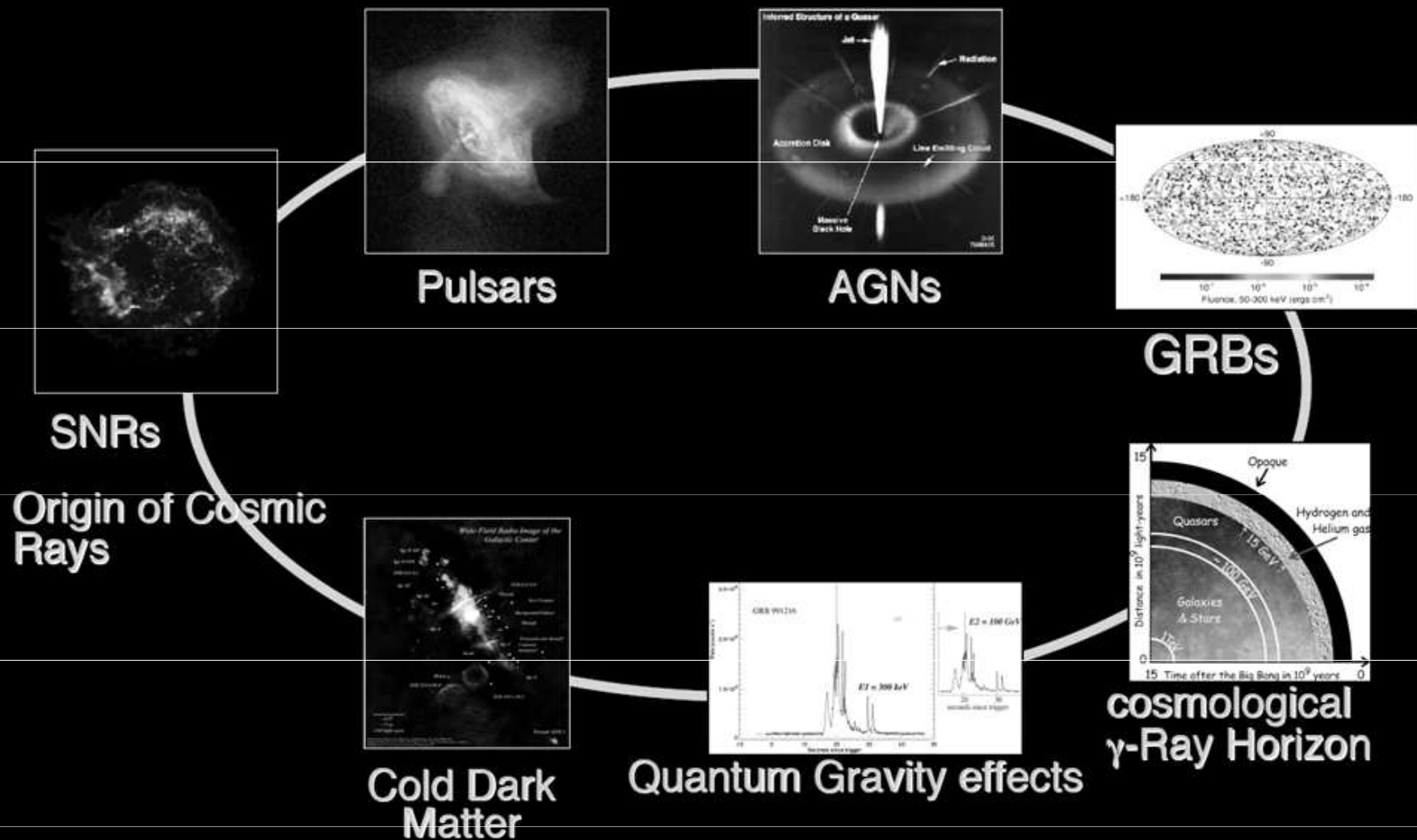
SORGENTI GALATTICHE

- Emissione diffusa dovuta a interazione dei raggi cosmici con i gas e i fotoni interstellari (per es. $p + p \rightarrow p + p + \pi_0$ con $\pi_0 \rightarrow \gamma + \gamma$);
- Pulsar: stella di neutroni (residuo di una SN), che ruota velocemente (fino a 1000 volte/sec!); ha campi magnetici B molto intensi e accelera particelle che emettono γ per radiazione di sincrotrone;
- Resti di supernova: decadimenti radioattivi di elementi prodotti nell'esplosione della SuperNova;
- Annichilazione di WIMPs nel sole o nell'alone della galassia;
- Sorgenti puntiformi non identificate;

SORGENTI EXTRA-GALATTICHE

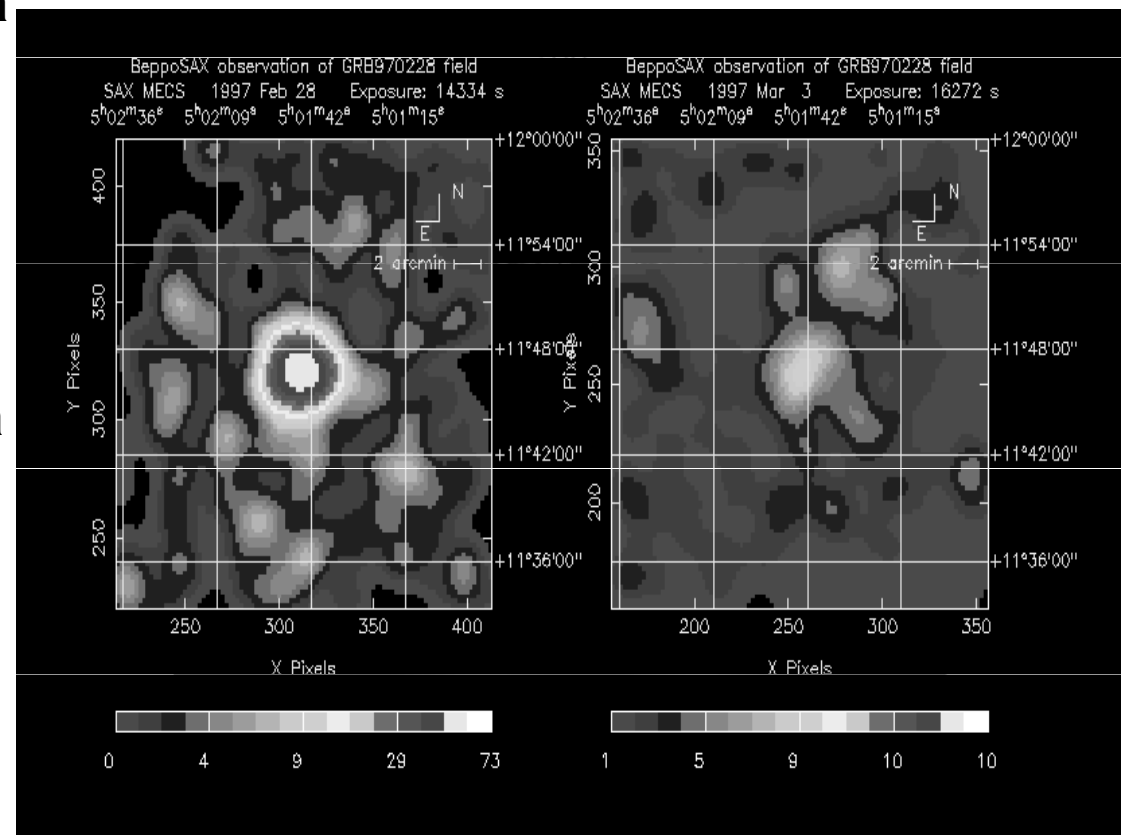
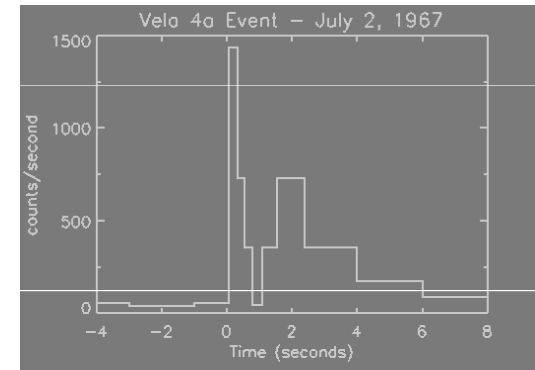
- Emissione diffusa di origine ignota: potrebbe anche essere dovuta a sorgenti specifiche, non risolte dagli esperimenti attuali;
- AGN (Nuclei Galattici Attivi): sono buchi neri molto massivi ($\sim 10^8 M_\odot$); spesso producono due jet relativistici diametralmente opposti; si dicono *blazars* quando uno dei jet punta verso la terra;
- GRB (Gamma Ray Burst): sono flash di raggi γ di breve durata (da ~ 10 msec a ~ 100 sec);
- Sorgenti puntiformi non identificate;

Il programma di fisica dell'astronomia gamma



I Gamma Ray Burst

- Scoperti negli anni '60 dal satellite americano Vela, che in realta' aveva lo scopo di monitorare test clandestini di armi nucleari;
- Frequenza di circa 1 al giorno;
- Non era chiaro se avevano origine galattica o extra-galattica;
- L'esperimento BATSE mostra che hanno distribuzione isotropa, suggerendo la provenienza extra-galattica;
- La conferma viene solo nel 1997, quando il satellite BeppoSAX rivela l'emissione X di un GBR e ne individua la sorgente con precisione;
- I telescopi di Hubble e Keck studiarono la nube residua e trovarono $z \sim 0.8$ dimostrando l'origine extra-galattica del GBR;



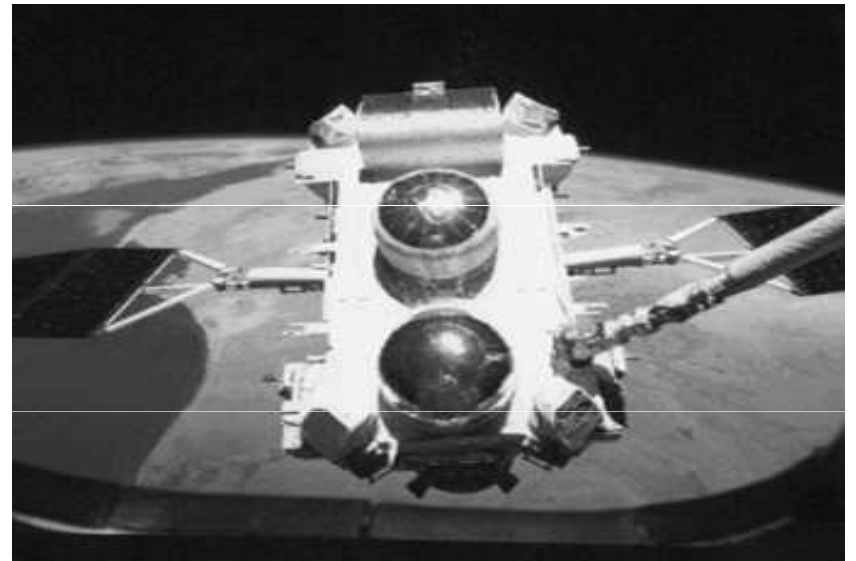
Che cosa genera i Gamma Ray Burst?

- **I GBR sono fra gli eventi piu' energetici del cosmo ($E \sim 4 \times 10^{53}$ erg), comparabili solo con le SuperNove;**
- **L'emissione di γ nei GBR dura da pochi millisecondi a qualche minuto;**
- **L'ipotesi piu' accreditata per i Gamma-Ray-Bursts "lunghi" ($t > 2$ sec) sembra quella che li vede associati al collasso e alla susseguente esplosione di una stella estremamente massiva (hypernova)**
 - Il core della stella collassa producendo un buco nero;
 - L'esplosione che ne segue provoca un'onda d'urto fortemente collimata che comprime e riscalda le parti piu superficiali della stella provocando l'emissione di radiazione di sincrotrone (ovvero la radiazione emessa da particelle che spiraleggiano in campo magnetico)';
 - Questo e' il gamma ray burst che esce dalla superficie della stessa seguito dall'onda d'urto dell'esplosione;
 - L'onda d'urto rallenta provocando l'emissione di radiazione meno energetica (afterglow di raggi x per pochi minuti, seguita da raggi UV e fotoni nel visibile che possono durare giorni o settimane);
- **I Gamma-Ray-Burst "corti" sembrerebbero invece originati dalla collisione di due stelle di neutroni orbitanti in un sistema binario;**

Rivelazione diretta dei γ cosmici: la missione CGRO (Compton Gamma Ray Observatory)

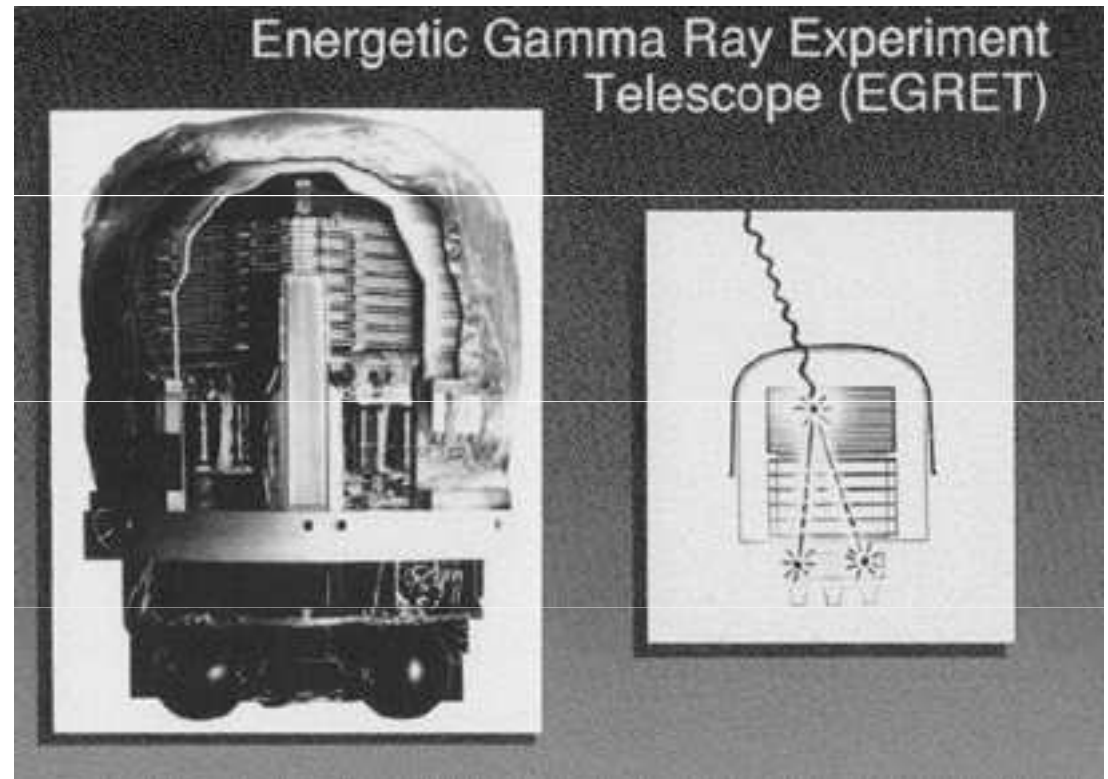
- La missione CGRO e' durata dal 1991 al 2000 e ha dato un notevole contributo all'astronomia gamma;
- E' un grande osservatorio spaziale su satellite che consiste di 4 apparati sperimentali per la rivelazione di γ cosmici: BATSE, OSSE, COMPTEL e EGRET;
- I 4 esperimenti erano sensibili a diverse regioni di energia;
- La regione di energia esplorata in totale era $30 \text{ keV} < E < 30 \text{ GeV}$;

1. **BATSE (Burst And Transient Source Experiment) $E(0.03 - 1.2)\text{MeV}$**
2. **OSSE (Oriented Scintillation Spectrometer Experiment) $E(0.06 - 10)\text{MeV}$**
3. **COMPTEL (Imaging Compton Telescope) $E(1 - 30)\text{MeV}$**
4. **EGRET (Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope) $E(20 - 30000)\text{MeV}$**



EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope)

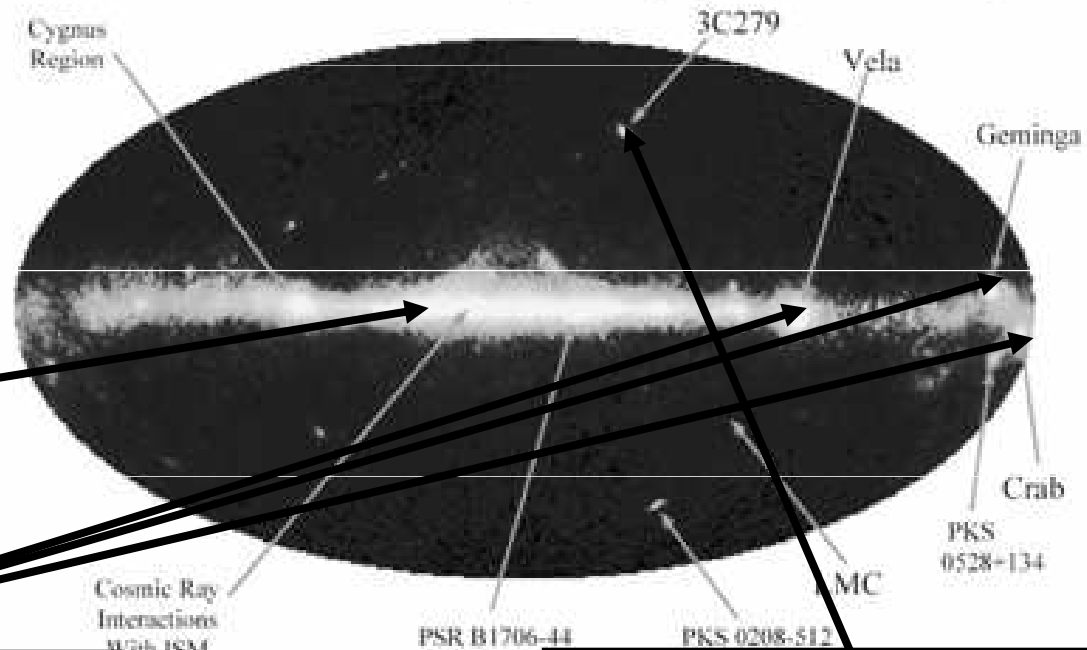
- E' un piccolo calorimetro predisposto per rivelare i γ tramite la produzione di coppie $e^+ - e^-$;
- E (20 MeV - 30 GeV);
- $\Delta E/E \sim 20\%$;
- $\Delta\theta \sim 1.3^\circ$ a 1 GeV;
- $\Delta\theta \sim 0.4^\circ$ a 10 GeV;



- Ha permesso l'individuazione di una zona di emissione diffusa di γ corrispondente al piano della galassia e dovuta all'interazione dei raggi cosmici con gas e fotoni interstellari;
- Ha anche individuato una emissione diffusa di origine extra-galattica; potrebbero in realta' essere sorgenti non risolte;

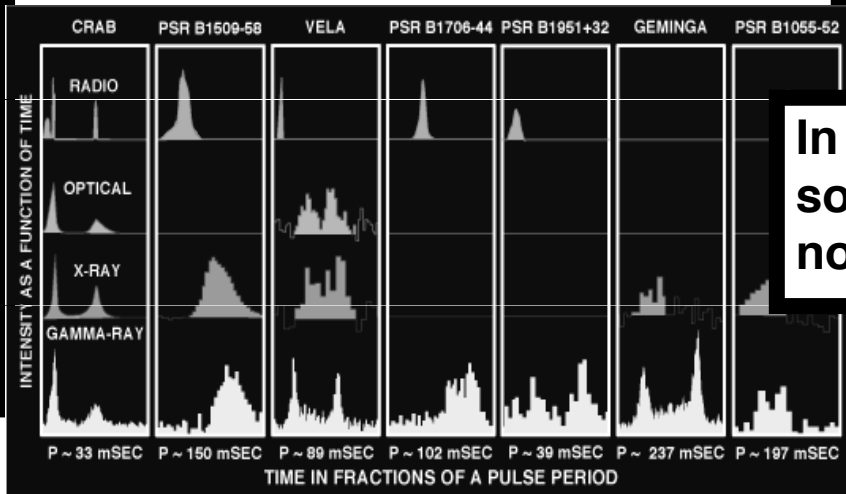
Risultati di EGRET

EGRET All Sky Map (>100 MeV)



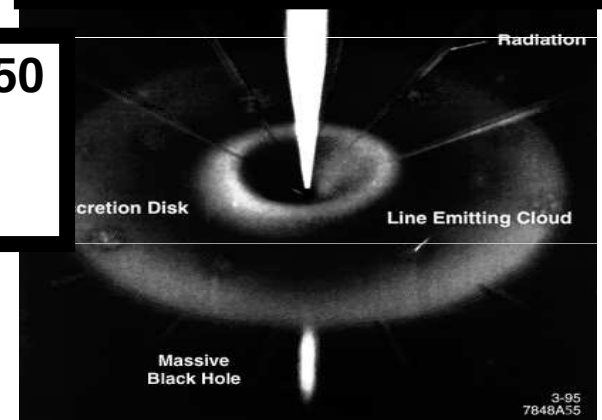
Emissione diffusa dal piano galattico dovuta a interazione dei raggi cosmici con gas interstellari

pulsar del Granchio, Geminga e Vela (origine galattica)



In totale vedono ~ 350 sorgenti, di cui 250 non identificate

AGN, principalmente blazars a diversi redshift (origine extra-galattica)



GAMMA-RAY LARGE AREA SPACE TELESCOPE

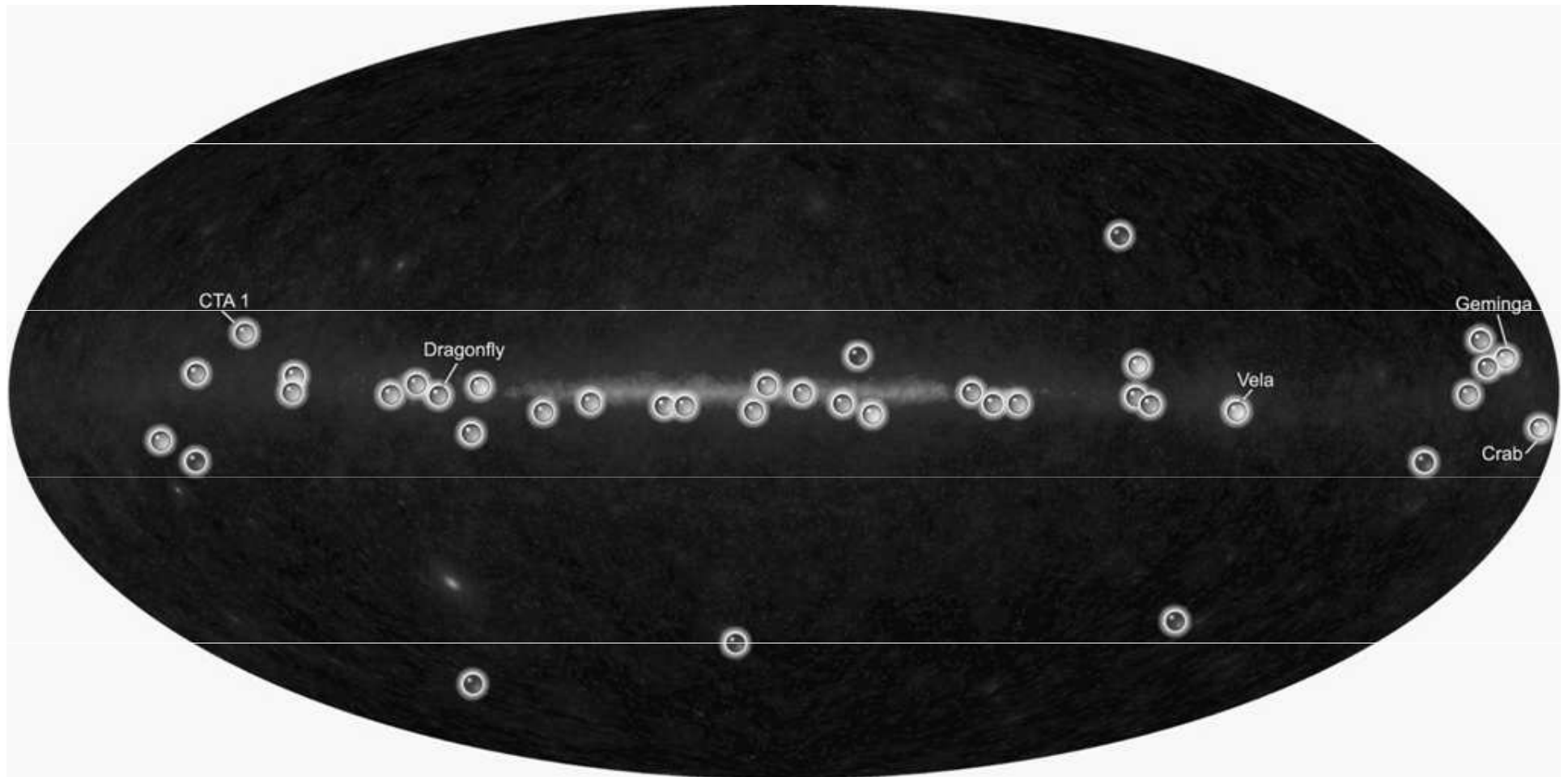


- **Collaborazione USA, Francia, Italia, Giappone, Germania, Svezia;**
- **E' stato lanciato il 11 giugno 2008;**
- **Progettato per rivelare γ fino a 300 GeV;**
- **Ha una superficie efficace per rivelare $\gamma \sim$ un ordine di grandezza piu' alta di quella di EGRET;**
- **Si prevede potra' catalogare ~ 9000 sorgenti;**
- **EGRET ha individuato ~ 70 AGN; GLAST potrebbe vederne diverse migliaia;**
- **Potra' inoltre risolvere (eventualmente) il fondo diffuso extra-galattico osservato dai precedenti esperimenti;**

Alcuni risultati di GLAST (ora e' chiamato FERMI!): scoperta di 12 nuove pulsar (7 gennaio 2009)

- Fermi/GLAST ha scoperto 12 pulsar che emettono in gamma senza controparte radio (come GEMINGA);
- Una pulsar e' una stella di neutroni che ruota rapidamente;
- La maggior parte delle pulsar sono state scoperte per la loro emissione radio che si ritiene sia estremamente focalizzata e prodotta dai poli magnetici della stella;
- Se poli magnetici e asse di rotazione della stella non sono allineati i raggi emessi dalla pulsar "spazzano" il cielo e i radiotelescopi a terra li rivelano solo se almeno uno dei raggi e' diretto verso di noi;
- Questo fa si che alcune pulsar non siano visibili nel radio;
- FERMI/GLAST ha inoltre trovato l'emissione gamma di altre 18 pulsar note in precedenza

The Pulsing Sky



Fermi Pulsar Detections

- New pulsars discovered in a blind search
- Millisecond radio pulsars
- Young radio pulsars
- Confirmed pulsars seen by Compton Observatory EGRET instrument

Misura indiretta dei γ cosmici

- Analogamente a quanto detto per i raggi cosmici, la misura indiretta dei γ cosmici si basa sulla rivelazione delle particelle secondarie prodotte dal gamma primario che interagisce con l'atmosfera terrestre;
- Le tecniche utilizzate per rivelare questi sciame secondari sono simili a quelle usate per i raggi cosmici, ma con qualche differenza dovuta sostanzialmente al fatto che l'energia dei VHE gamma e' (relativamente) bassa: 10^{10} eV - 10^{14} eV (30 GeV - 100 TeV) ; ricordiamo che per i raggi cosmici a cui eravamo interessati la volta scorsa $E > 10^{18}$ - 10^{19} eV;

**METODO 1: Campionamento delle particelle a livello del suolo
tramite una griglia di rivelatori (Ground Array) disposti su una superficie
opportuna → Studio del profilo trasversale dello sciame**

**METODO 2: Rivelazione della luce Cerenkov
emessa dalle particelle dello sciame → Studio del profilo longitudinale;**

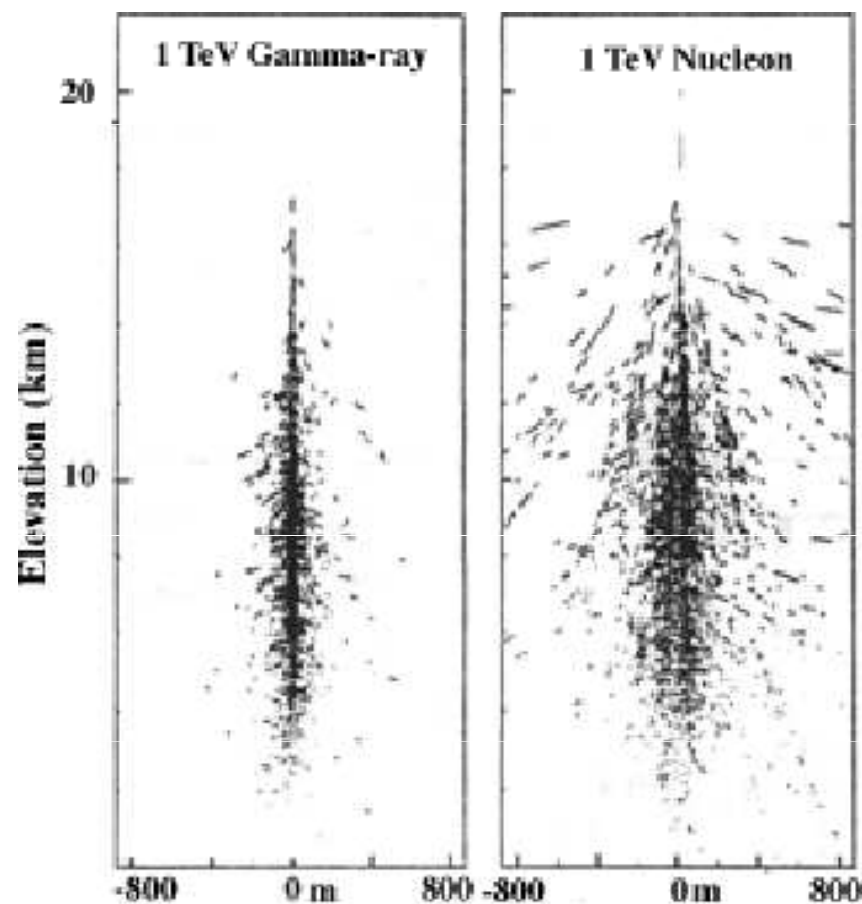
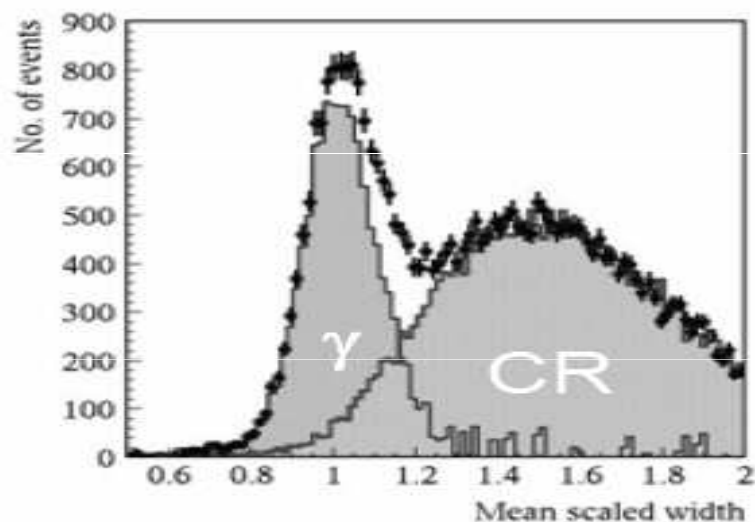
• Si noti che in questo caso il METODO 2 prevede di rivelare la luce Cerenkov, non di fluorescenza poiche' quest'ultima sarebbe troppo poca per sciame poco energetici;

EAS array per rivelare γ cosmici

- Tutte le considerazioni fatte sui rivelatori che campionano gli sciame a livello del suolo per rivelare raggi cosmici valgono anche in questo caso con qualche differenza;
- Il fatto che γ cosmici abbiano “bassa” energia implica che:
 - Il punto di massimo dello sciame e' piu' in alto ($x_{\max} \sim \log E$);
 - Il numero di particelle dello sciame e' minore;
- Entrambi questi fatti rendono gli esperimenti come Auger o AGASA estremamente inefficienti per la rivelazione dei γ cosmici;
- Un rivelatore a campionamento progettato appositamente per rivelare γ cosmici sara' quindi ottimizzato cercando di:
 - Aumentare l'altitudine del rivelatore (per es. Esp ARGO in Tibet a $>4000\text{m!}$);
 - Migliorare l'efficienza di raccolta delle particelle dello sciame, riducendo le “maglie” della griglia che costituisce il rivelatore;
- Sara' inoltre importante che abbia la capacita' di discriminare gli sciame iniziati dai γ cosmici da quelli (che sono comunque dominanti) dovuti a raggi cosmici;

Tecniche per discriminare fra γ e adroni

- Il fondo piu' fastidioso che i telescopi di raggi γ si trovano a dover gestire e' proprio quello dovuto a sciame indotti da raggi cosmici;
- Il primo punto che viene sfruttato e' il fatto che i γ provengono in genere da sorgente ben precise, mentre i raggi cosmici sono diffusi uniformemente;
- E' quindi possibile "puntare" i telescopi verso le sorgenti γ che si intende rivelare;
- Inoltre la forma degli sciame indotti da gamma e' diversa da quelli adronici: tipicamente e' piu' "stretta";



Alcuni esempi di esperimenti a campionamento al suolo per rivelare γ cosmici



MILAGRO (Multiple Institutions Los Alamos Gamma Ray Observatory)

- Si svolge a Los Alamos a 2600m di altezza;
- Piscina d'acqua di 60x80 m profonda 8m;
- Sfrutta l'effetto Cerenkov per rivelare particelle dello sciame;
- 450 PMTs a profondita' di 1.2m;
- 273 PMTs a profondita' di 6m;
- Riescono a rivelare γ di energia $E > 1$ TeV;

ARGO (Astrophysical Radiation Ground-based Observatory)

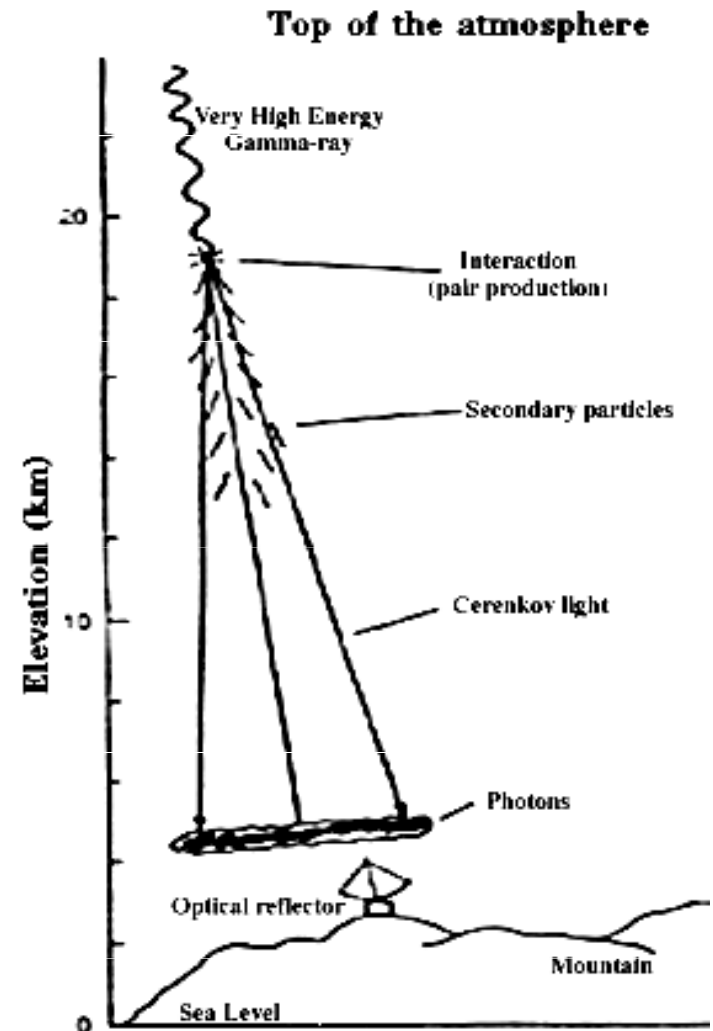
- Si svolge in Tibet a > 4000 m di altitudine;
- Consiste in una superficie di 76×74 m² equipaggiata con RPC (rivelatori a gas);
- N.B.: e' una superficie continua; non una griglia!

<http://argo.na.infn.it/>



I telescopi Cerenkov per rivelare VHE γ

- La tecnica e' molto simile a quella dei telescopi per raggi cosmici che usano luce di fluorescenza (abbiamo visto HiRes e Auger) con qualche differenza:
- La luce Cerenkov e' direzionale: viene emessa ad un angolo $\cos\theta = 1/n\beta$ della direzione di propagazione della particella;
- Siccome n per l'aria ~ 1 , l'angolo di emissione Cerenkov e' molto piccolo;
- La luce viene quindi emessa entro pochi gradi ($<6^\circ$) dall'asse dello sciame;
- Per questo e' necessario essere a poche centinaia di m dall'asse dello sciame;
- Come al solito, il numero di fotoni, il tempo di arrivo e la loro direzione di arrivo permette di ricostruire E , direzione e discriminare gli sciame iniziati da γ , da quelli dovuti ad altre particelle primarie;



I telescopi Cerenkov per rivelare VHE γ (2)

- **Le tipiche caratteristiche di un telescopio Cerenkov sono:**
 1. Area di rivelazione $\sim 0.1 \text{ Km}^2$: puo' essere ottenuta usando piu' di un telescopio (visione stereoscopica);
 2. Copertura angolare e' in generale non superiore a 3° (significativamente peggio dei rivelatori a campionamento al suolo);
 3. Soglia di energia piuttosto bassa (ovvero energia minima che possono rivelare) ($\sim 200 \text{ GeV}$);
 4. Risoluzione energetica meglio di 20-30% a 300 GeV;
 5. Buona capacita' di discriminare il segnale di γ dal fondo di raggi cosmici;
 6. Come nel caso dei telescopi a fluorescenza hanno un basso "duty-cycle" a causa del fatto che possono lavorare solo in assenza di luce;

Alcuni esperimenti per rivelare γ cosmici che usano telescopi Cerenkov

- **CANGAROO** [Collaboration between Australia and Nippon for a Gamma Ray Observa tory in the Outback]
- **HESS** [High Energy Stereoscopic System]
- **VERITAS** [Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System]
- **MAGIC** [Major Atmospheric Gamma Imaging Cerenkov Telescope]

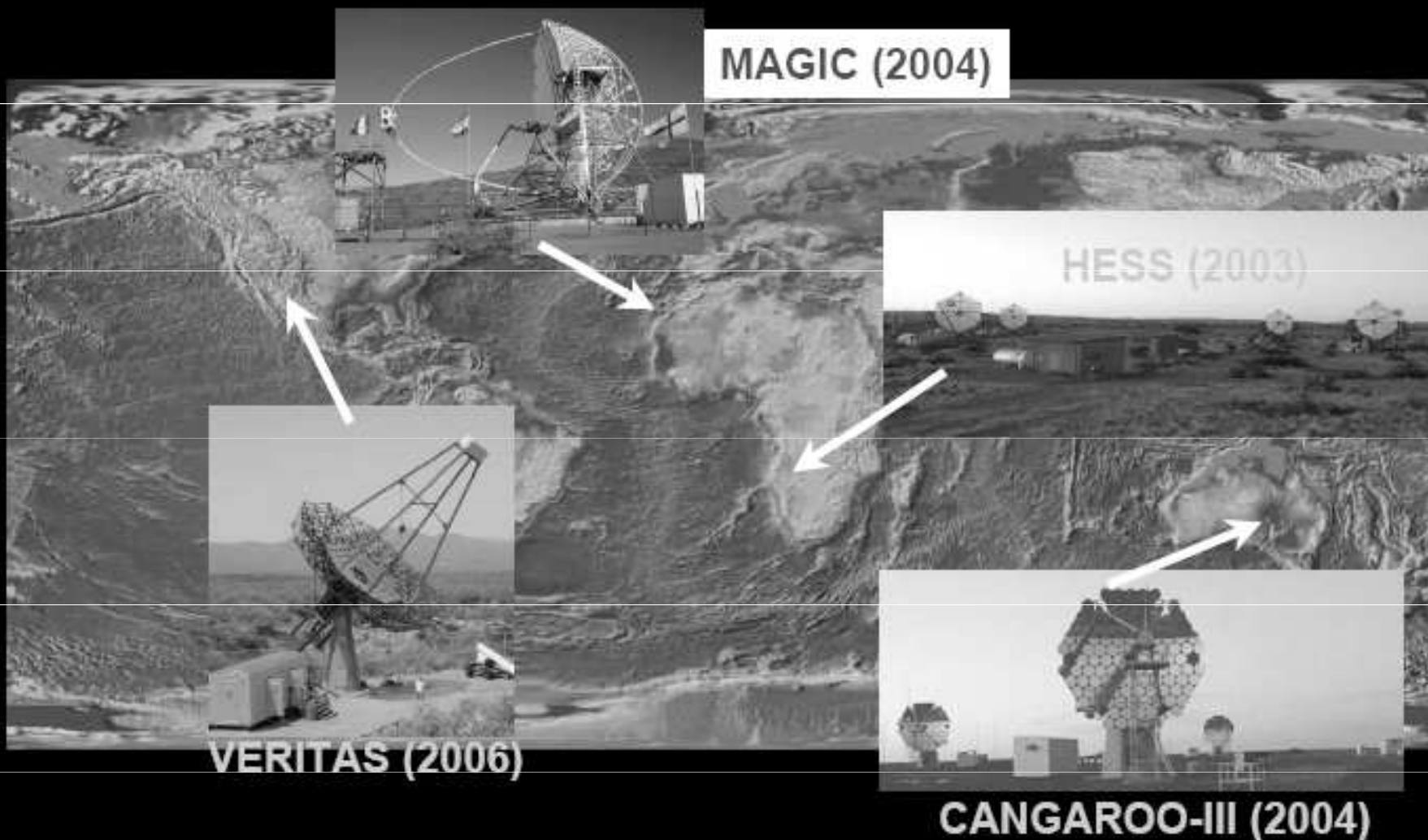
Telescopi Cerenkov di seconda generazione

MAGIC (2004)

HESS (2003)

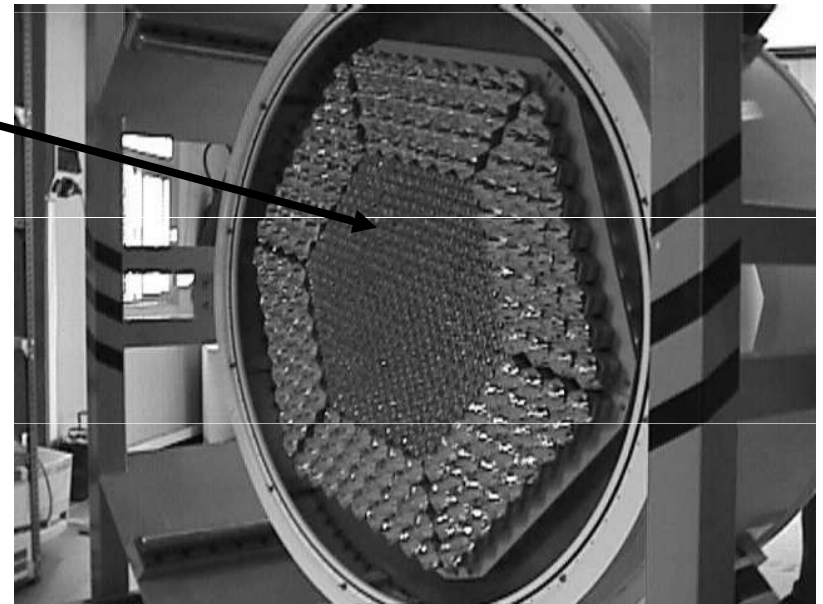
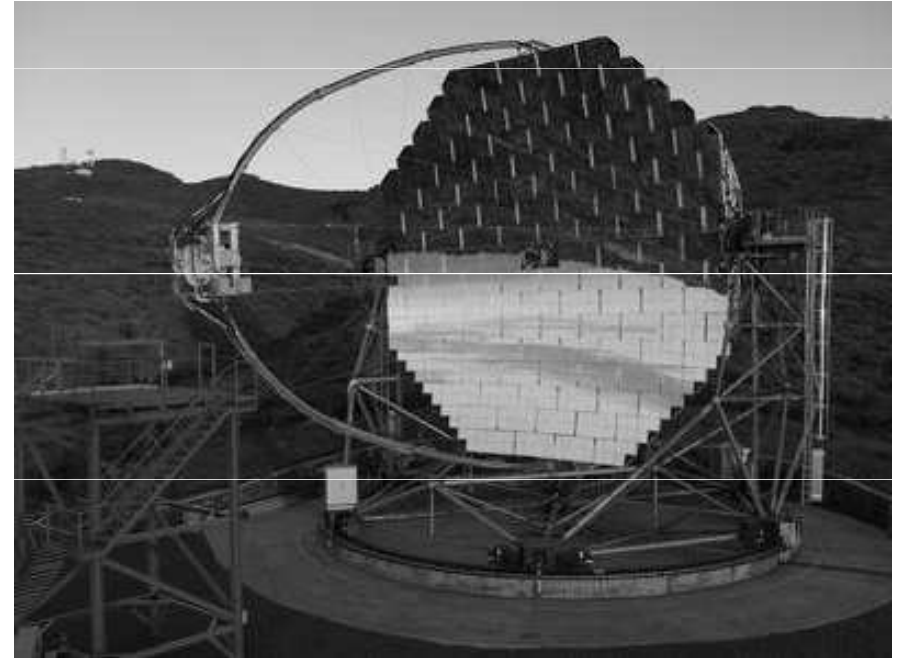
VERITAS (2006)

CANGAROO-III (2004)



MAGIC (<http://magic.mppmu.mpg.de/>)

- Si svolge alle isole Canarie, precisamente sull'isola vulcanica di La Palma ad un'altitudine di circa 2500m;
- Ha una soglia di solo 30GeV (che sarà ulteriormente abbassata a ~ 10 -GeV) e può rivelare γ fino a energie di ~ 300 GeV;
- È composto da due telescopi distanti 85m l'uno dall'altro;
- Ogni telescopio ha diametro di 17m;
- Gli specchi focalizzano la luce Cerenkov su 576 PMTs;
- I PMTs sono disposti in esagoni concentrici: quelli più interni sono più piccoli ($d \sim 3$ cm) di quelli interni ($d \sim 6$ cm);
- Il sistema è predisposto per modificare velocemente (~ 20 sec) la direzione di puntamento, nonostante la massa notevole (~ 40 ton) (utile per la ricerca di GRB)



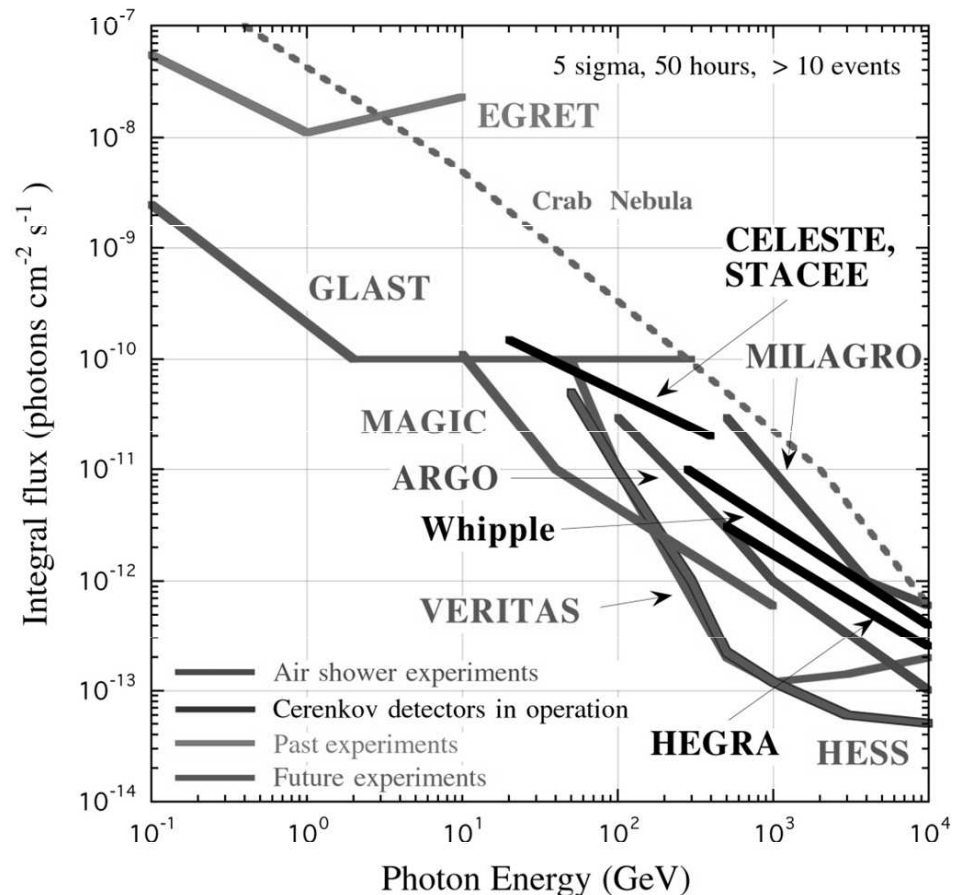
Stato della ricerca di γ cosmici

- Gli esperimenti presenti e futuri coprono una vasta regione di energia e sono complementari fra di loro;

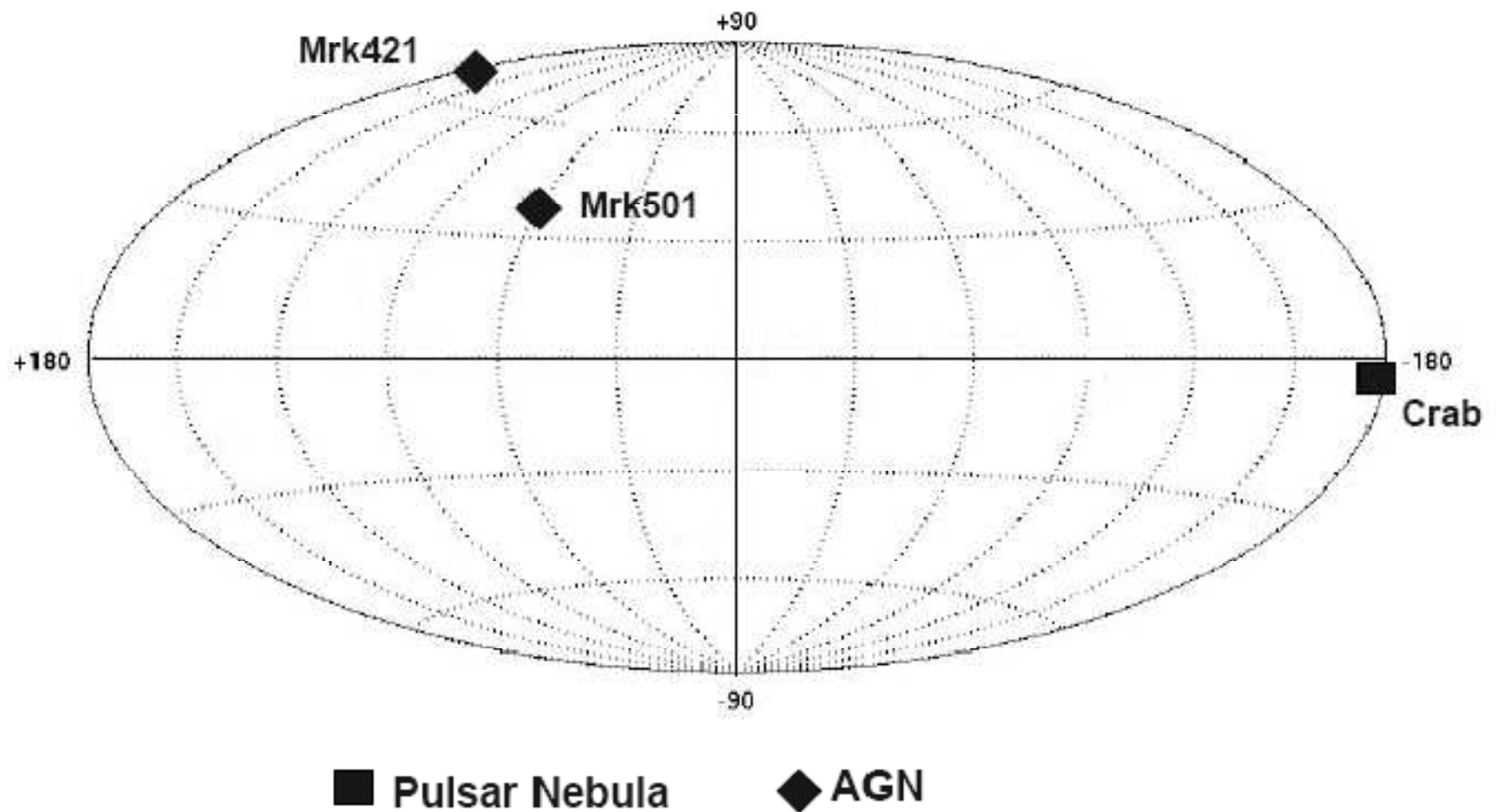
- In particolare gli esperimenti su satellite coprono regioni di energia inferiori (<10 GeV) mentre gli esperimenti a terra coprono energie fino a 10-100 TeV;

- In realta' c'e' un certo grado di sovrapposizione: per esempio GLAST si estendera' fino ad energie di ~ 300 GeV e viceversa MAGIC scende fino a energie di ~ 10 GeV;

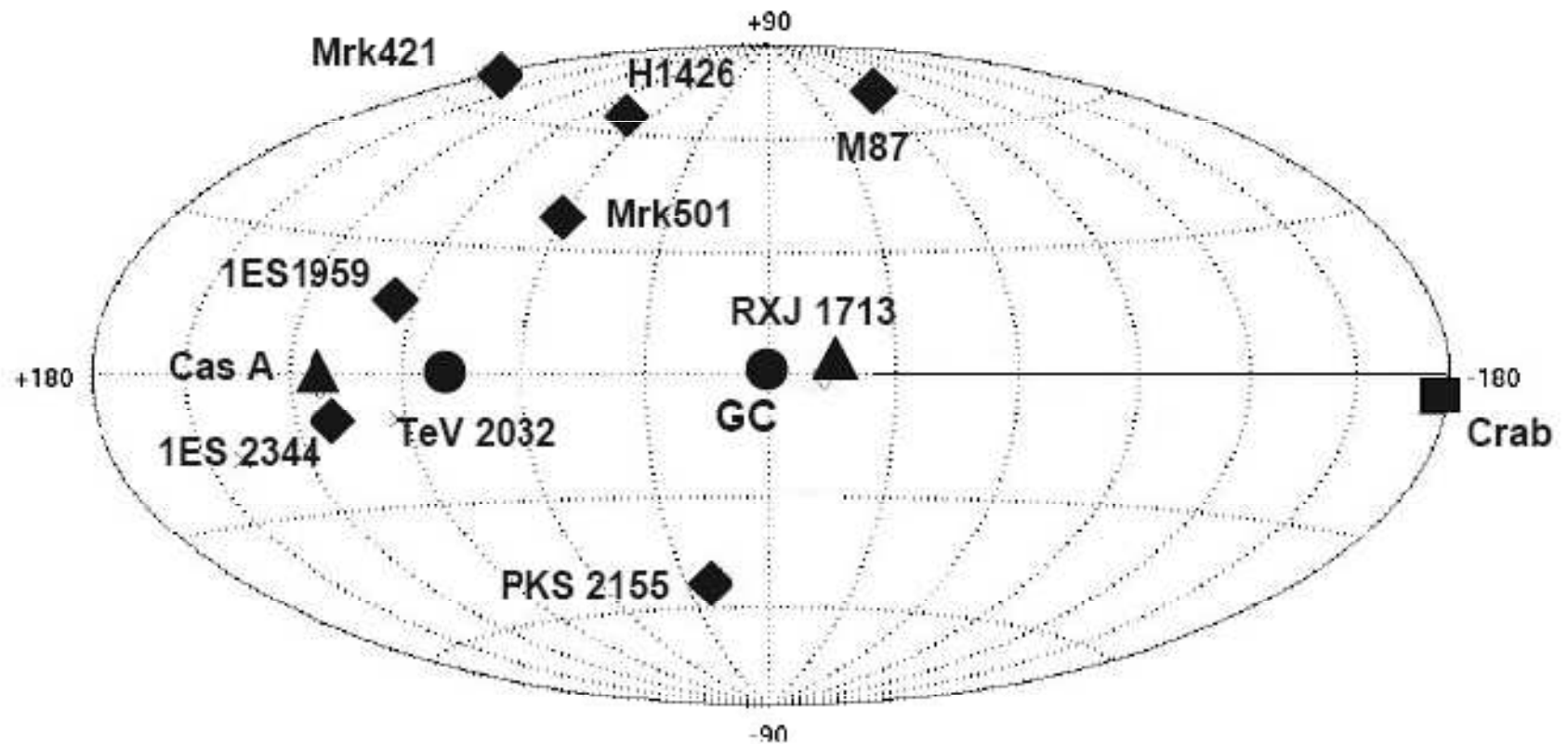
- Tipicamente i rivelatori su satellite hanno un maggiore campo visivo;
- La ricostruzione dell'energia e' inoltre meno affetta da errori sistematici;
- D'altra parte i rivelatori a terra sono gli unici in grado di rivelare i γ di energie veramente estreme;



Il cielo dei gamma di altissima energia nel 1995



Il cielo dei gamma di altissima energia nel 2003



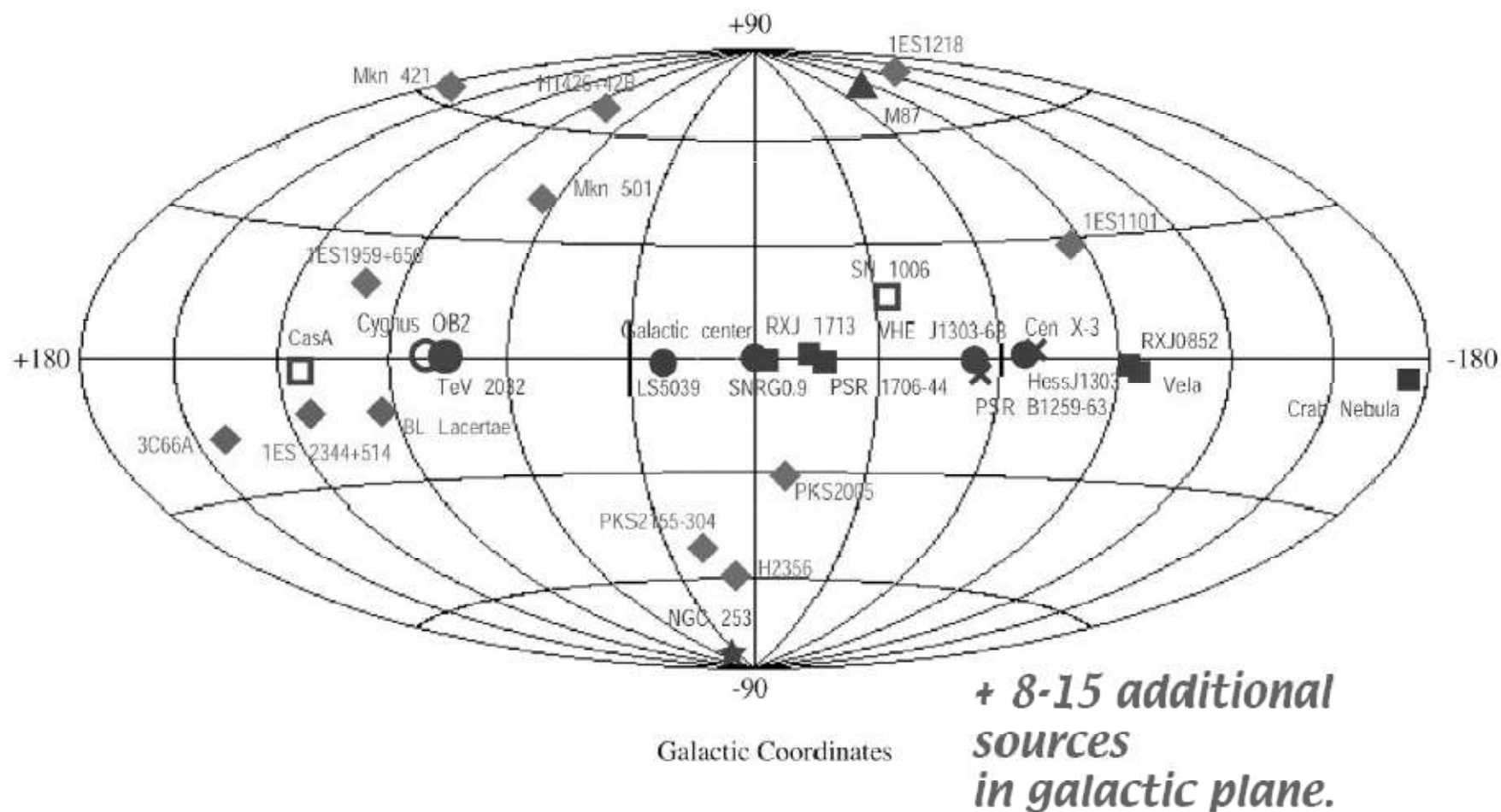
■ Pulsar Nebula

◆ AGN

▲ SNR

● Other, UNID

Il cielo dei gamma di altissima energia nel 2005



- | | | | |
|--------------------|------------------|----------------------|--------------------|
| ■ = Pulsar/Plerion | □ = SNR | ★ = Starburst galaxy | ○ = OB association |
| ◆ = AGN (BL Lac) | ▲ = Radio galaxy | ✕ = XRB | ● = Undetermined |

Neutrini cosmici di altissima energia

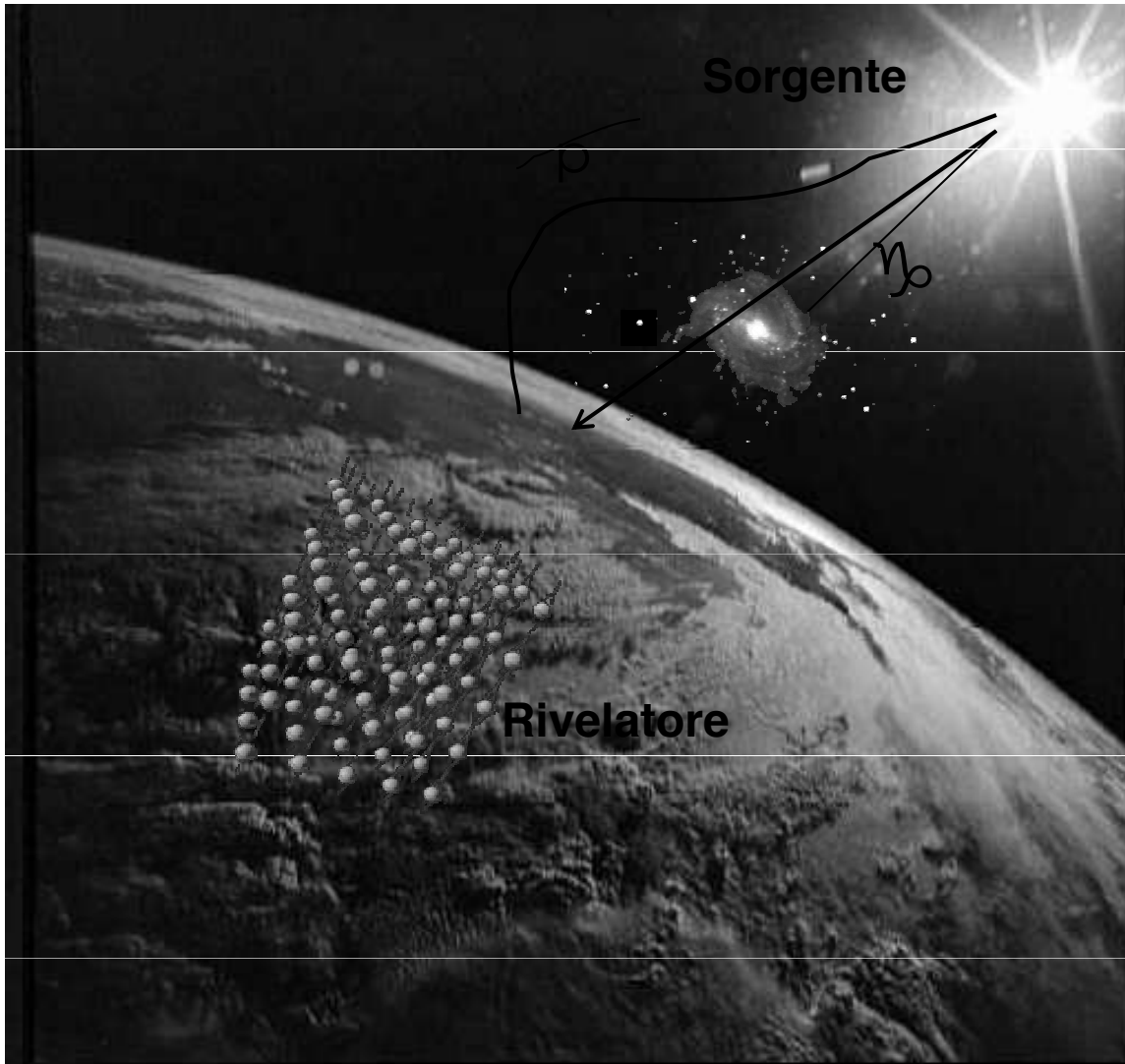
I neutrini cosmici di altissima energia ($E > 1 \text{ TeV}$): da dove vengono?

- **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;
- **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 $\pi^\pm$ 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 pressocché' 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;

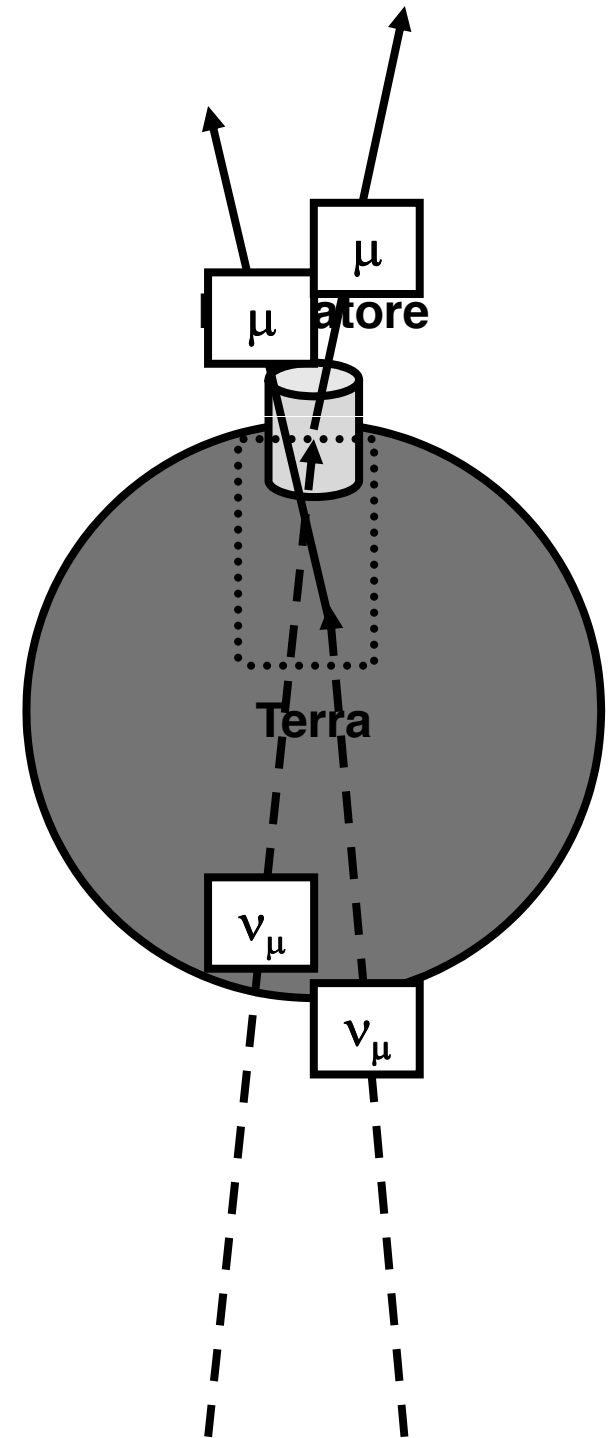
$$\theta_{\mu} = \frac{1.5^{\circ}}{\sqrt{E_{\mu} (\text{TeV})}}$$

- 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:

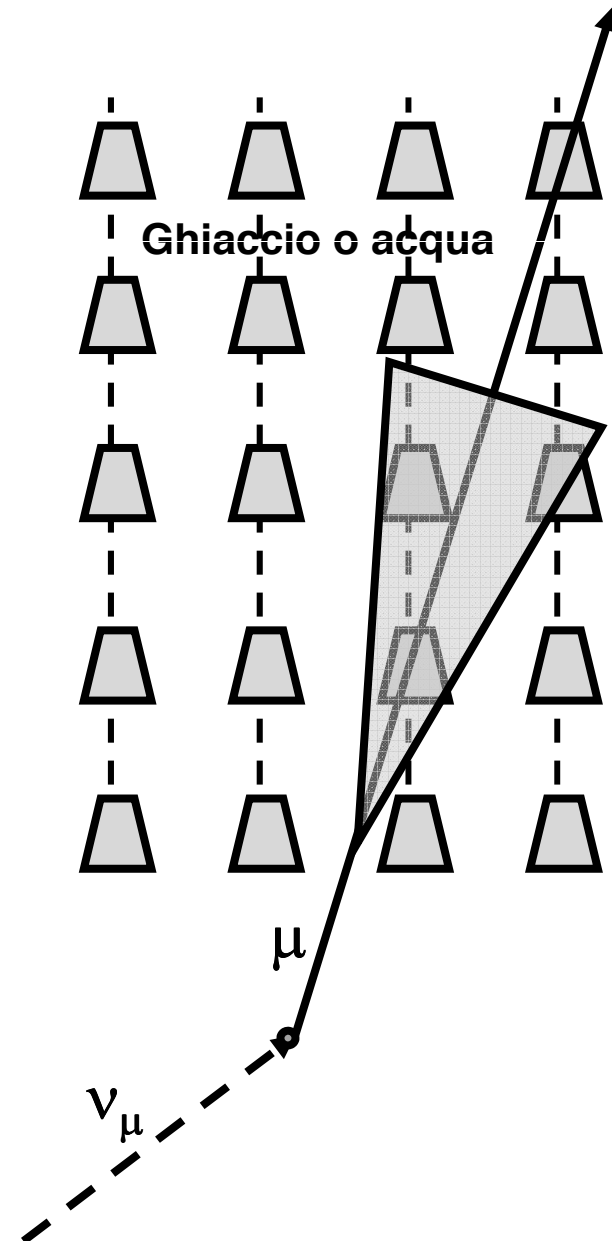
$$R_{\mu} = 2.5 \ln \left(2 \cdot \frac{E_{\mu}}{1 \text{ TeV}} + 1 \right) \text{ Km}$$

- Come al solito stiamo parlando di eventi rari → bisogna avere rivelatori con massa grande;
- N.B.: il muone uscente ha un range grande $\sim$ 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;



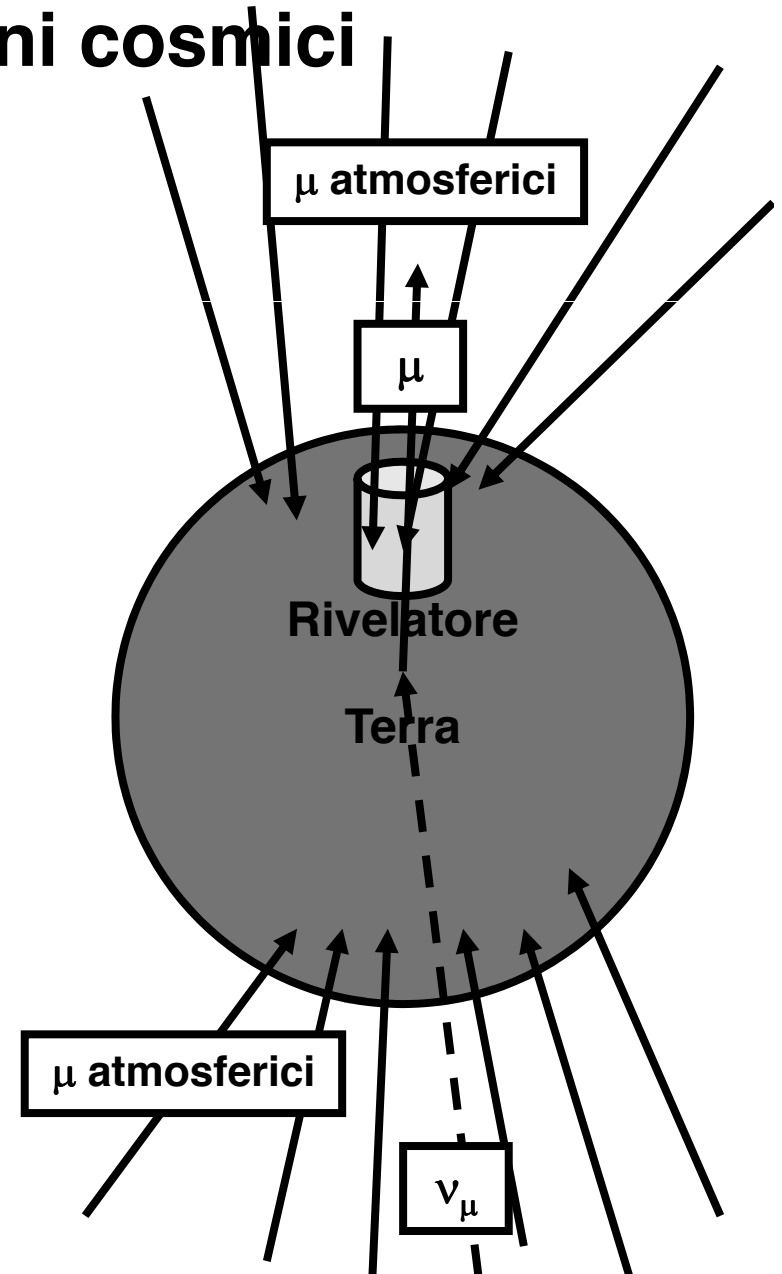
Come si rivelano i neutrini di altissima energia?

- 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

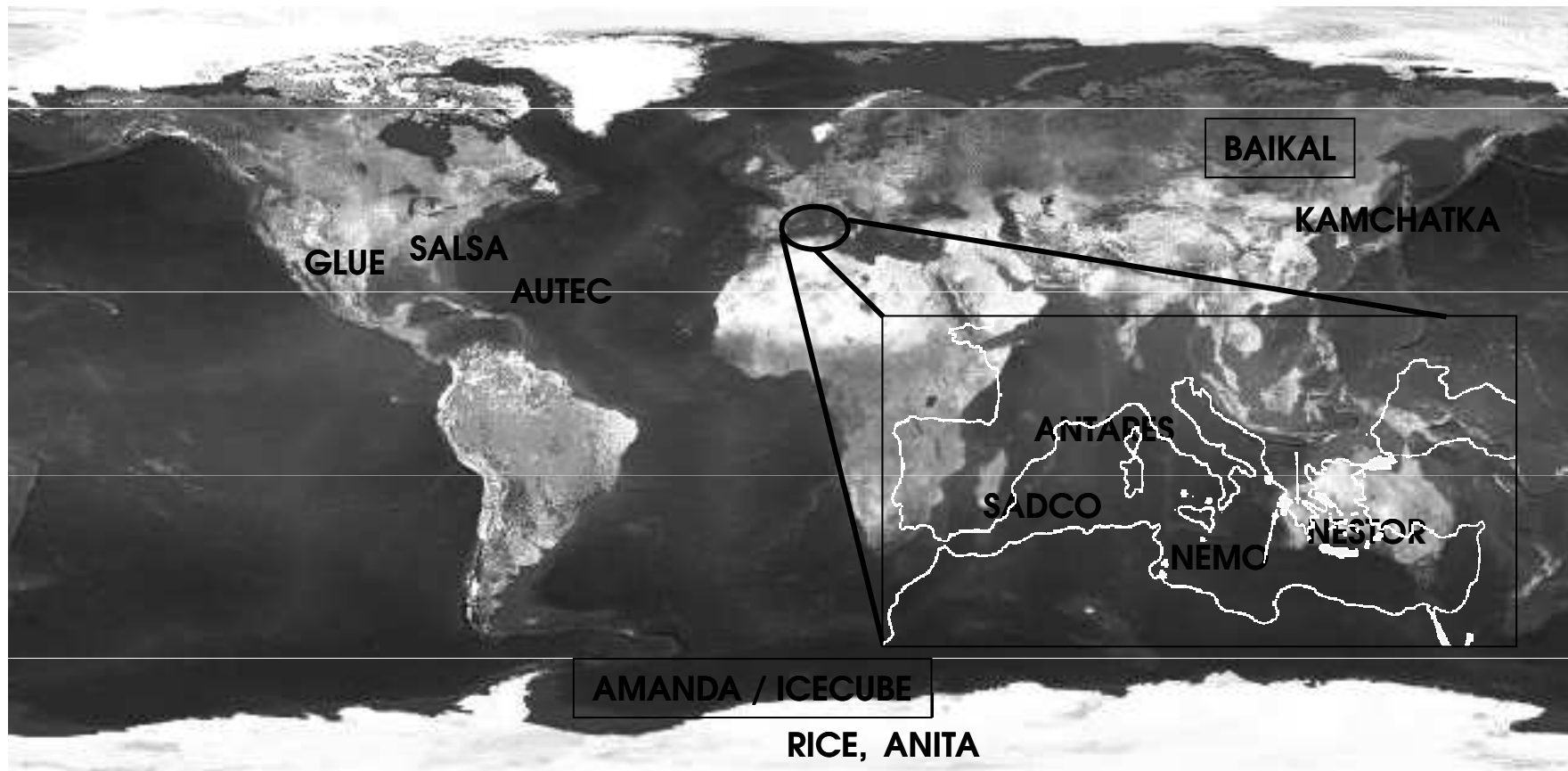
- Stiamo parlando di rivelatori di grandi proporzioni: ciascuna stringa di fototubi puo' raggiungere, a seconda del progetto, anche 1 Km di lunghezza!
- Due parametri sono fondamentali per la riuscita di un esperimento di questo tipo:
 - **Lunghezza di attenuazione della luce nel mezzo (L_{att})** : 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

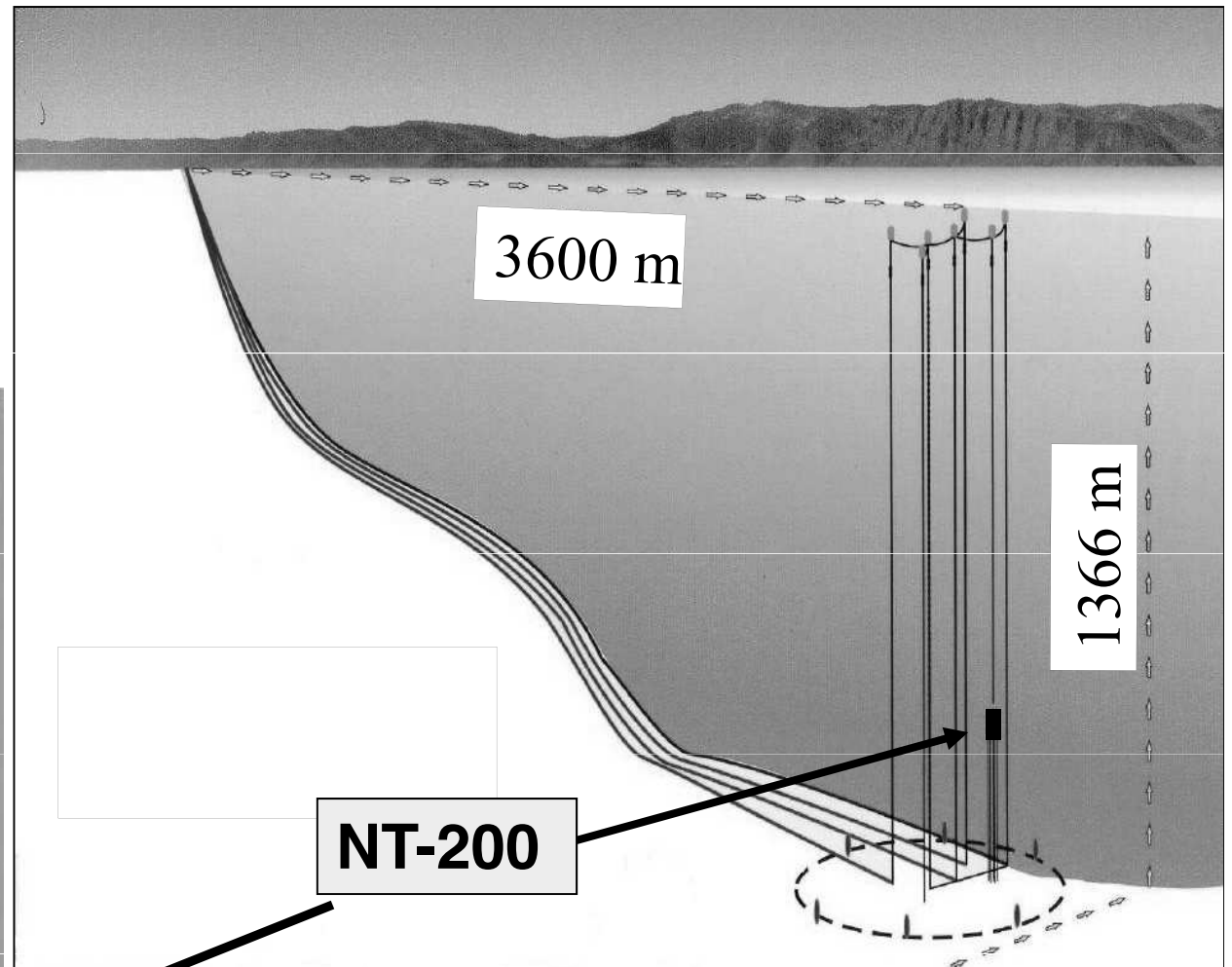
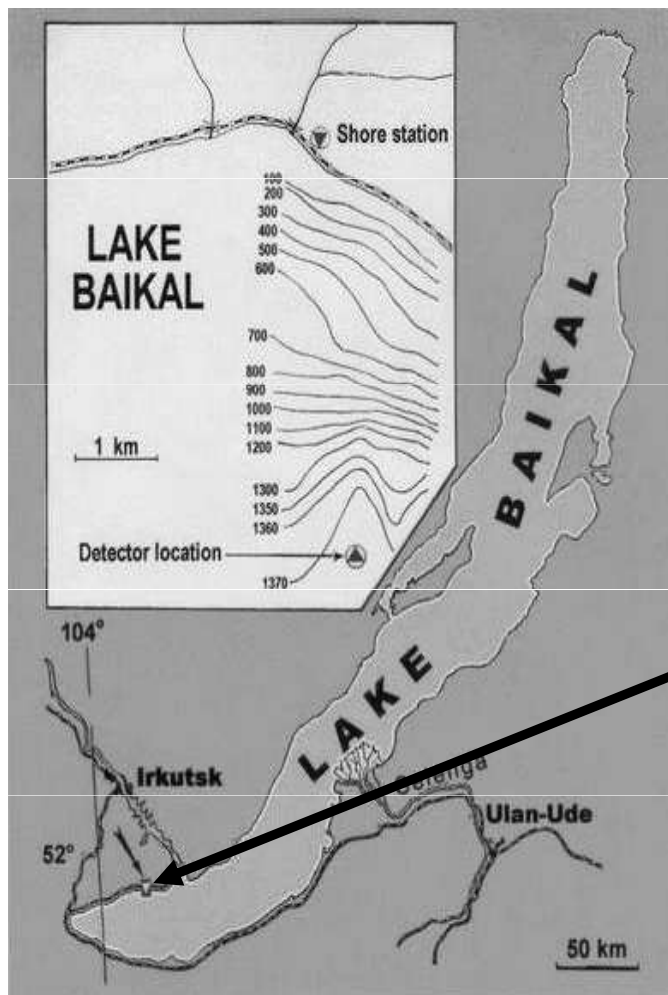


CERENKOV
RADIO
ACUSTICI



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

L'esperimento nel lago Baikal (Siberia)



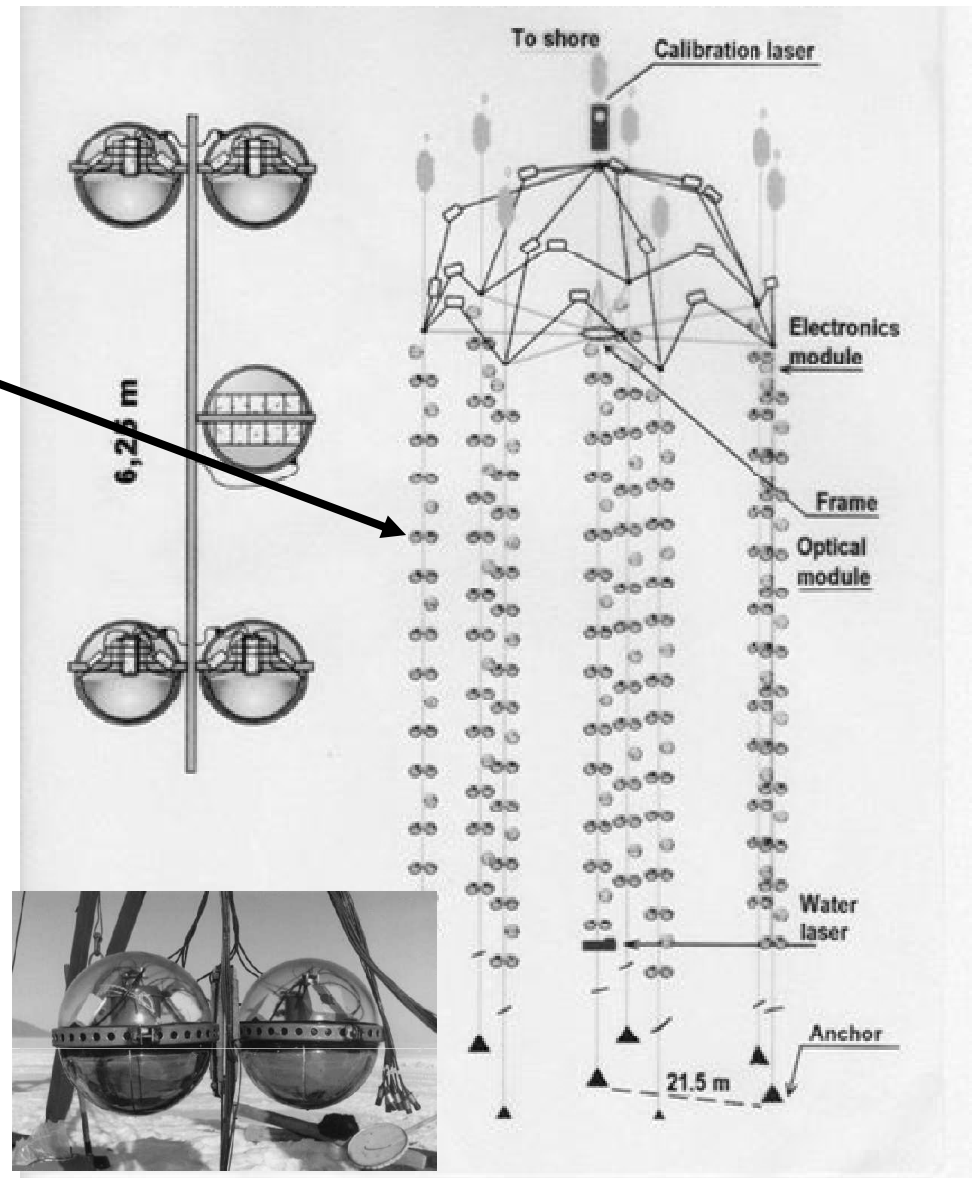
- L'istallazione e' avvenuta quando il lago era ghiacciato;

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

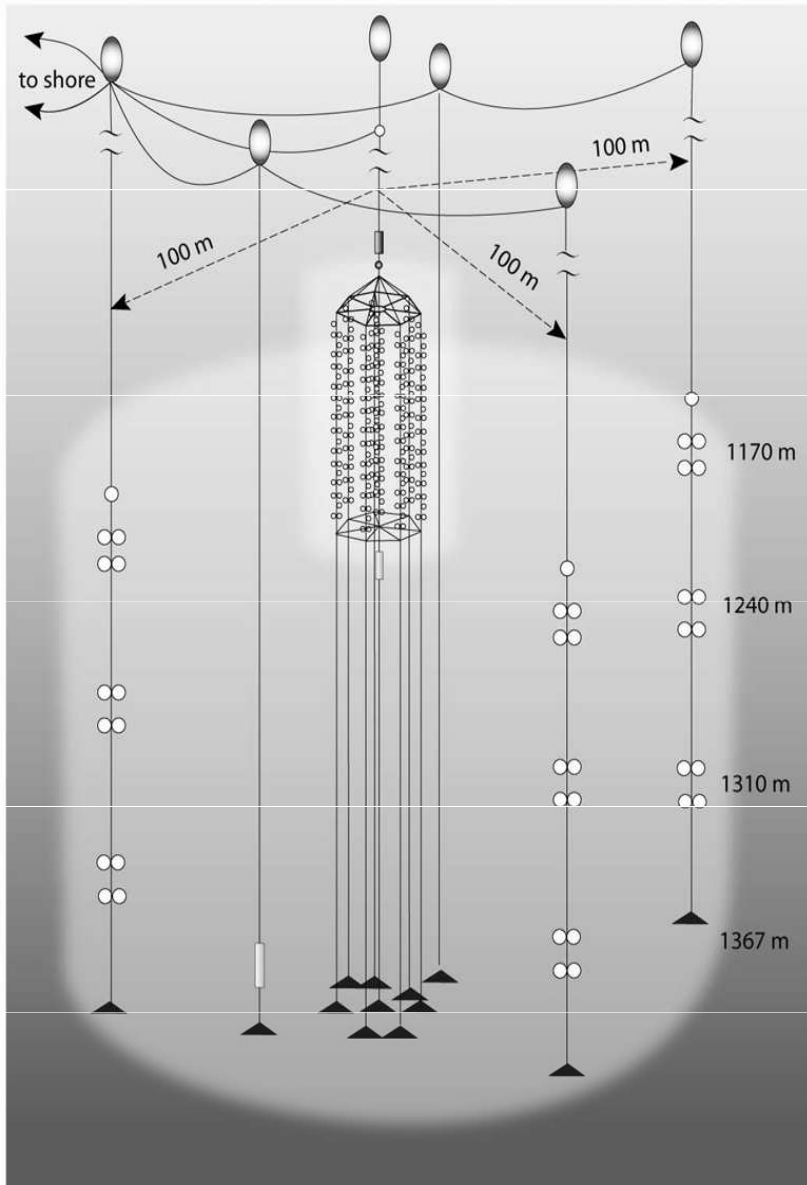


Il rivelatore Baikal

- 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;



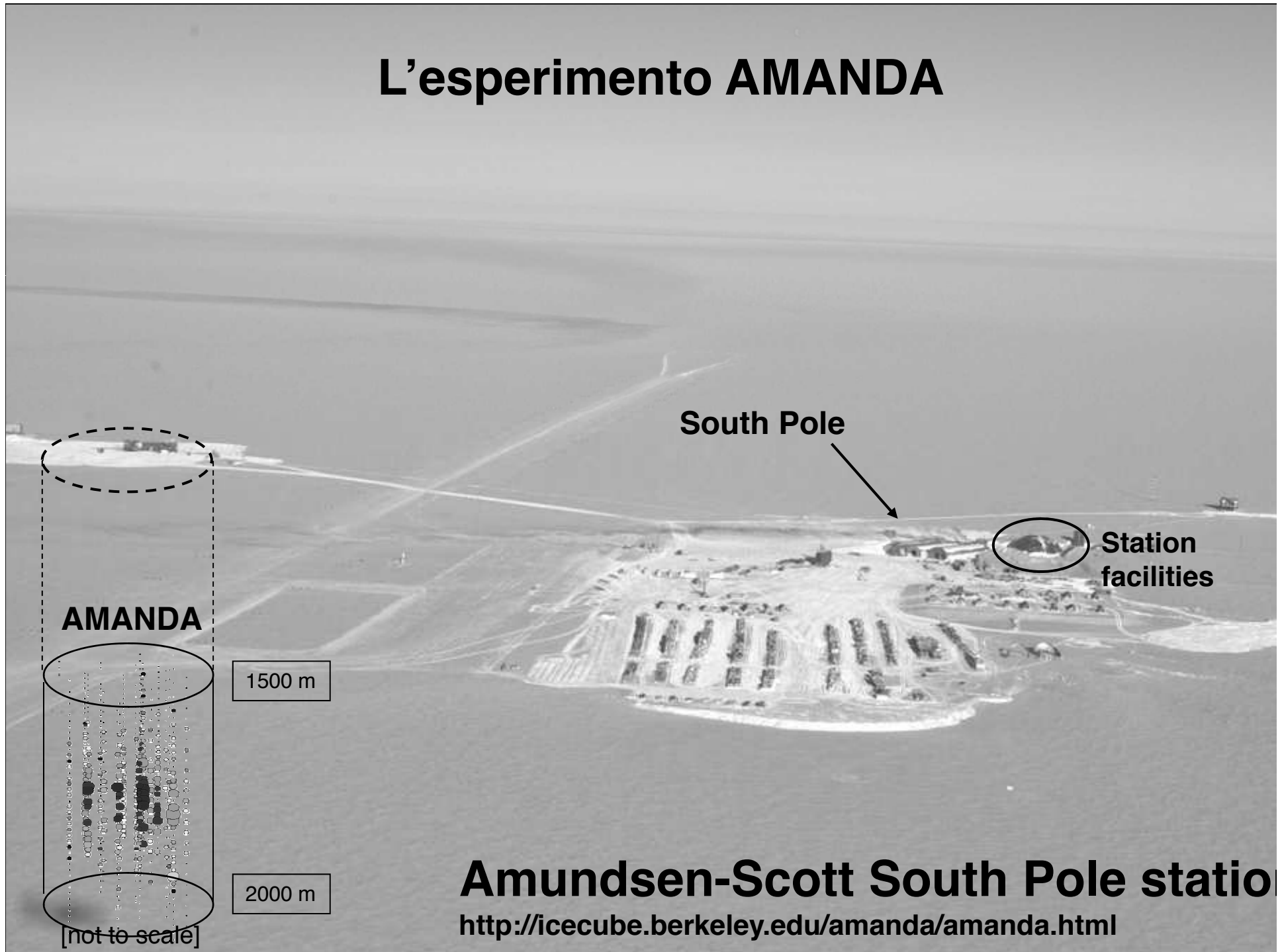
Il rivelatore Baikal (2)



Nel 2005 sono stati fatti dei miglioramenti all'apparato:

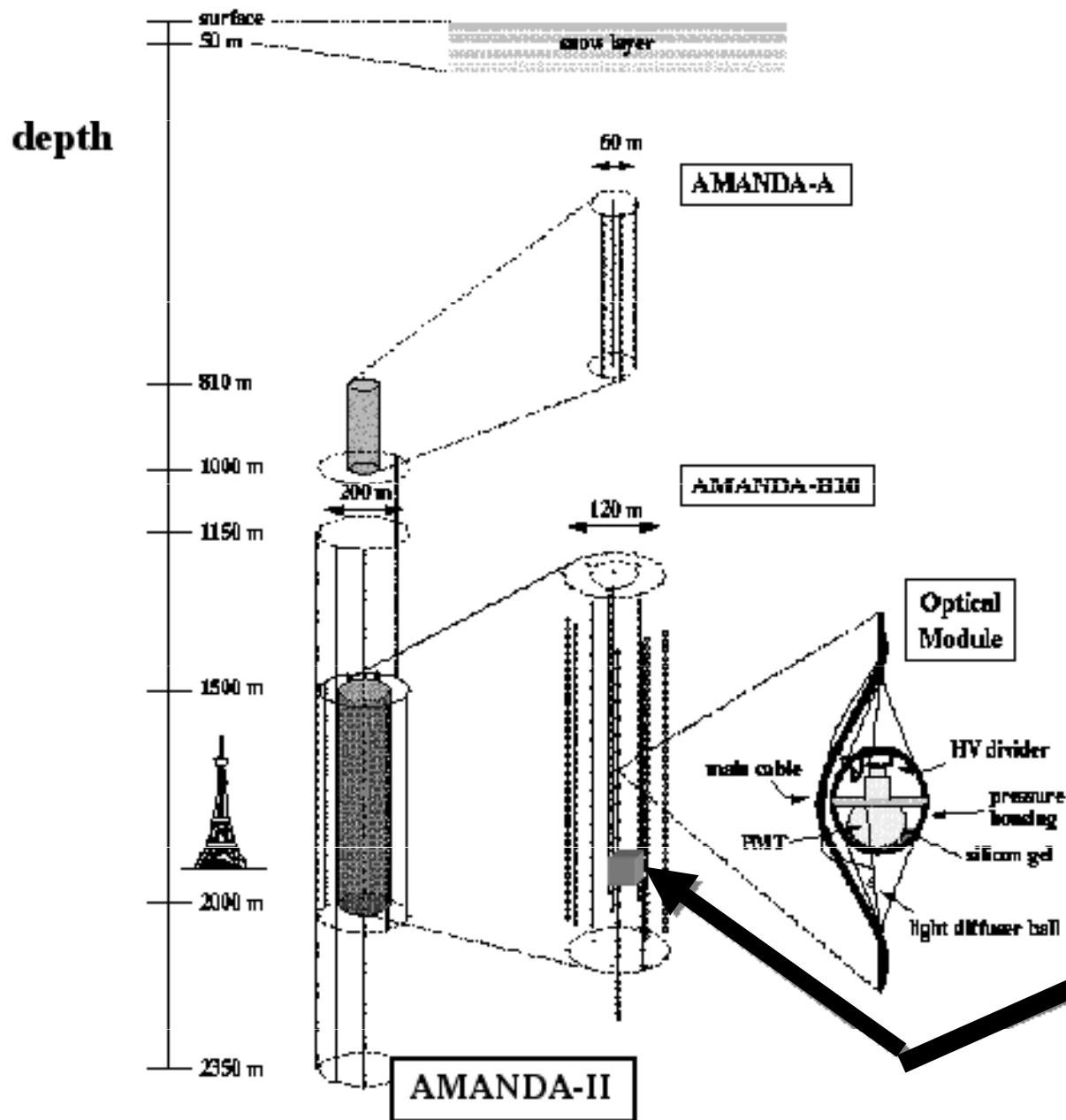
- Sono state aggiunte 3 stringhe di fototubi piu' esterne e con granularita' meno fine: in questo modo allargano il volume sensibile e aumentare l'efficienza per neutrini di energia ultra-elevata;
- Hanno equipaggiato il sistema con un laser per fare la temporizzazione dei fototubi: in pratica simulano 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



Amundsen-Scott South Pole station

<http://icecube.berkeley.edu/amanda/amanda.html>



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

Eiffel Tower as comparison

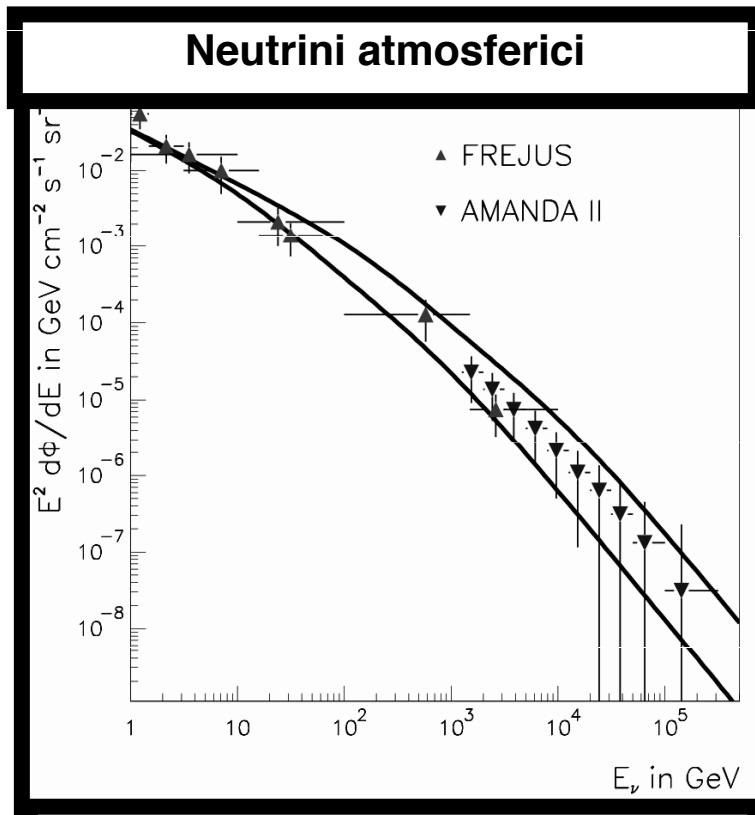
zoomed in on

AMANDA-A (top)

zoomed in on one

Caratteristiche di AMANDA

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



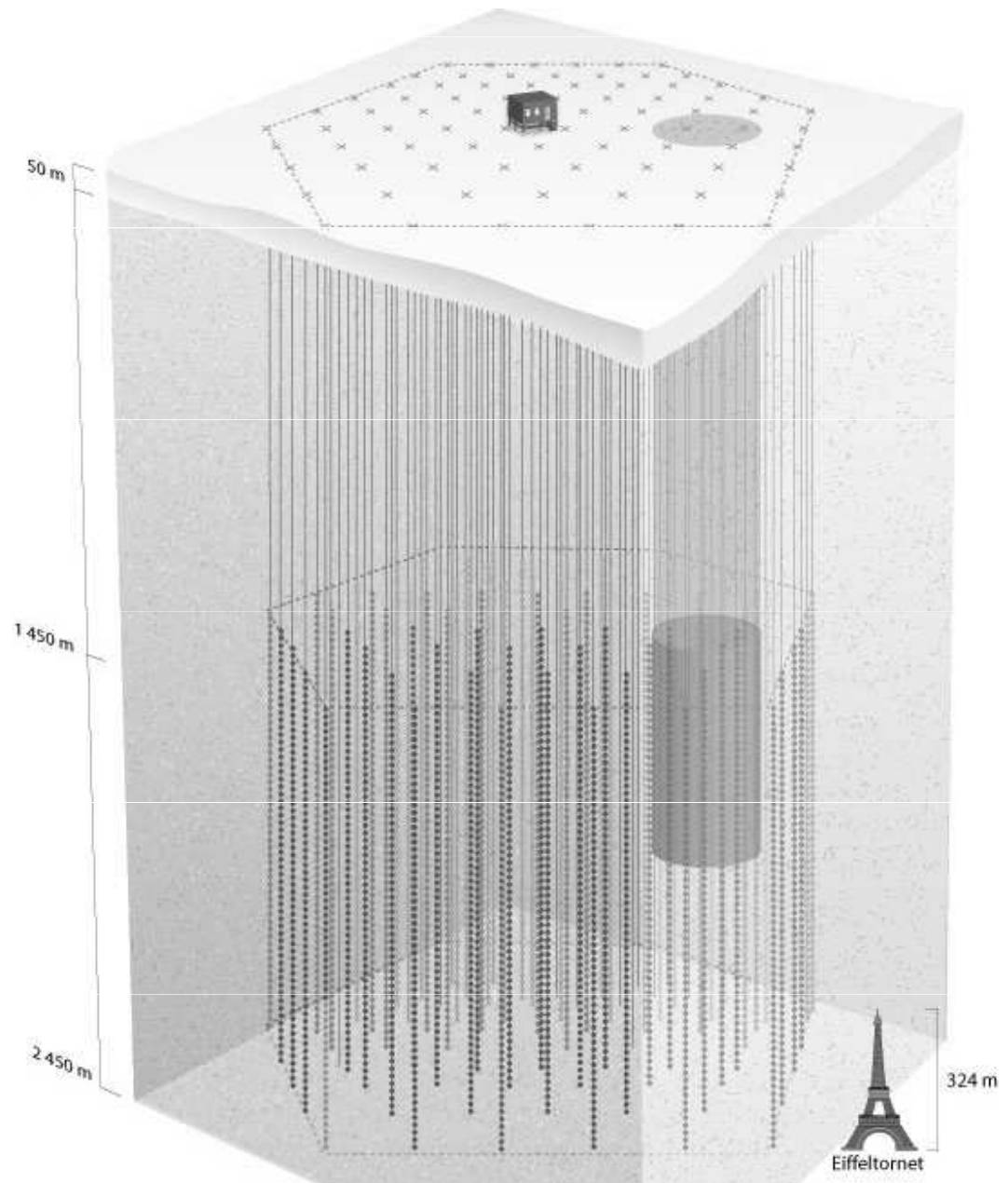
Il flusso misurato e' compatibile con le previsioni teoriche sul flusso di ν atmosferici;

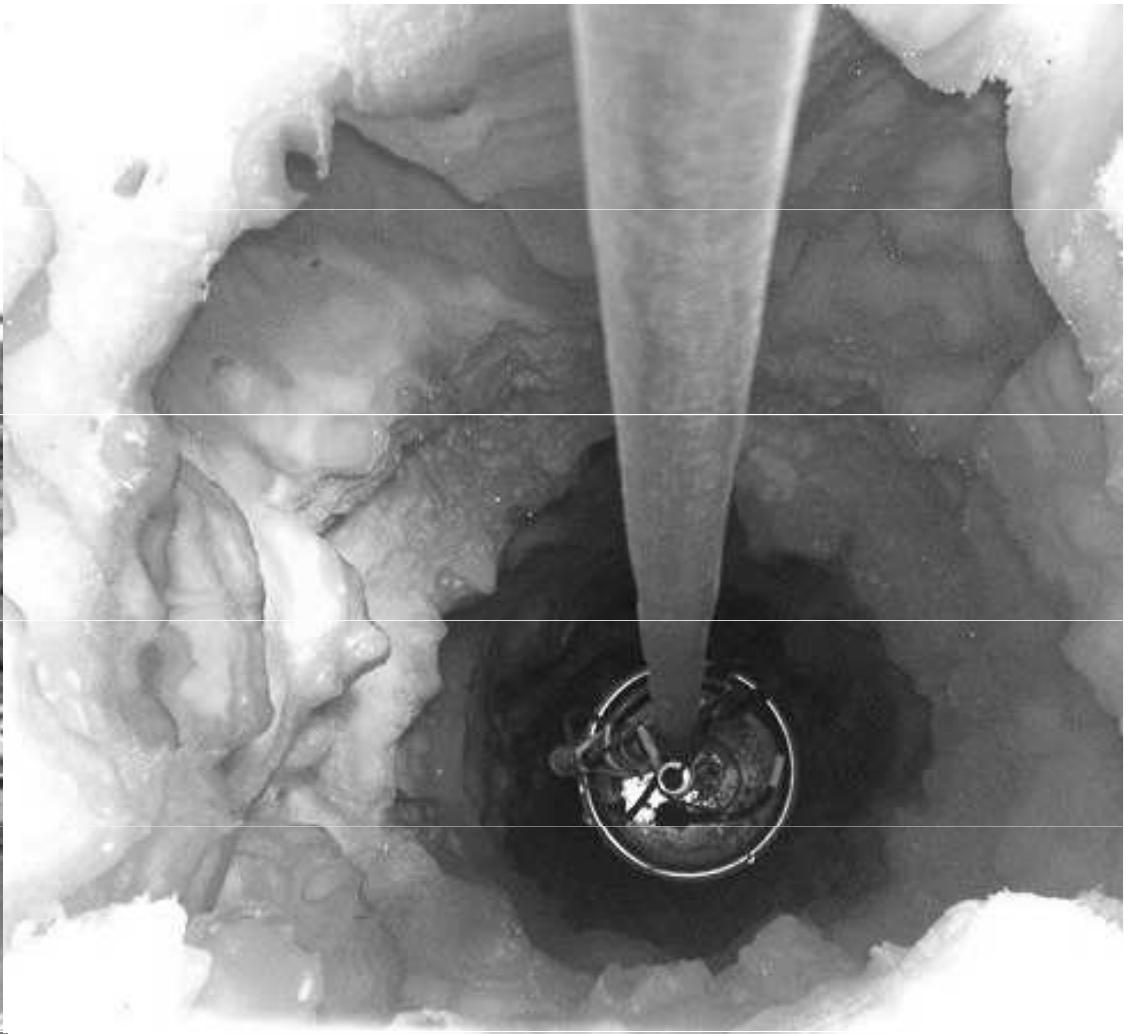
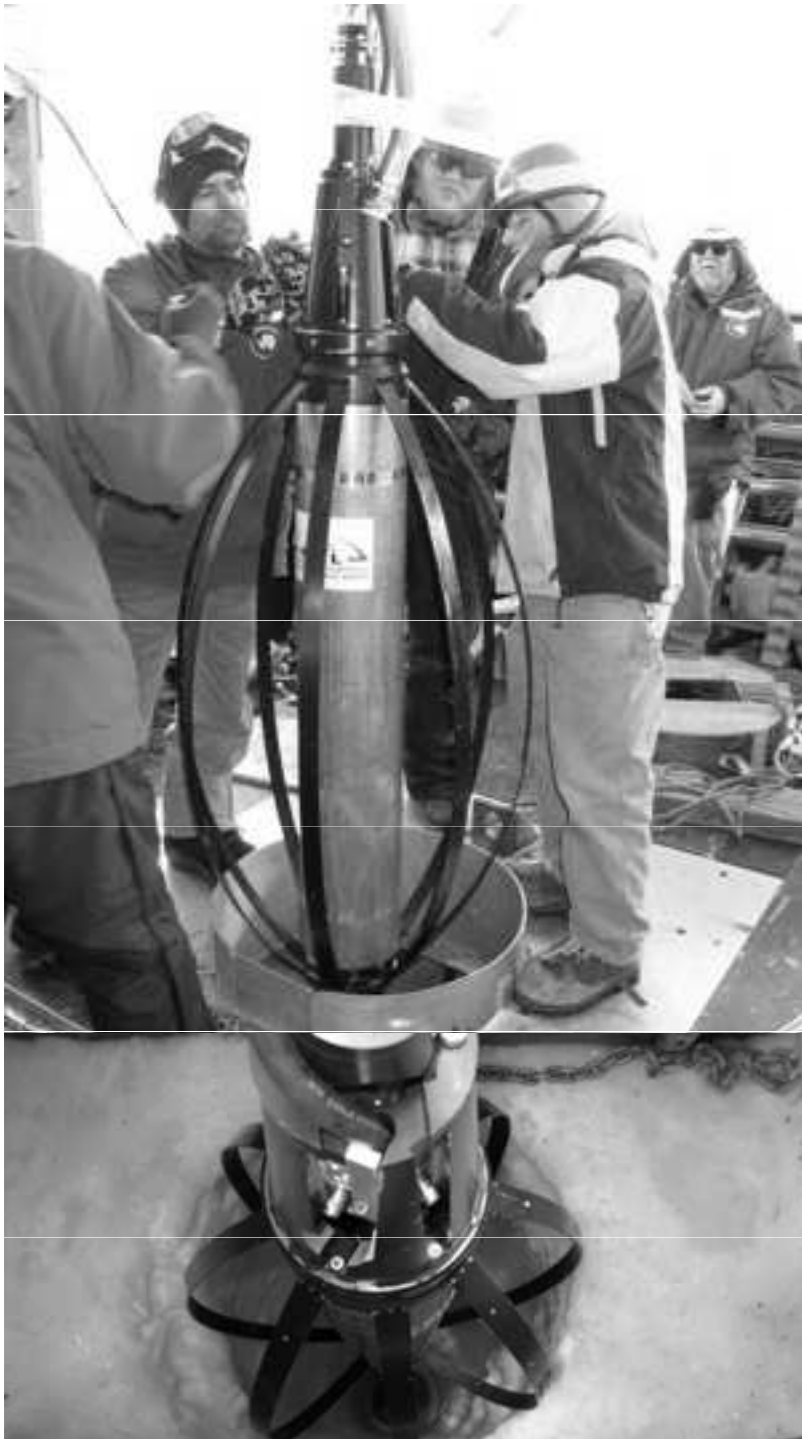
Energia	Produzione
MeV	Supernove
GeV-TeV	Atmosfera, Annichilazione di Wimps, Centro della galassia
TeV_EeV	μ Quasars, SN remnant AGN,GRB

Per ora, non hanno 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;



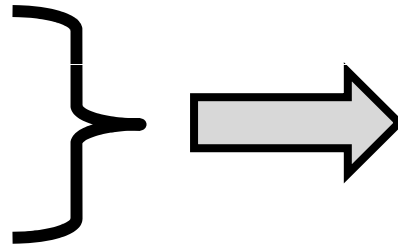


- La prima stringa di ICECUBE e' stata calata a gennaio 2005;
- L'intero rivelatore dovrebbe esser istallato per il 2010;
- Intanto prende dati!

Progetti per rivelatori nel Mediterraneo

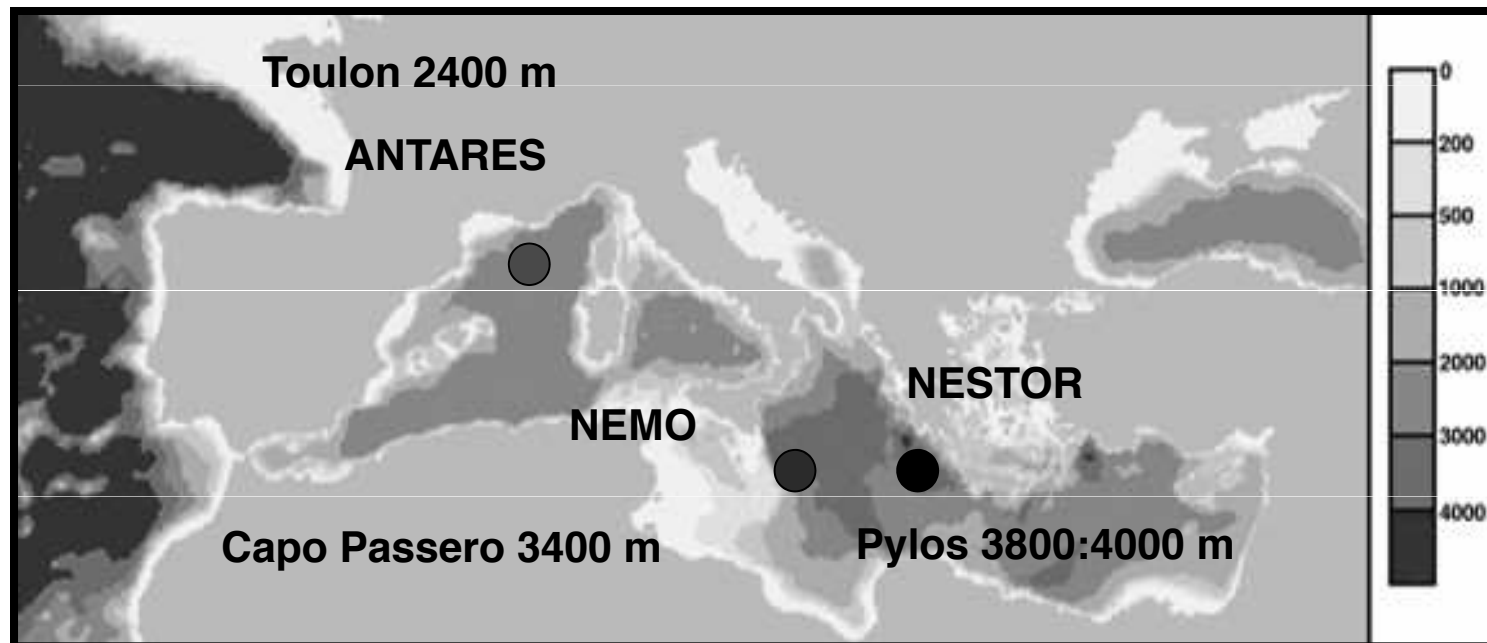
- **3 progetti**

- ANTARES
- NESTOR
- NEMO



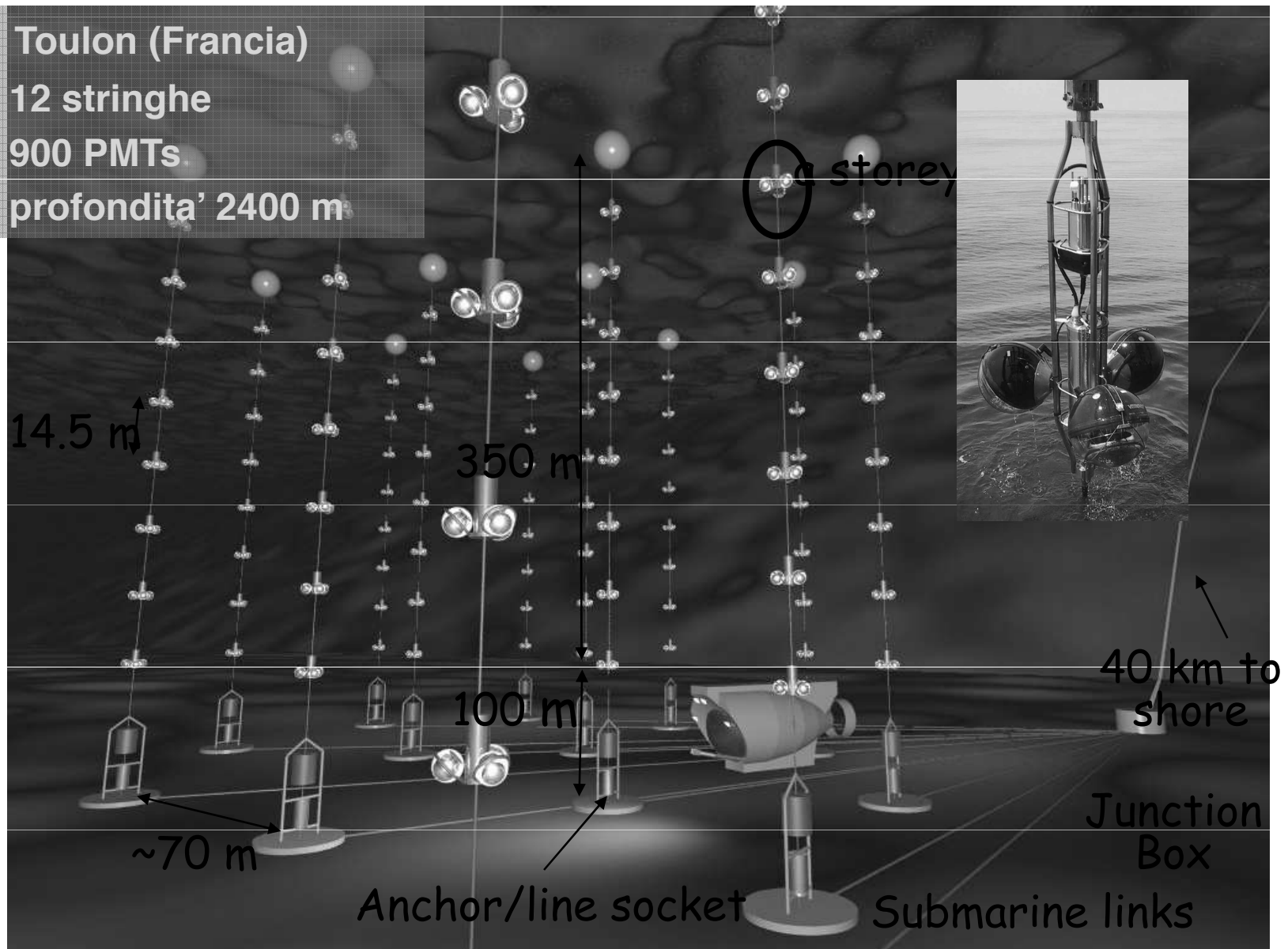
**Potrebbero in futuro
convergere nel progetto
KM3NeT**

**Complementare ad
IceCube, perche' situato
nell'emisfero Nord**



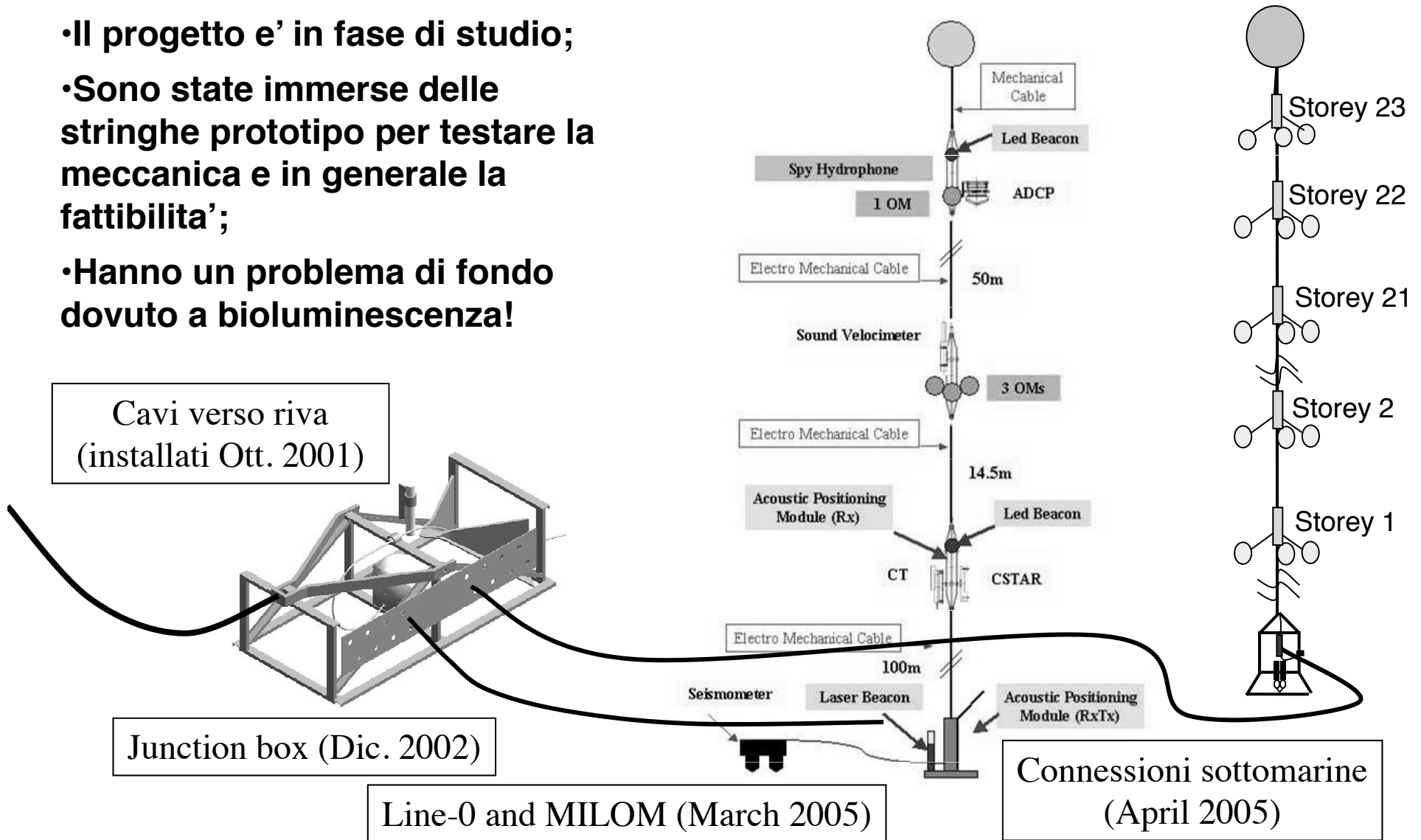
Il progetto ANTARES

- 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!



Cavi verso riva
installati Ott. 2001)

Junction box (Dic. 2002)

Line-0 and MILOM (March 2005)

Conessioni sottomarine (April 2005)

Il sito di ANTARES



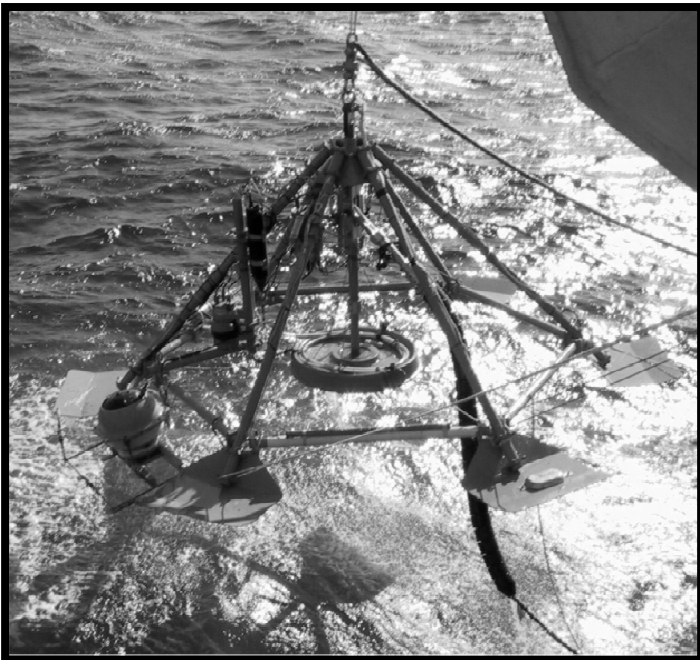
**Sottomarino per l'istallazione
subacquea**



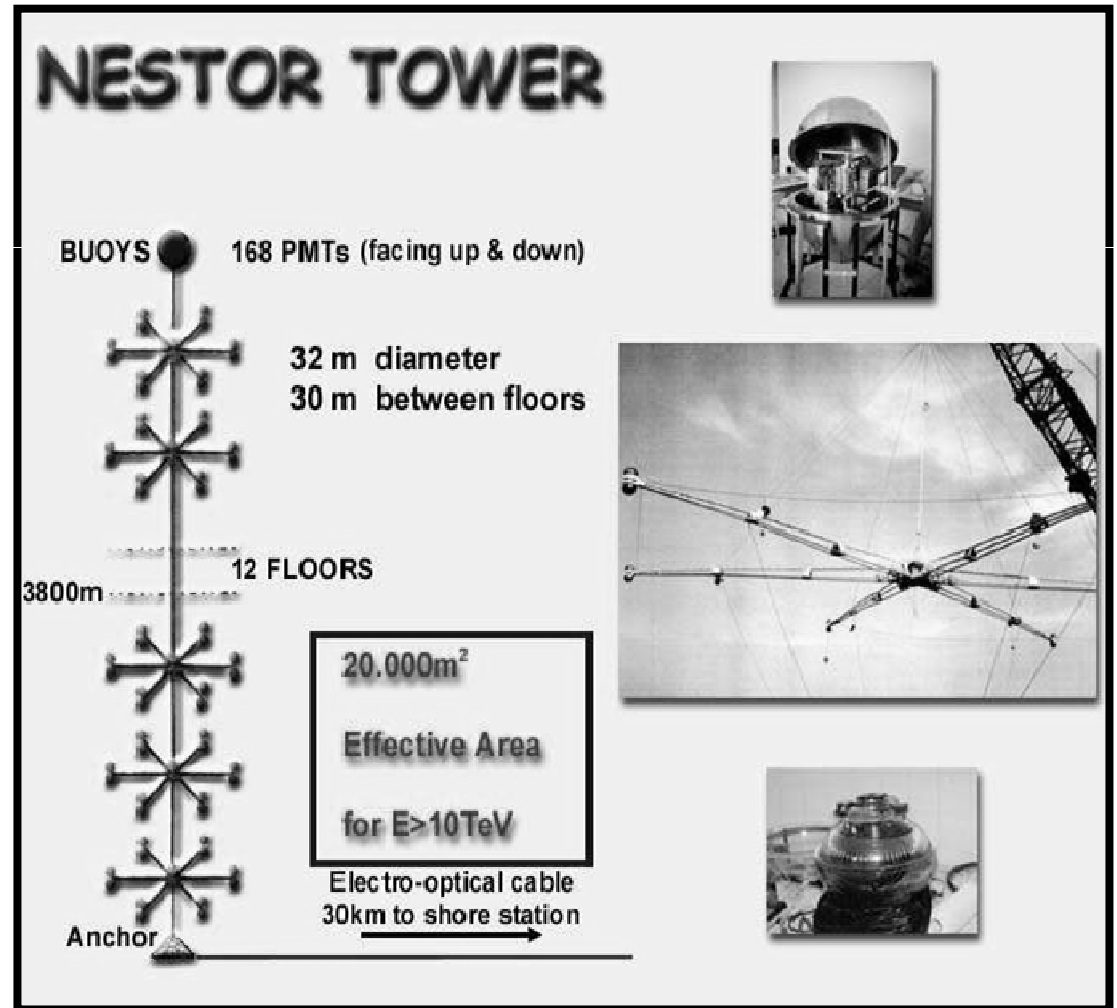
**Junction box a 2400 m di
profondita'**

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;



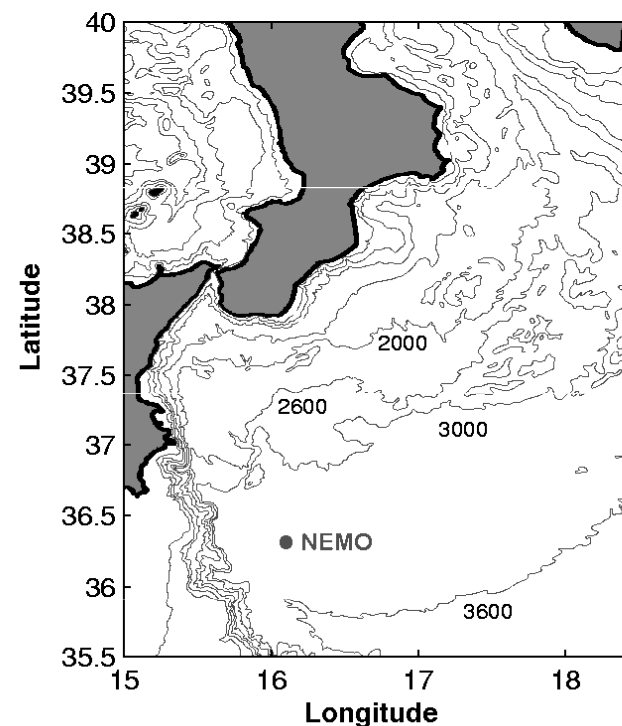
<http://www.nestor.org.gr/>



- 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;



<http://nemoweb.lns.infn.it/>

Il progetto KM3NeT

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

Le caratteristiche di questo rivelatore saranno:

- 1. Si svolgera' nel Mediterraneo (il sito dovrebbe essere scelto in base ai risultati ottenuti dai 3 progetti in questi anni di test);**
- 2. Avra' 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. Si prevede possa cominciare a prendere dati ~ 2012 ;**
- 6. N.B.: risultera' complementare ad IceCube, in quanto, essendo situato nell'emisfero Nord e' sensibile a neutrini provenienti dall'emisfero sud;**

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

