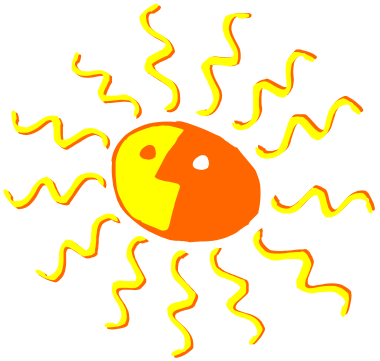


Lezione n. 7
I raggi cosmici: raggi gamma e neutrini

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?);**

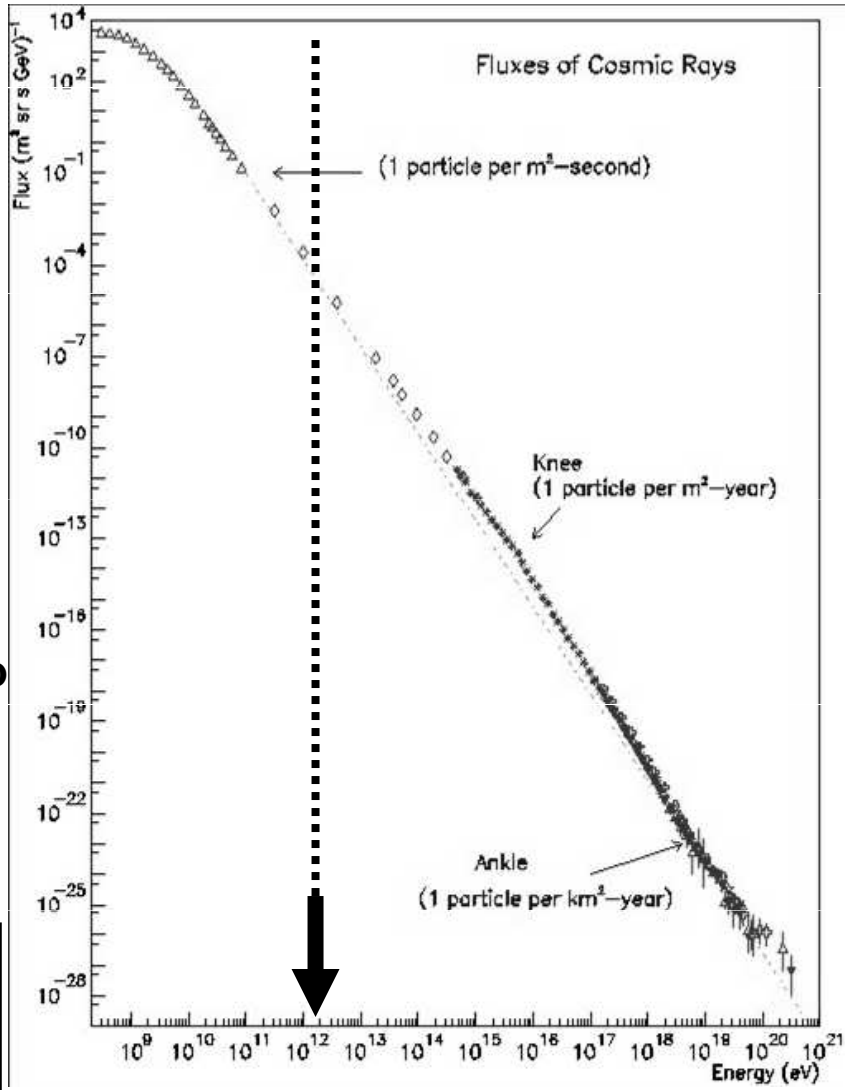
- **La componente di γ in questo flusso e' piuttosto limitata (< 0.1 %);**
- **D'altra parte i γ sono interessanti perche' nel loro percorso verso la terra non subiscono deviazioni a causa dei campi magnetici interstellari e intergalattici;**
- **Per E < 1TeV i fotoni viaggiano pressocche' indisturbati 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 <1TeV

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

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

• Per questo motivo i γ piu' energetici (E>100TeV) ci permettono di esplorare solo una regione relativamente vicina a noi (d< 100 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 ~ 10^4-10^{10} eV (10keV- 50GeV);
  - Very High Energy γ (VHE): E ~ 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 sciami 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

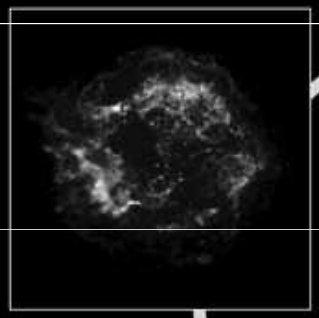
SORGENTI GALATTICHE

- **Emissione diffusa dovuta a interazione dei raggi cosmici con i gas e i fotoni interstellari (per es. p + p → p + p + π_0 con π_0 → γ+γ);**
- **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

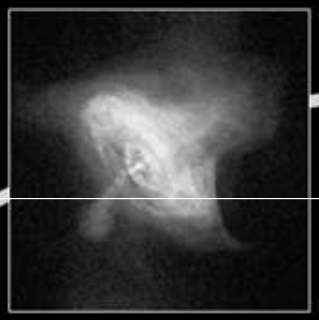
- **Emissione diffusa di origine ignota: potrebbe anche essere dovuta a sorgenti specifiche, non risolte dagli esperimenti attuali;**
- **AGN (Nulcei Galattici Attivi): sono buchi neri molto massivi (~ 10^8 $M_\odot$); spesso producono due jet relativistici diametralmente opposti; si dicono *blazars*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

Il programma di fisica dell'astronomia gamma

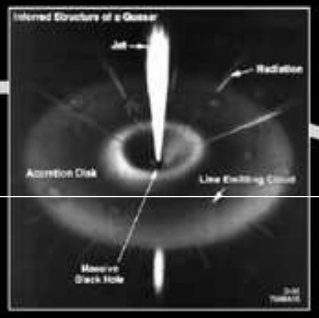


SNRs

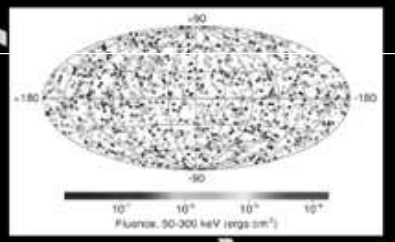
Origin of Cosmic Rays



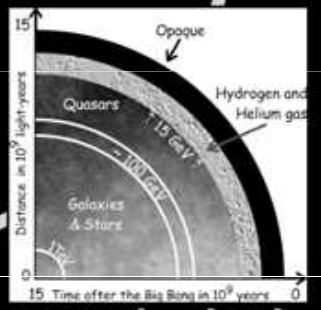
Pulsars



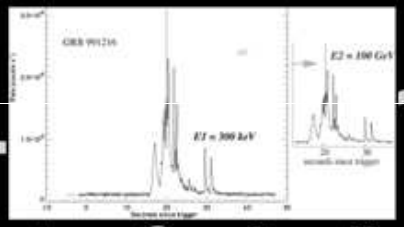
AGNs



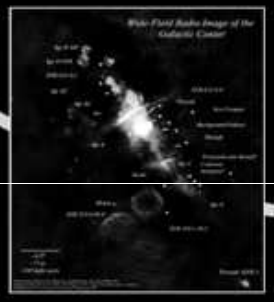
GRBs



cosmological γ-Ray Horizon



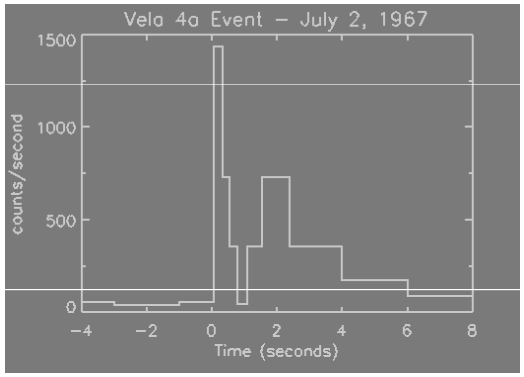
Quantum Gravity effects



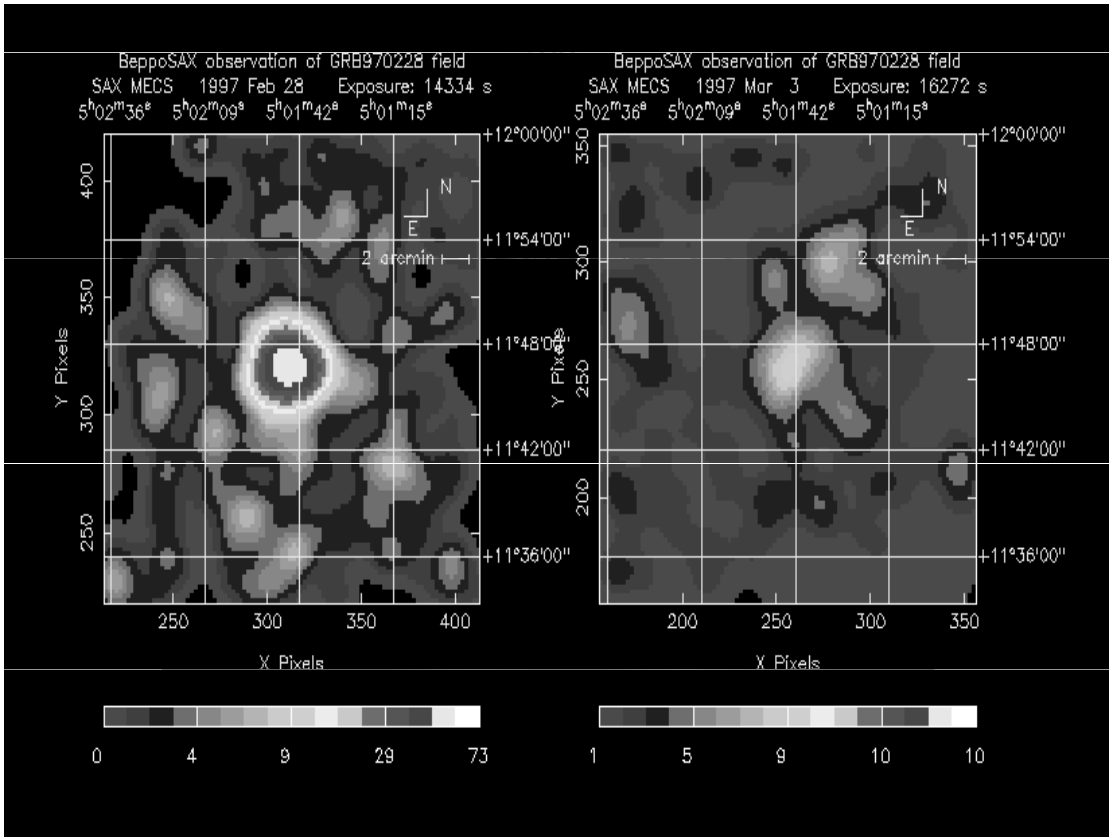
Cold Dark Matter

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~0.8 dimostrando l’origine extra-galattica del GBR;**



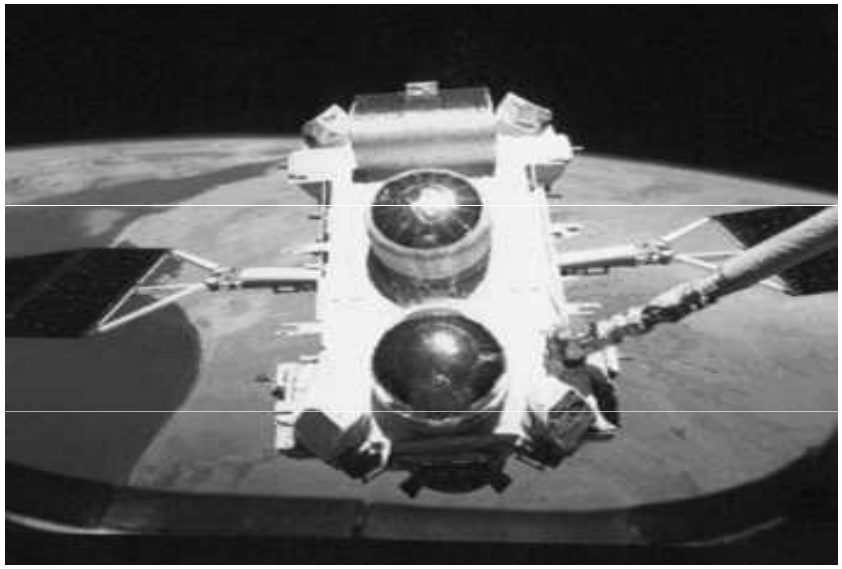
Che cosa genera i Gamma Ray Burst?

- **I GBR sono fra gli eventi piu' energetici del cosmo (E~4x10^{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'esposione;
  - 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)

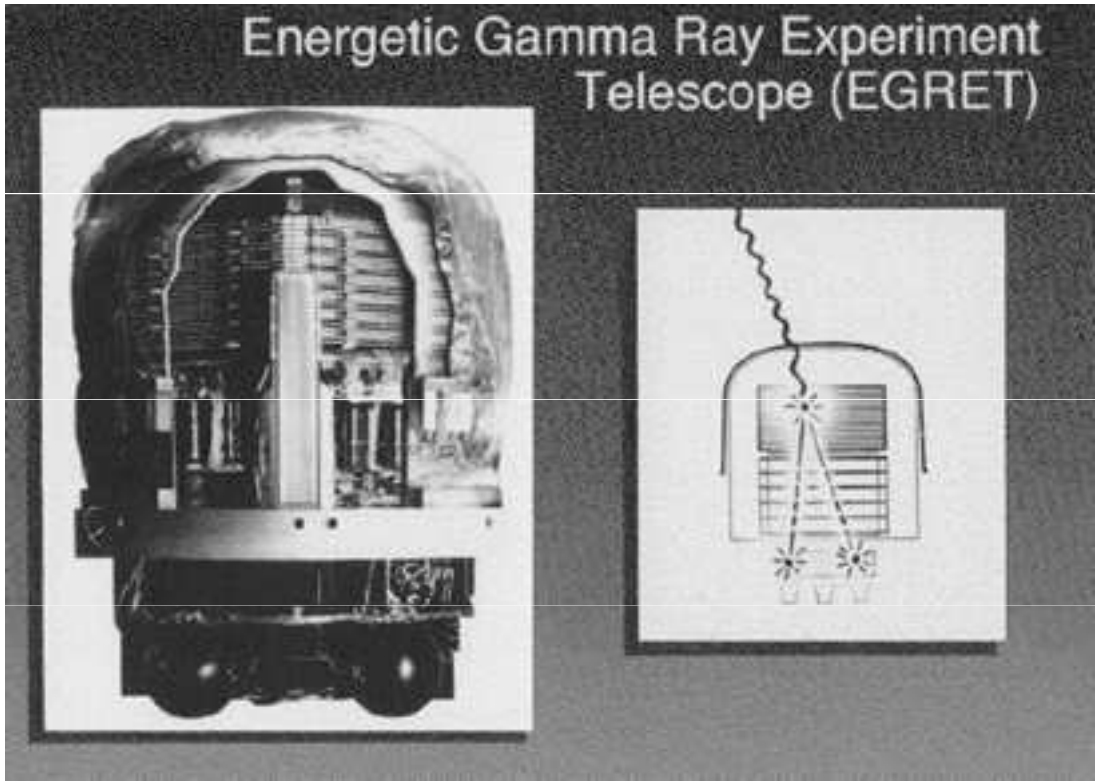
- **La missione CGRO e' durata dal 1991 al 2000 e ha dato un notevole contributo all'astronomia gamma;**
- **E' un grande osservatorio spaziale su satellite che consiste di 4 apparati sperimentali per la rivelazione di γ cosmici: BATSE, OSSE, COMPTEL e EGRET;**
- **I 4 esperimenti erano sensibili a diverse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

1. **BATSE (B**urst **A**nd **T**ransient **S**ource **E**xperiment**) E(0.03 -1.2)MeV**
2. **OSSE (O**riented **S**cintillation **S**pectrometer **E**xperiment**) E(0.06-10)MeV**
3. **COMPTEL (**Imaging **Com**pton **Tel**escope**) E(1-30)MeV**
4. **EGRET (E**nergetic **G**amma-**R**ay **E**xperiment **T**elescope**) E(20-30000)MeV**



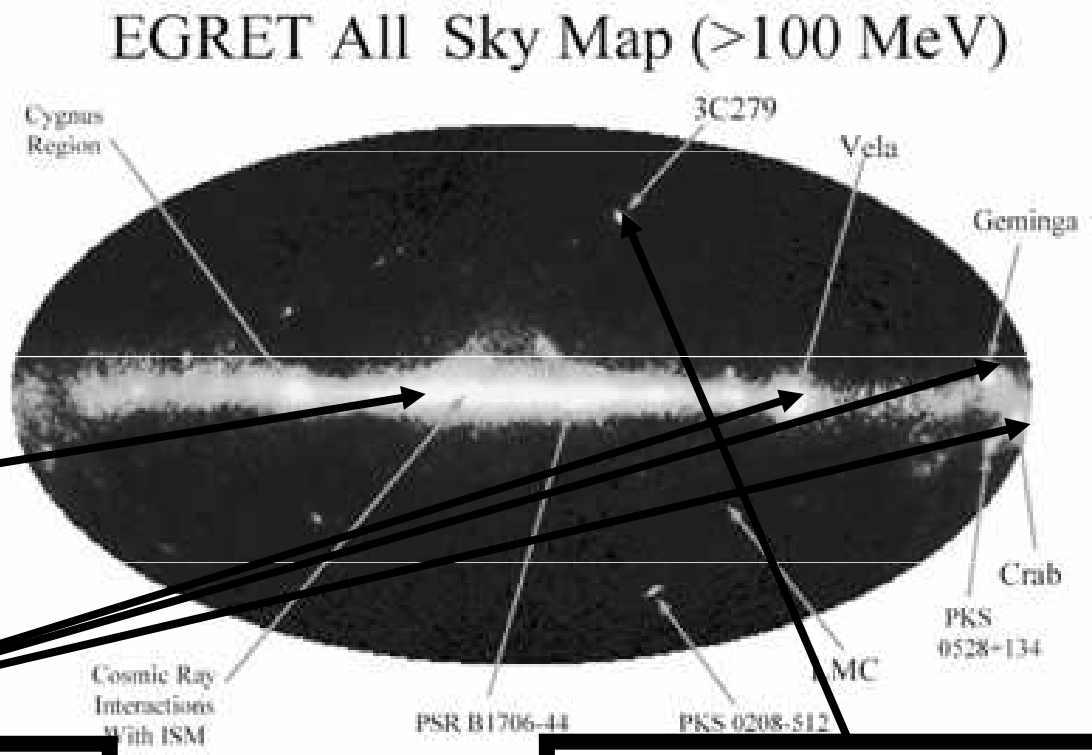
EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope)

- **E' un piccolo calorimetro predisposto per rivelare i γ tramite la produzione di coppie e^+- e^- ;**
- **E (20 MeV - 30 GeV);**
- **$\Delta E/E \sim 20\%$;**
- **$\Delta\theta \sim 1.3^0$ a 1GeV;**
- **$\Delta\theta \sim 0.4^0$ a 10 GeV;**



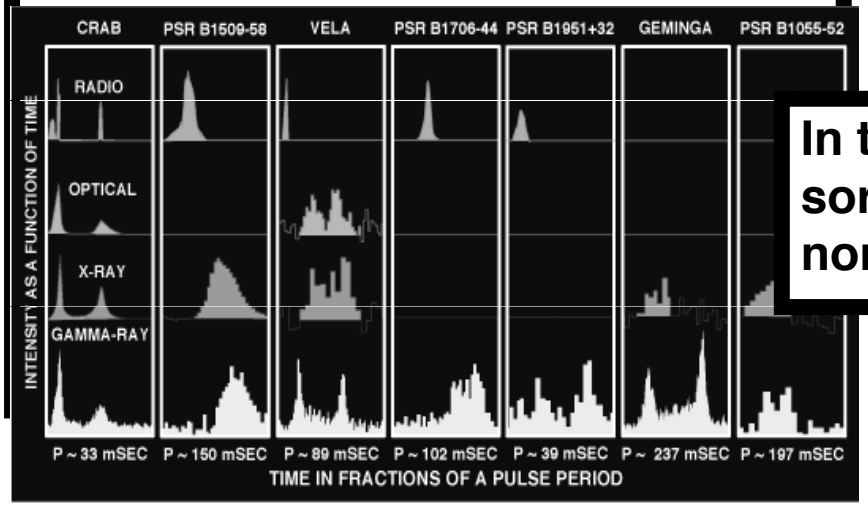
- **Ha permesso l'individuazione di una zona di emissione diffusa di γ corrispondente al piano della galassia e dovuta all'interazione dei raggi cosmici con gas e fotoni interstellari;**
- **Ha anche individuato una emissione diffusa di origine extra-galattica; potrebbero in realta' essere sorgenti non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

Risultati di EGRET



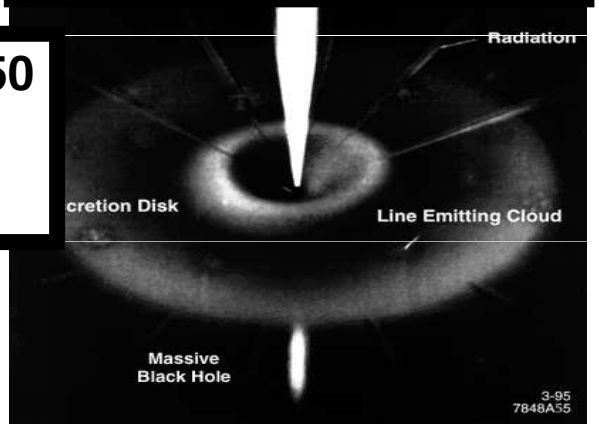
Emissione diffusa dal piano galattico dovuta a interazione dei raggi cosmici con gas interstellari

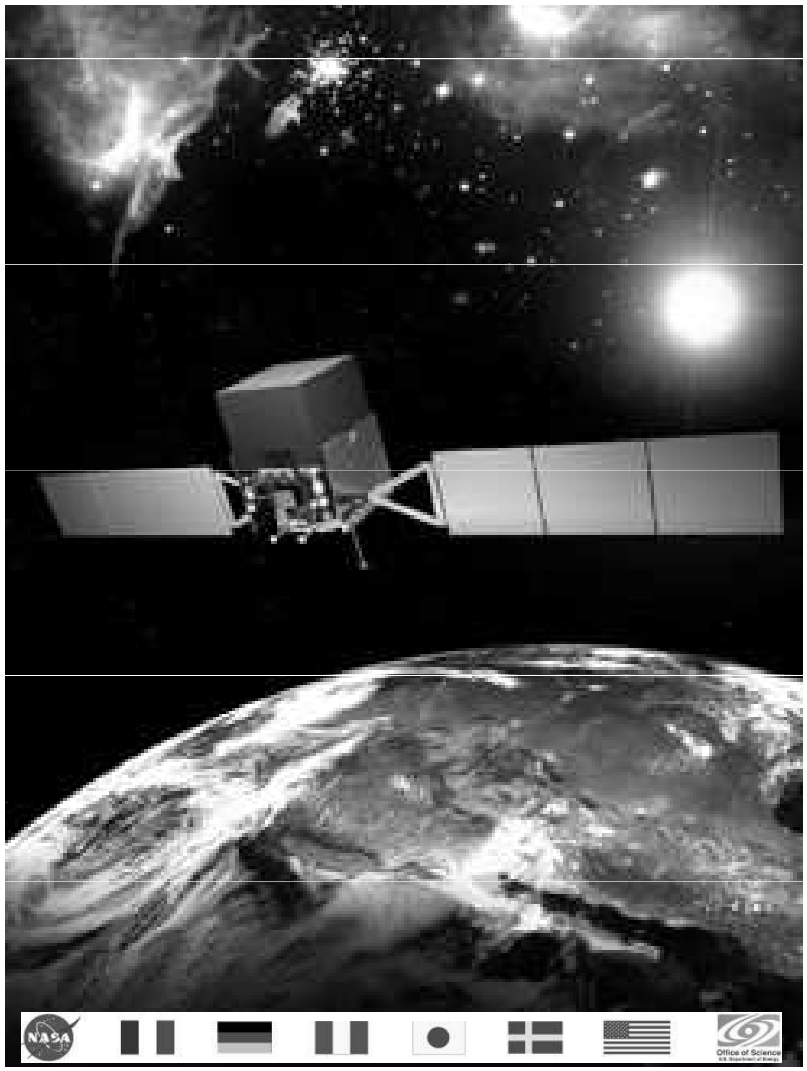
pulsar del Granchio, Geminga e Vela (origine galattica)



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

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





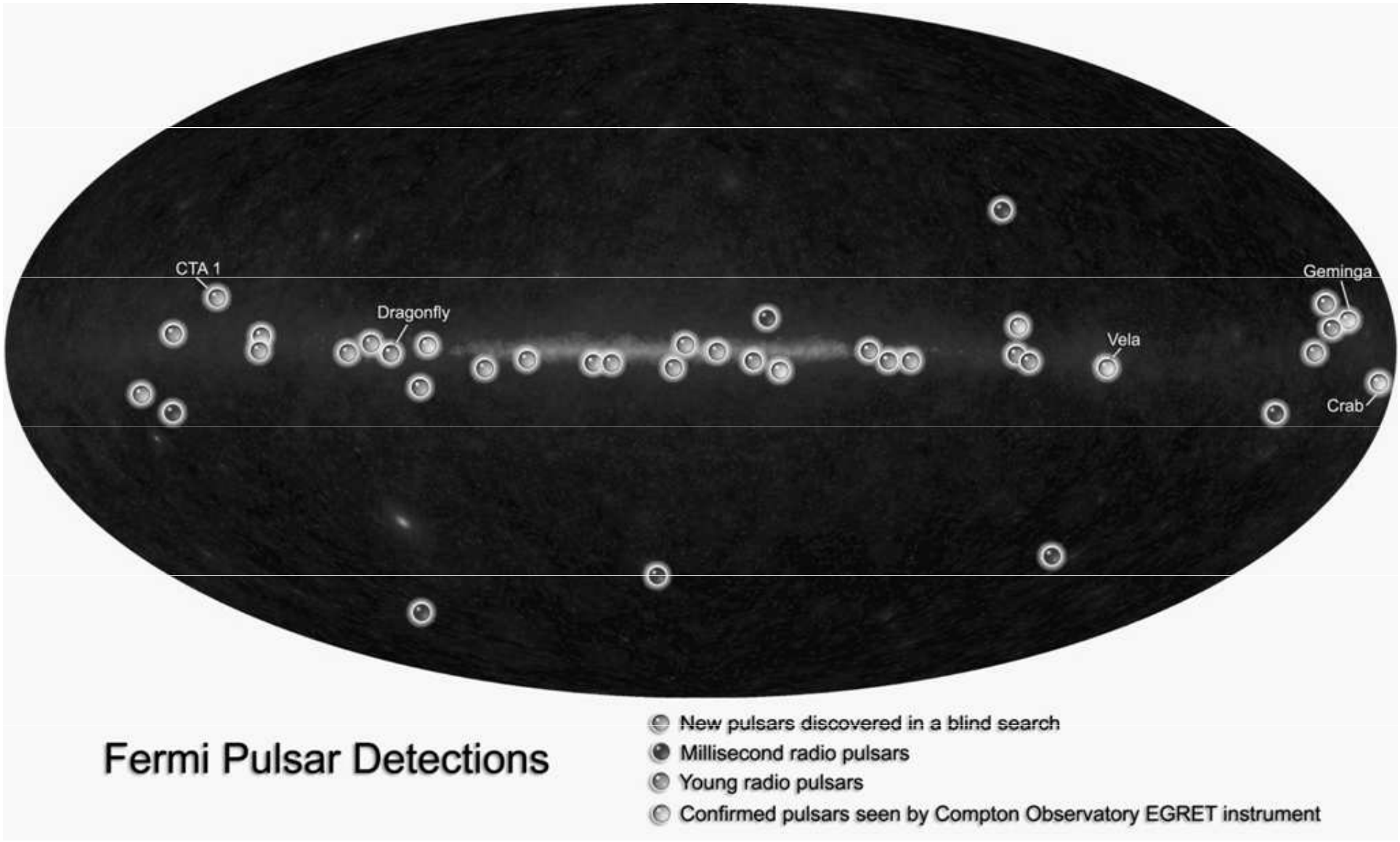
- **Collaborazione USA, Francia, Italia, Giappone, Germania, Svezia;**
- **E' stato lanciato il 11 giugno 2008;**
- **Progettato per rivelare γ fino a 300 GeV;**
- **Ha una superficie efficace per rivelare γ ~ un ordine di grandezza piu' alta di quella di EGRET;**
- **Si prevede potra' catalogare ~ 9000 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



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 sciami 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 sciami poco energetici;

EAS array per rivelare γ cosmici

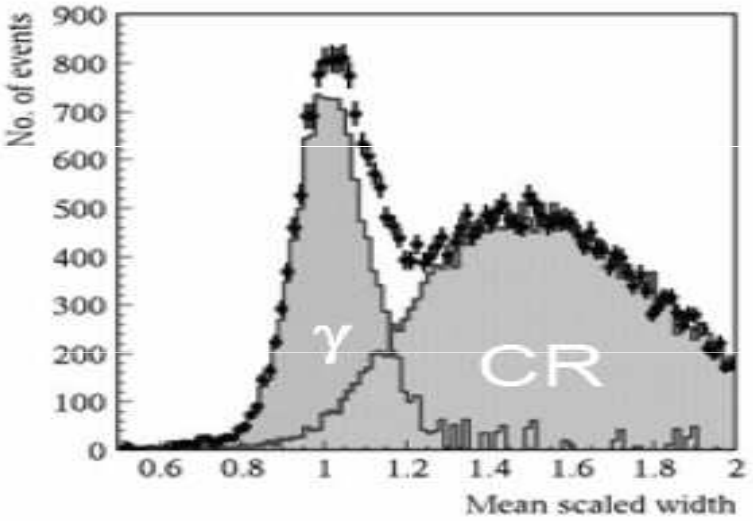
- **Tutte le considerazioni fatte sui rivelatori che campionano gli sciami a livello del suolo per rivelare raggi cosmici valgono anche in questo caso con qualche differenza;**
- **Il fatto che γ cosmici abbiano "bassa" energia implica che:**
  - **Il punto di massimo dello sciame e' piu' in alto (x_{max} ~logE);**
  - **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 >4000m!);**
  - **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 sciami iniziati dai γ cosmici da quelli (che sono comunque dominanti) dovuti a raggi cosmici;**

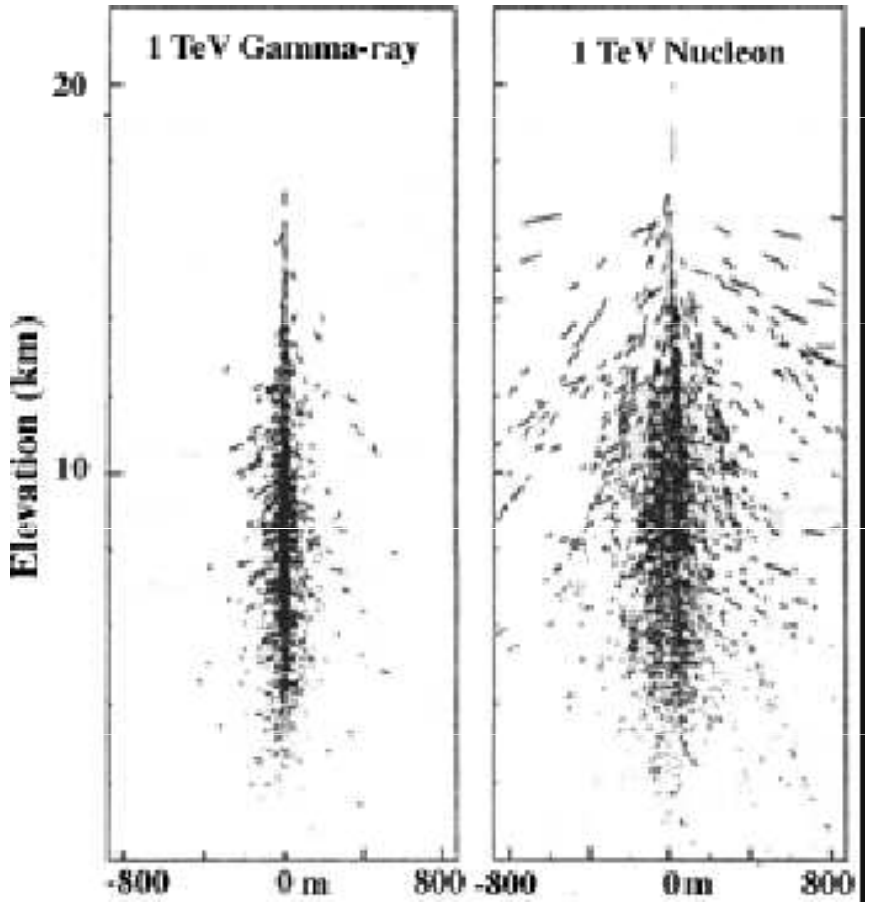
Tecniche per discriminare fra γ e adroni

- **Il fondo piu' fastidioso che i telescopi di raggi γ si trovano a dover gestire e' proprio quello dovuto a sciami 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 sciami indotti da gamma e' diversa da quelli adronici: tipicamente e' piu' "stretta";**





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

http://www.lanl.gov/milagro/

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;

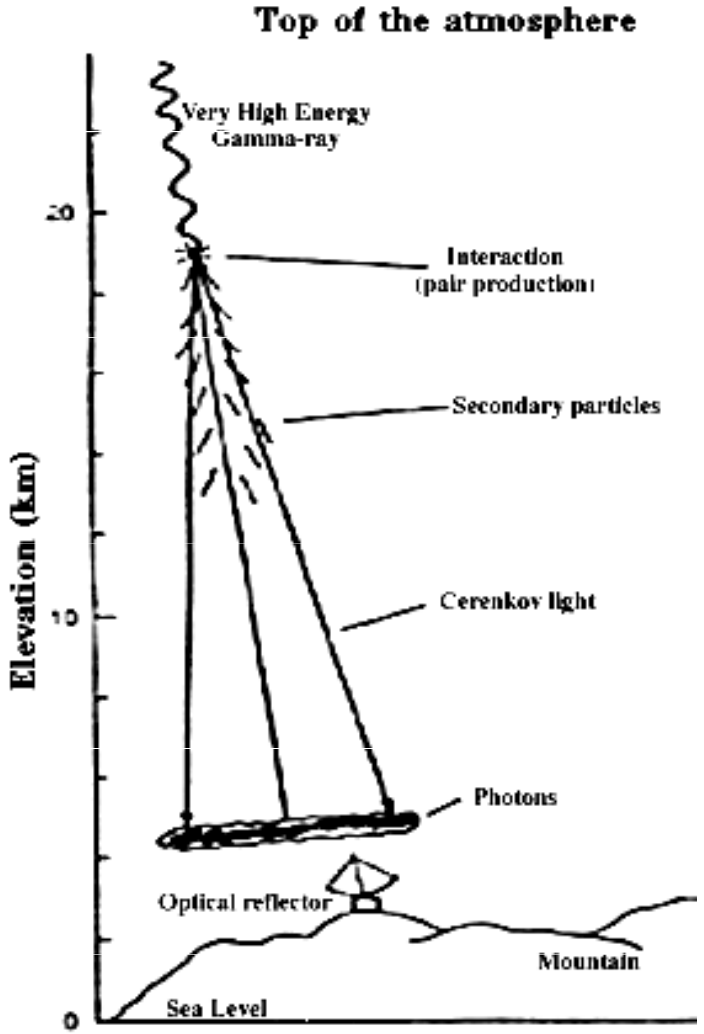
ARGO (Astrophysical Radiation Ground-based Observatory)

- Si svolge in Tibet a >4000 m di altitudine;
- Consiste in una superficie di 76x74 m^2 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 (abiamo 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 ($<6^0$) dal'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 sciami iniziati da γ, da quelli dovuti ad altre particelle primarie;



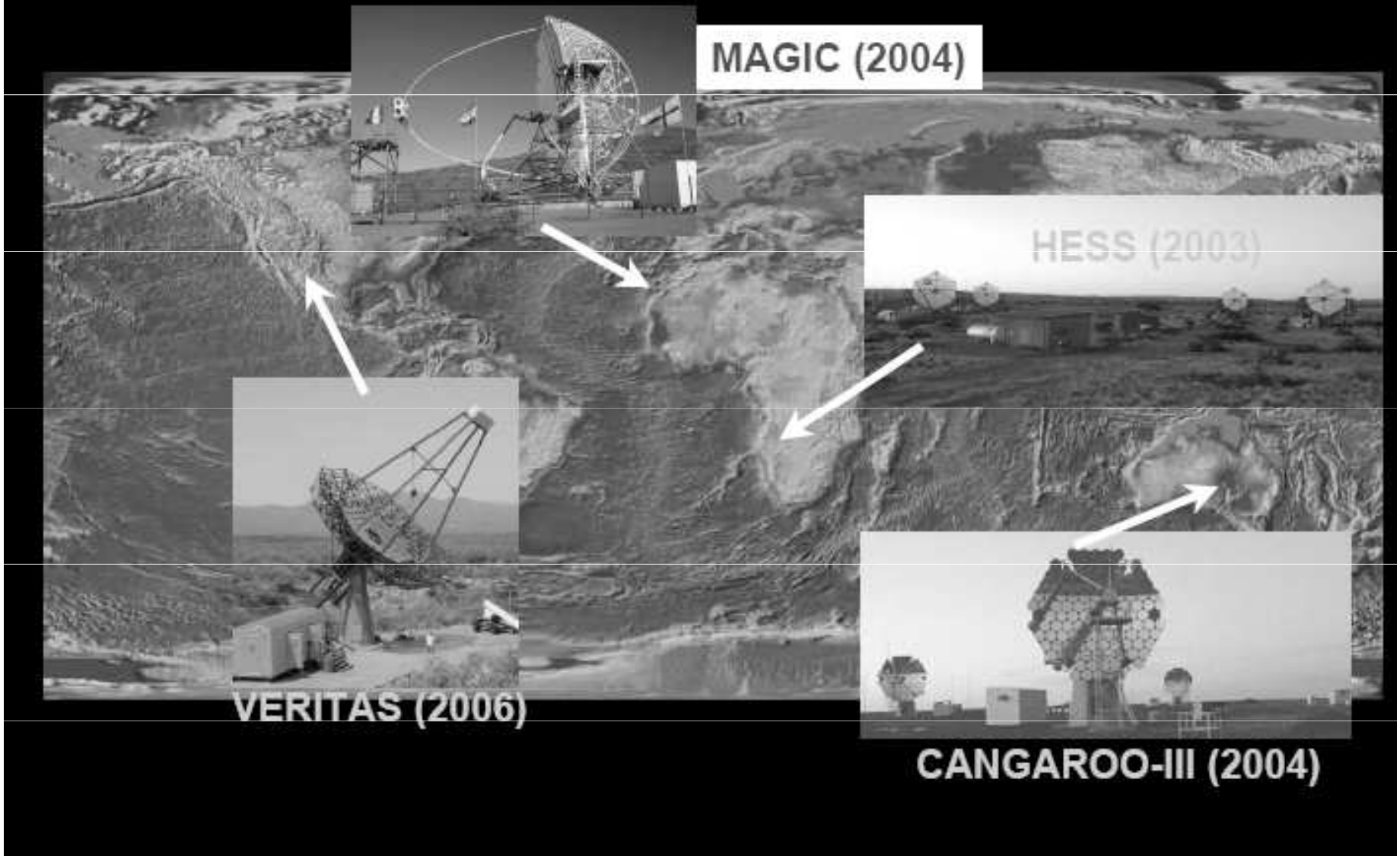
I telescopi Cerenkov per rivelare VHE γ (2)

- **Le tipiche caratteristiche di un telescopio Cerenkov sono:**
  1. Area di rivelazione ~0.1 Km^2: puo' essere ottenuta usando piu' di un telescopio (visione stereoscopica);
  2. Copertura angolare e' in generale non superiore a 3^0 (significativamente peggio dei rivelatori a campionamento al suolo);
  3. Soglia di energia piuttosto bassa (ovvero energia minima che possono rivelare) (~200 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;

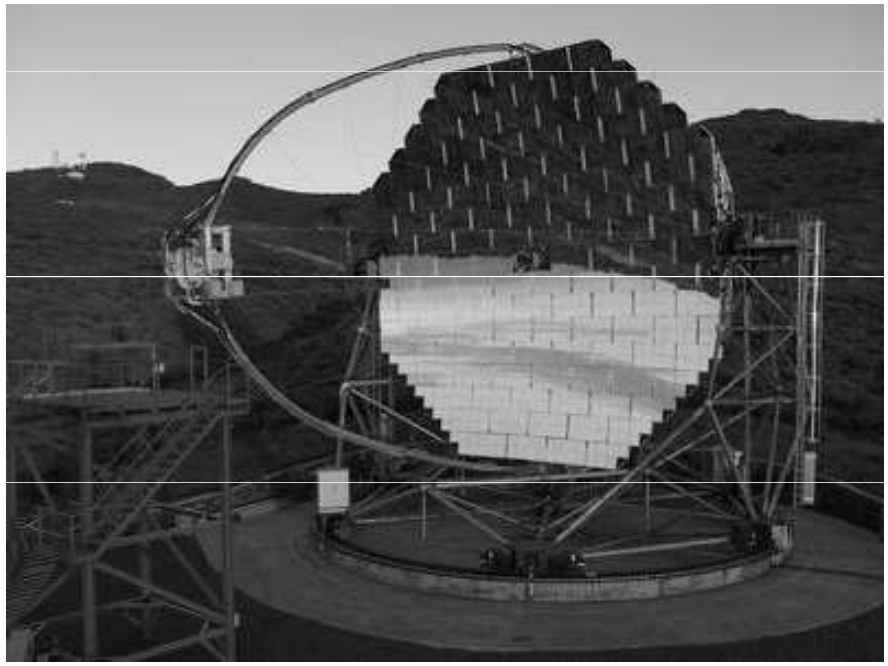
Alcuni esperimenti per rivelare γ cosmici che usano telescopi Cerenkov

- **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]**

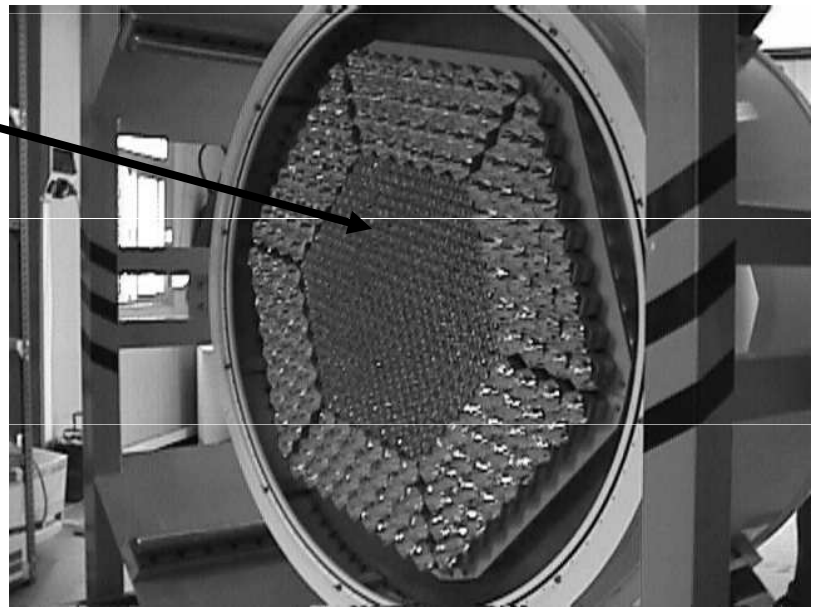
Telescopi Cerenkov di seconda generazione



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

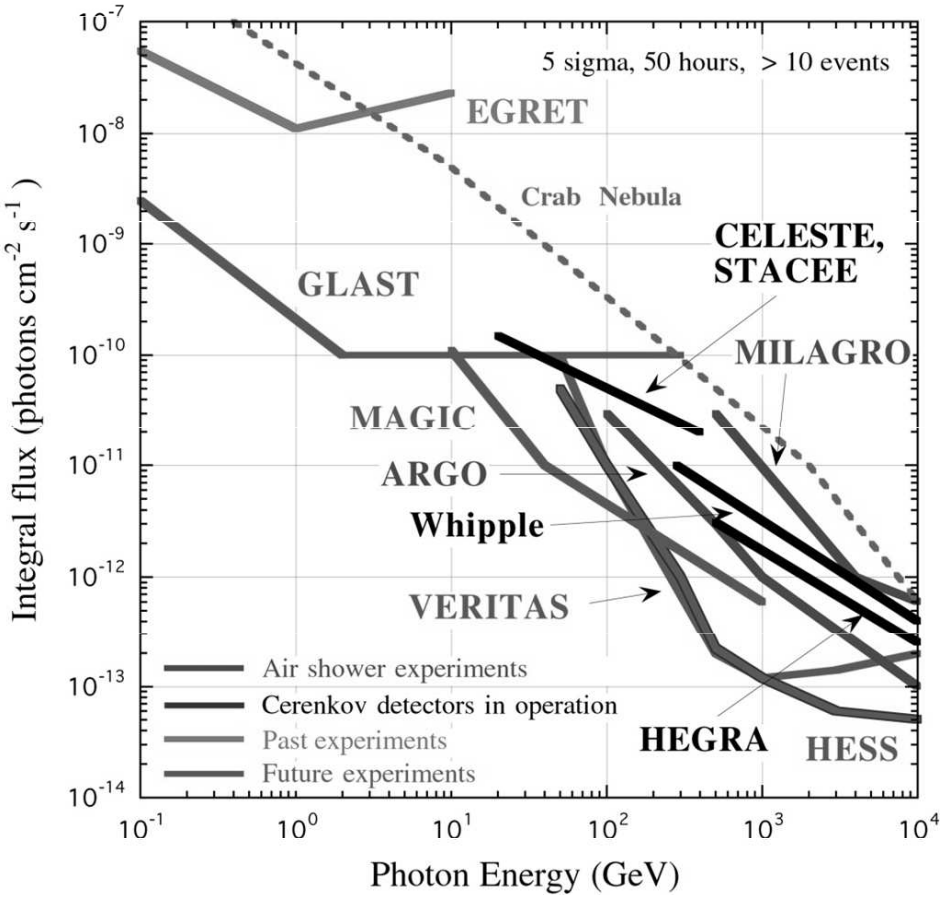


- Si svolge alle isole Canarie, precisamente sull'isola vulcanica di La Palma ad un'altitudine di circa 2500m;
- Ha una soglia di solo 30GeV (che sara' ulteriormente abbassata a ~10-GeV) e puo' rivelare γ fino a energie di ~ 300GeV;
- E' composto da due telescopi distanti 85m l'uno dall'altro;
- Ogni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



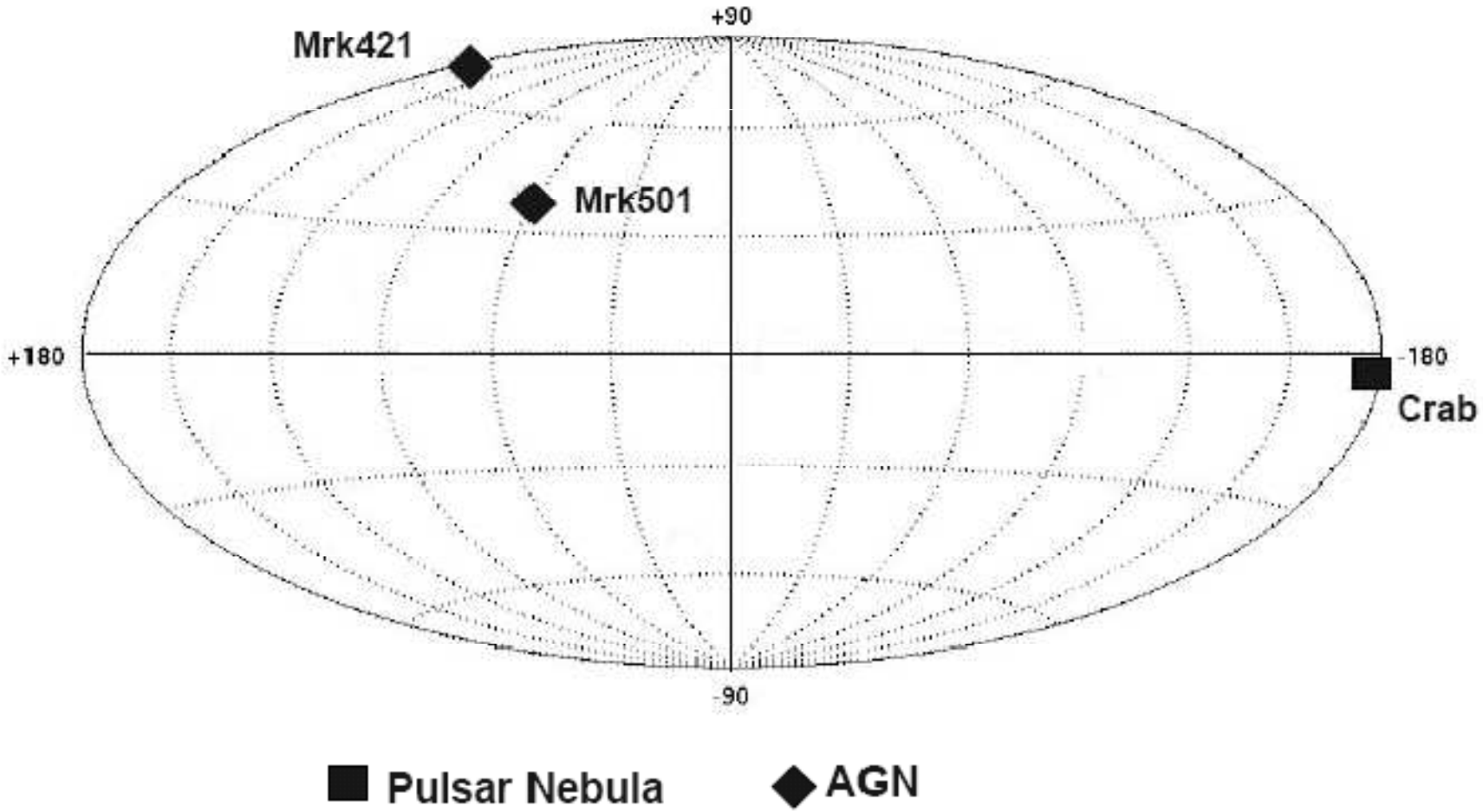
Stato della ricerca di γ cosmici

- **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 ~300GeV e viceversa MAGIC scende fino a energie di ~ 10GeV;**

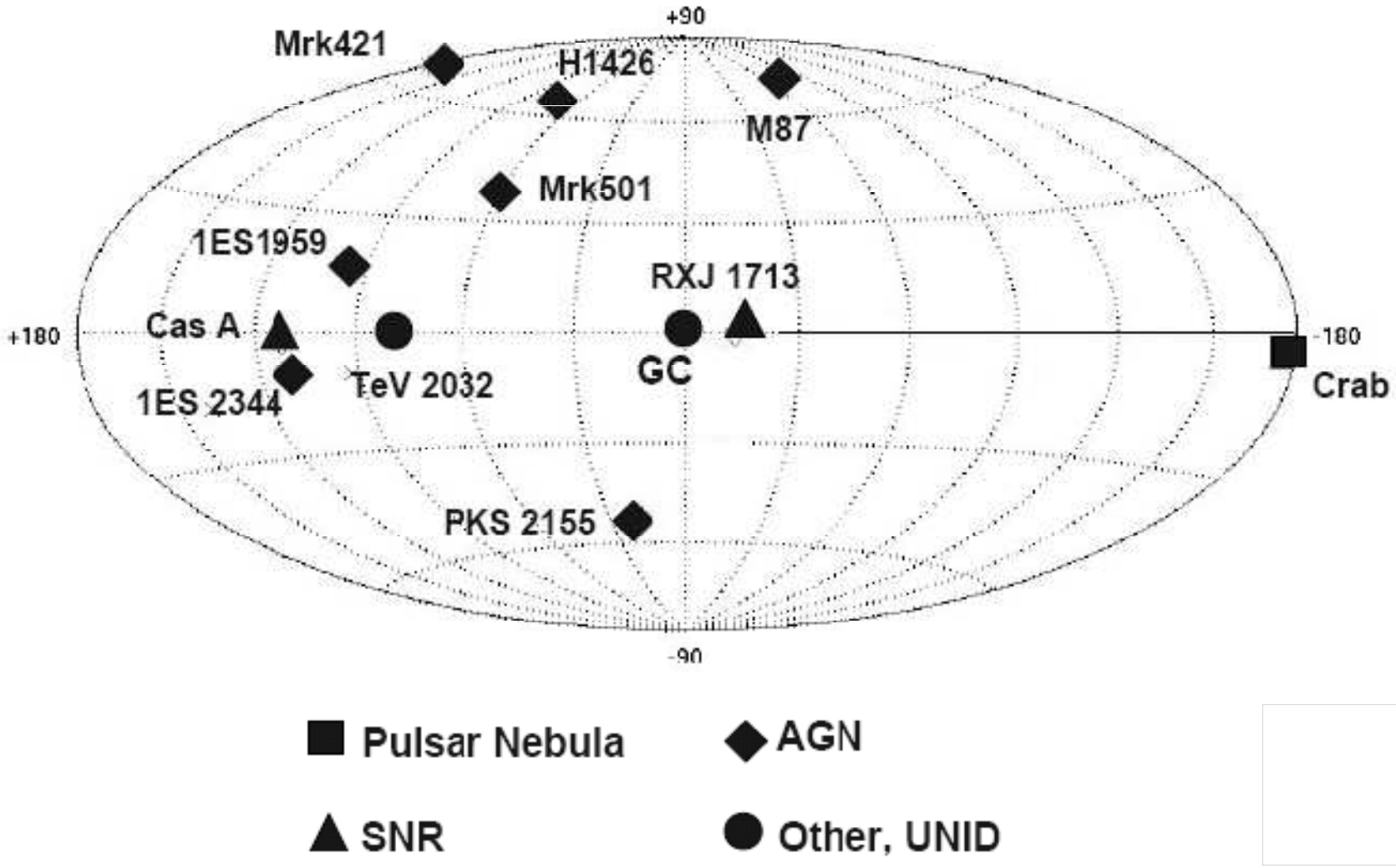


- **Tipicamente i rivelatori su satellite hanno un maggiore campo visivo;**
- **La ricostruzione dell'energia e' inoltre meno affetta da errori sistematici;**
- **D'altra parte i rivelatori a terra sono gli unici in grado di rivelare i γ di energie veramente estreme;**

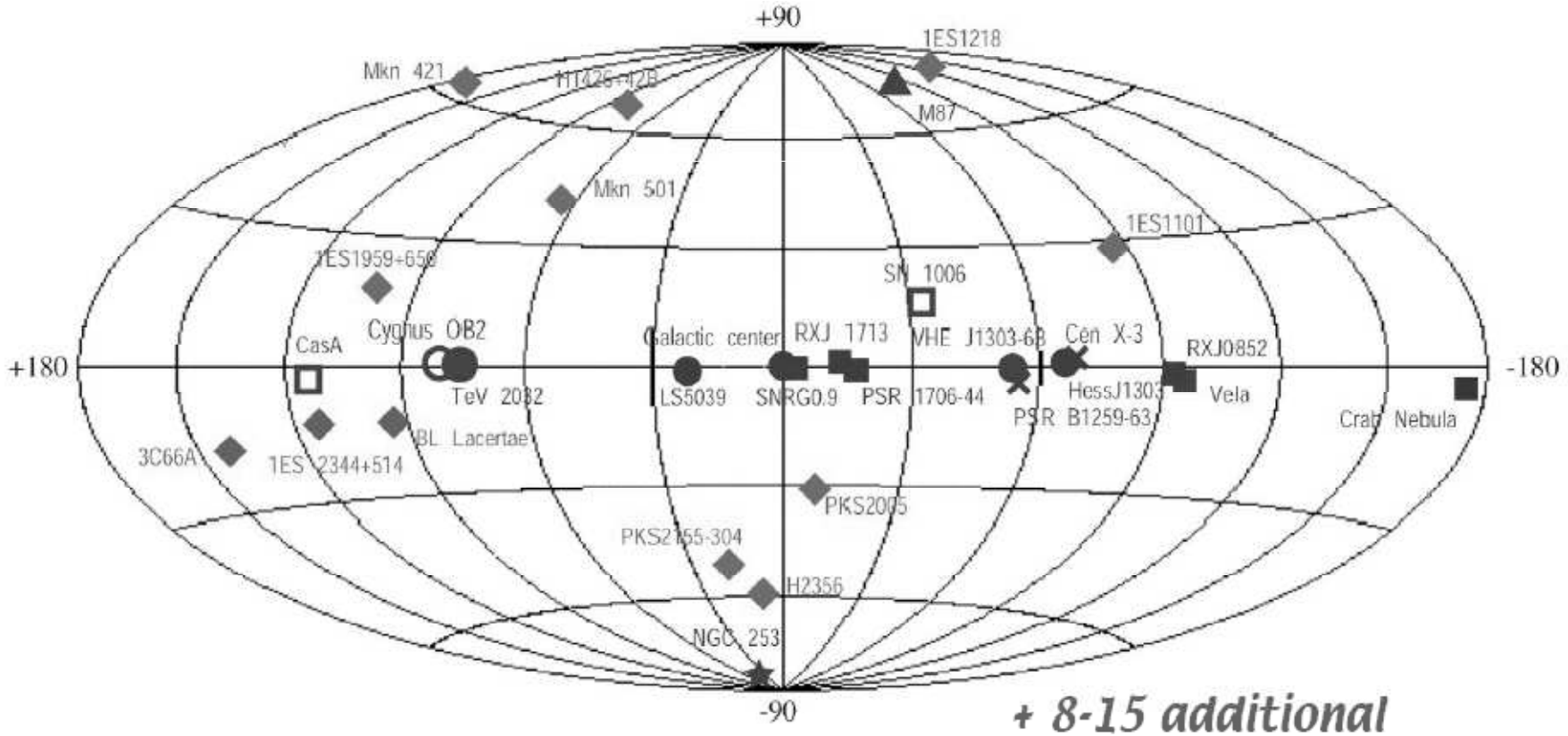
Il cielo dei gamma di altissima energia nel 1995



Il cielo dei gamma di altissima energia nel 2003



Il cielo dei gamma di altissima energia nel 2005



+ 8-15 additional sources in galactic plane.

■ = Pulsar/Plerion □ = SNR ★ = Starburst galaxy ○ = OB association

◆ = AGN (BL Lac) ▲ = Radio galaxy × = XRB ● = Undetermined

Neutrini cosmici di altissima energia

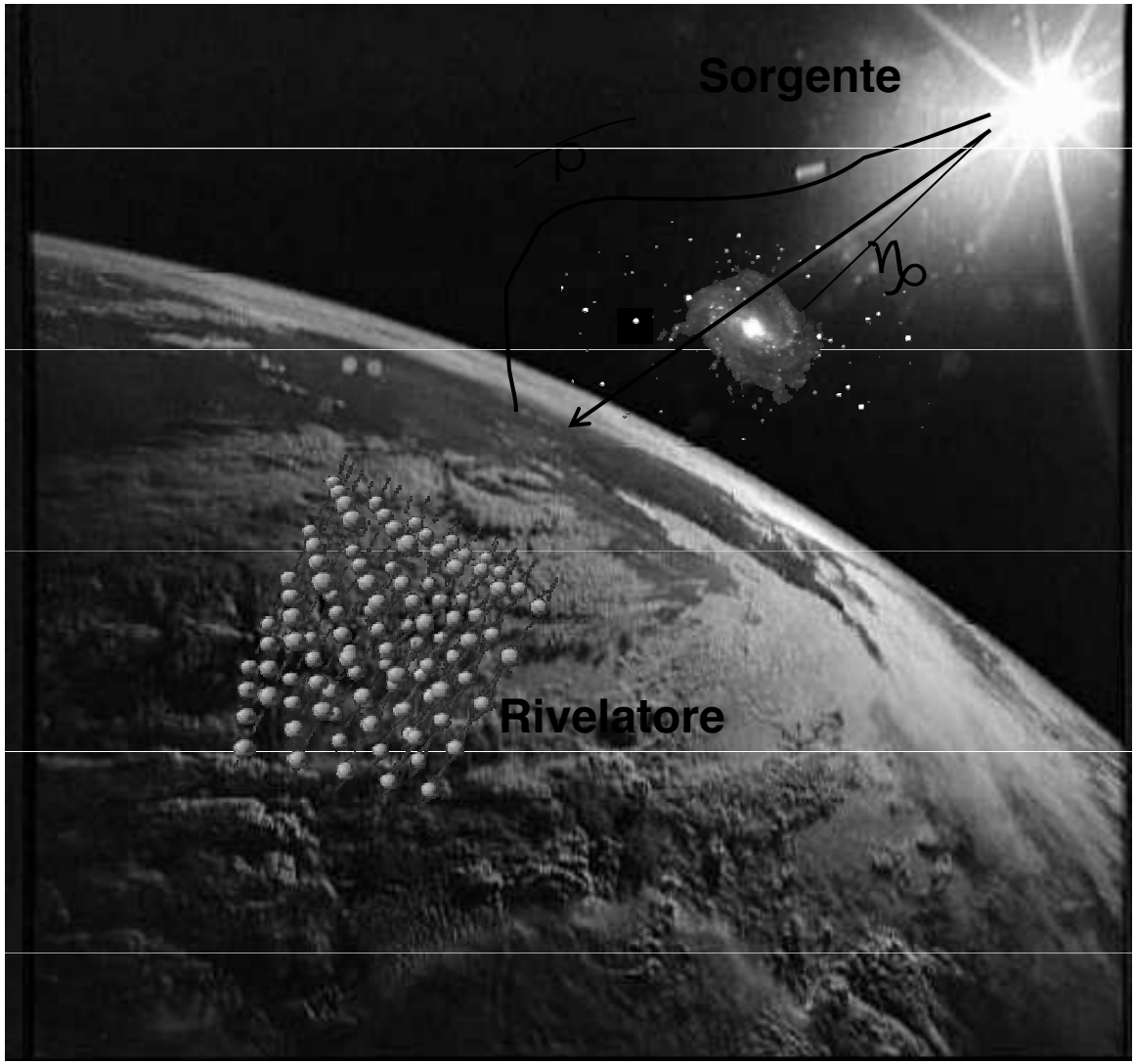
I neutrini cosmici di altissima energia (E> 1 TeV): da dove vengono?

- **Neutrini atmosferici:**
  - sono parte degli sciami prodotti dai raggi cosmici primari che colpiscono l'atmosfera terrestre;
  - hanno un energia tipicamente di ~ 0.1 Gev (Φ ~1 cm^{-2} s^{-1}),
  - lo spettro si estende anche oltre 1 TeV ~ $E^{-3.7}$;
  - costituiscono un fondo per gli esperimenti che descrivero' 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 ~ 10^{18} 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 TeV): da dove vengono (2) ?

- **Annichilazione di particelle esotiche:**
  - L'annichilazione di particelle esotiche come difetti topologici o particelle supersimmetriche supemassive 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 ~ 100TeV 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 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:

$$\nu_\mu + N \rightarrow N' + \mu$$

- Dove viene rivelato il muone uscente;
- La sezione d'urto per alte energie del neutrino e' $\sigma \sim 10^{-38}$ 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;

$$\theta_\mu = \frac{1.5^0}{\sqrt{E_\mu(\mathrm{TeV})}}$$

- La direzione del muone punta quindi verso la sorgente che ha prodotto il neutrino;
- Notiamo inoltre che il muone prodotto ha tipicamente energie elevate (~1TeV) e quindi puo' percorrere ~ Km prima di fermarsi;
- Per esempio in acqua si ha che:

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

•Come al solito stiamo parlando di eventi rari → bisogna avere rivelatori con massa grande;

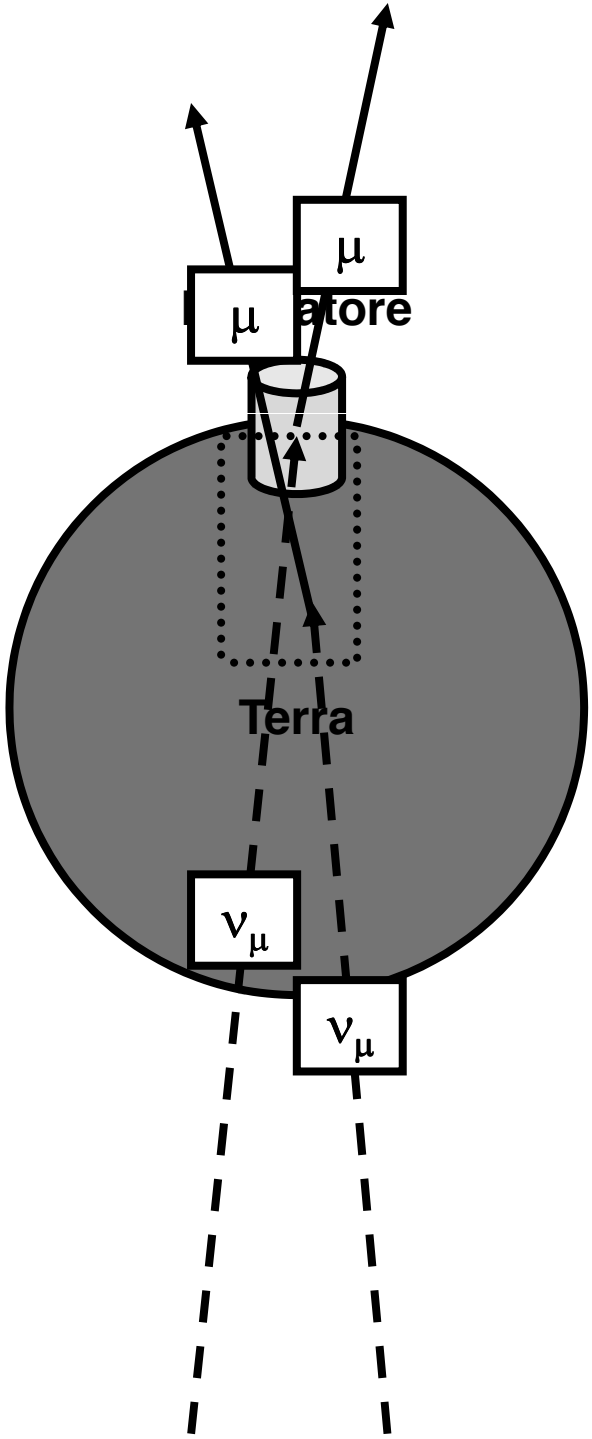
•N.B.: il muone uscente ha un range grande ~ Km quindi una volta prodotto percorre molta strada;

•Consideriamo il caso in cui un muone viene prodotto fuori dal rivelatore, e lo raggiunge successivamente venendo rivelato: lo scopo e' raggiunto ugualmente;

• Possiamo quindi considerare una specie di volume efficacie di rivelazione (le cui dimensioni dipendono dal range del muone) che non coincide con il rivelatore stesso, ma e' piu' grande;

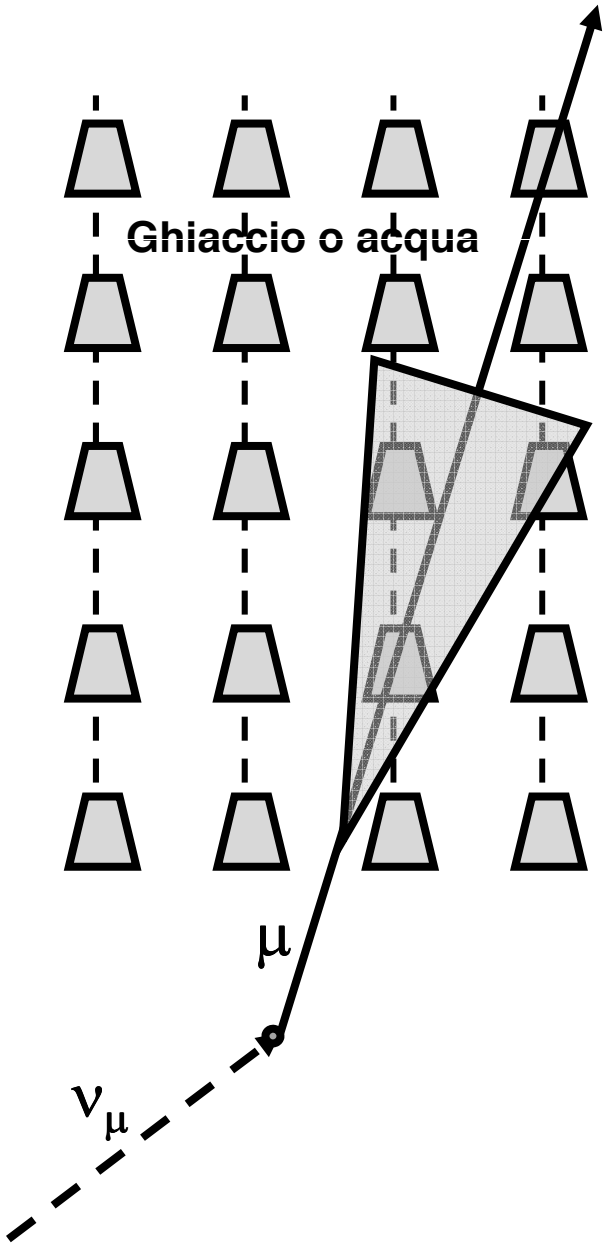
•E' un po' come se si usasse una porzione della terra stessa (o del mezzo in cui e' immerso il rivelatore, per esempio il mare) come "convertitore" di neutrini in muoni;

•Notiamo inoltre che gli eventi indotti da neutrini di piu' alta energia sono quelli a cui corrisponde un volume efficacie maggiore;



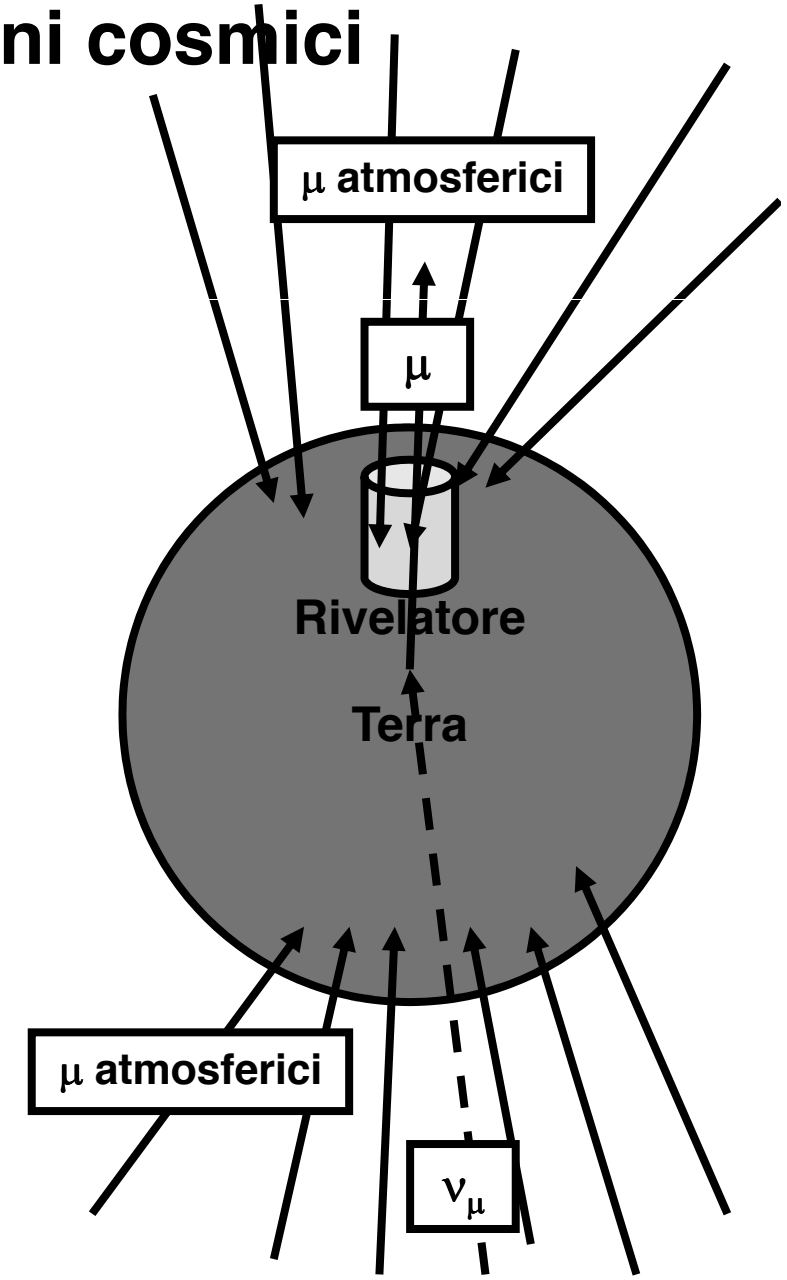
Come si rivelano i neutrini di altissima energia?

- **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 ~ $6x10^5$ μ/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;**



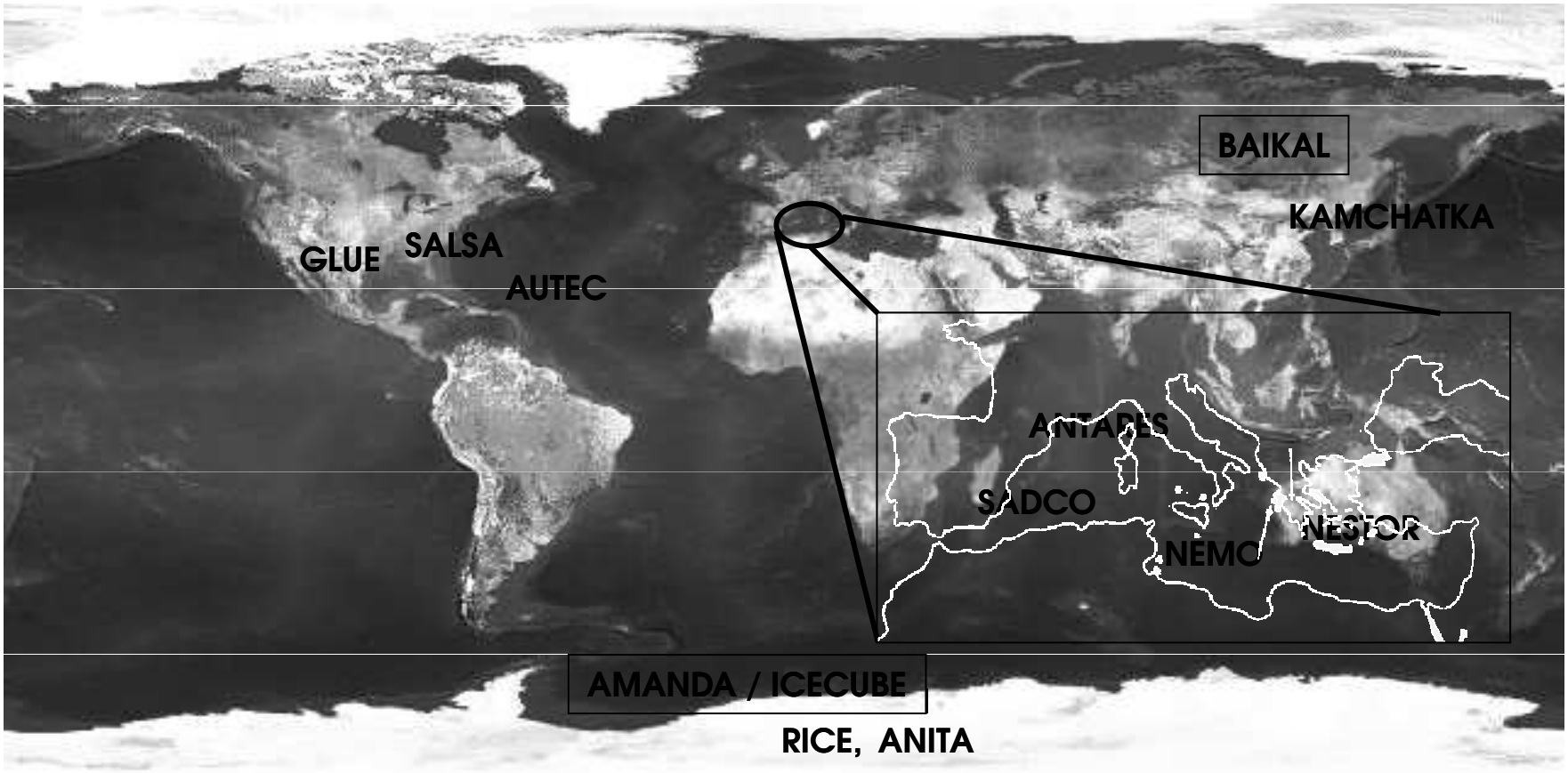
I grandi rivelatori in acqua e ghiaccio: parametri costruttivi importanti

- **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)**

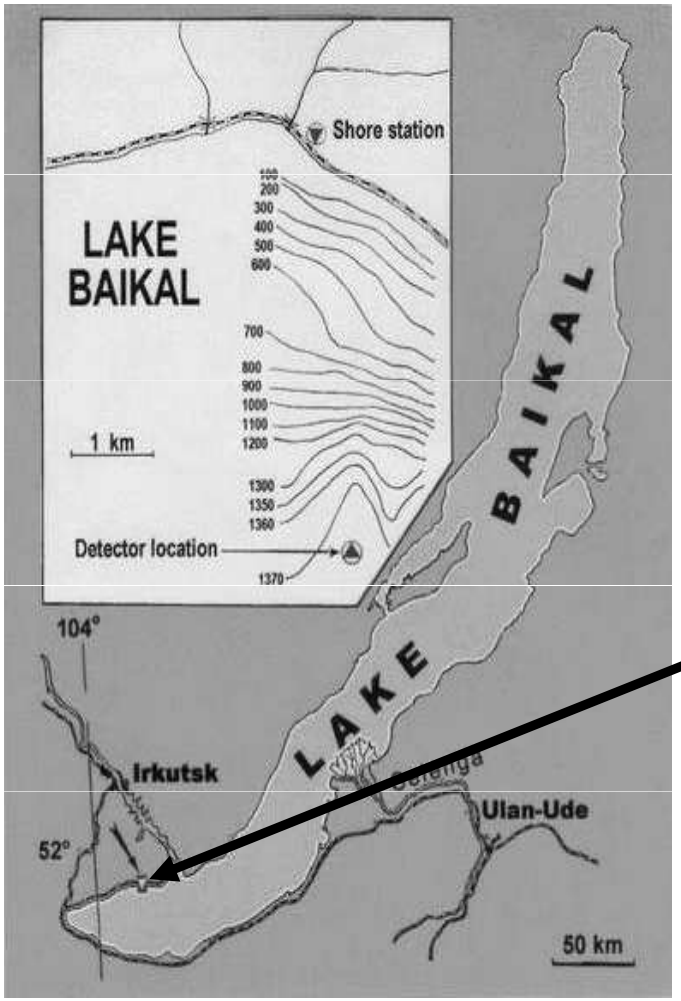
Esperimenti presenti e futuri per la rivelazione di neutrini di altissima energia

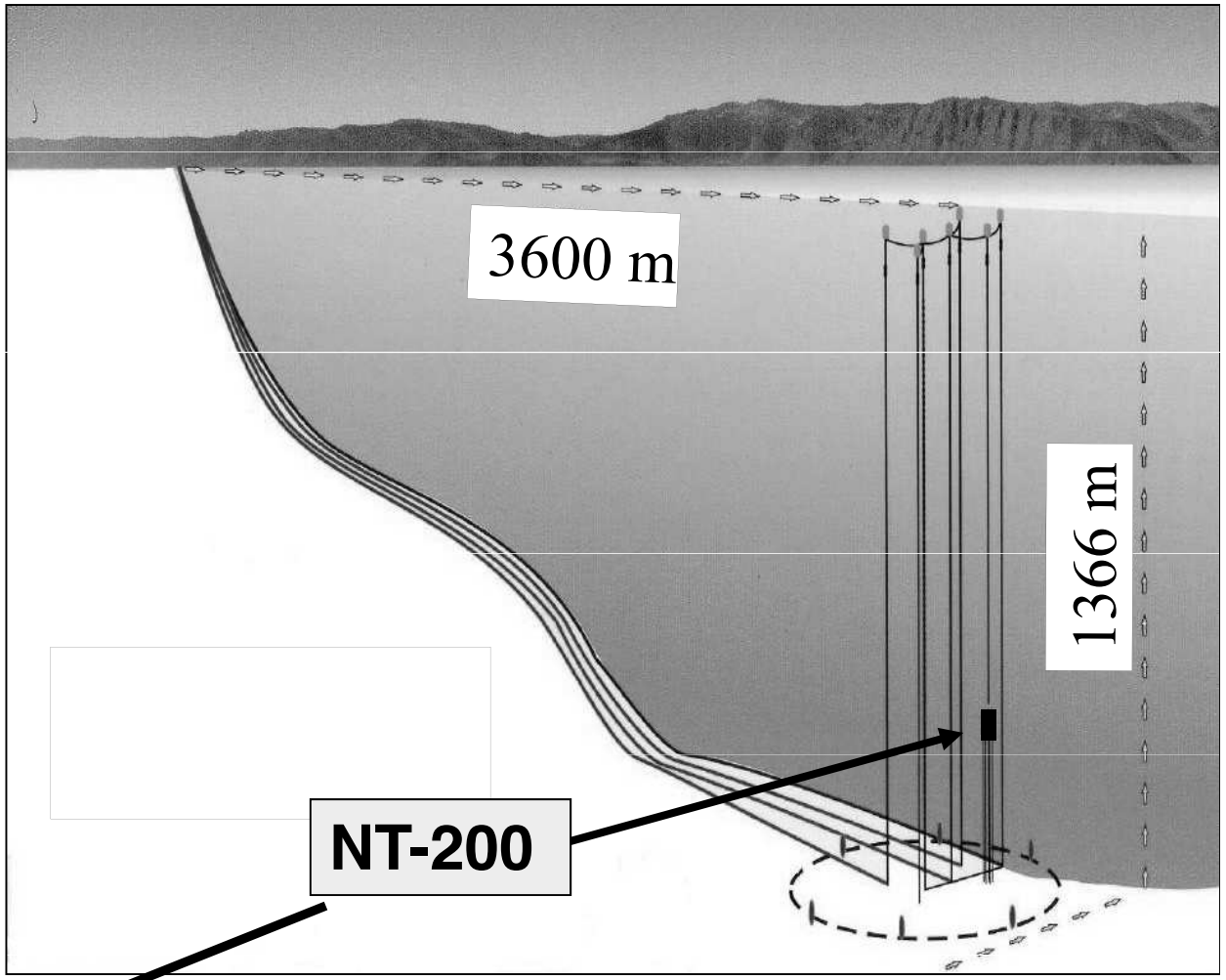


CERENKOV
RADIO
ACUSTICI

} 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

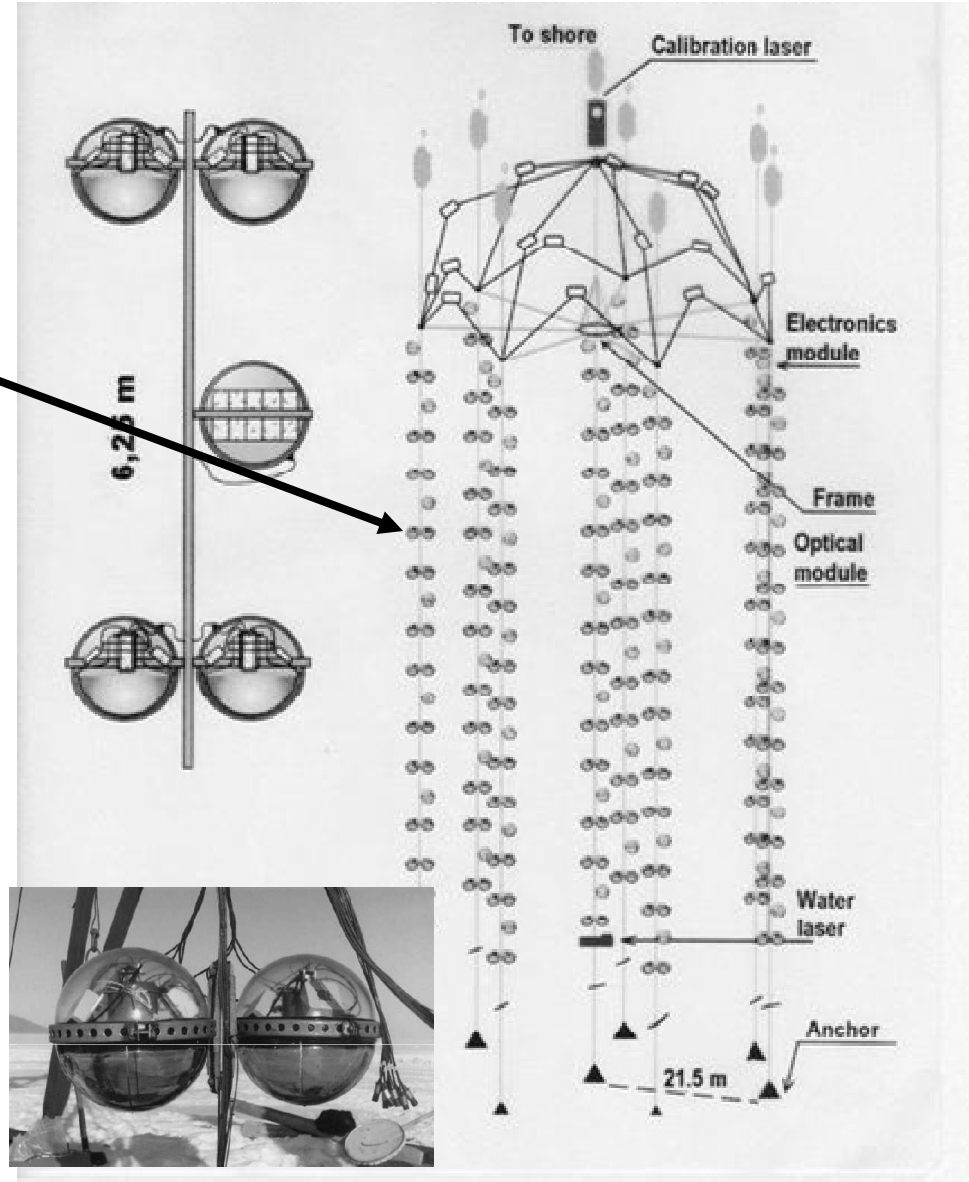
•Ha cominciato a prendere dati nel 1998;

• 8 stringhe lunghe 72 m con 384 tubi fotomoltiplicatori l'una;

•Le stringhe sono situate a 1070m di profondita' e sono ancorate al fondo;

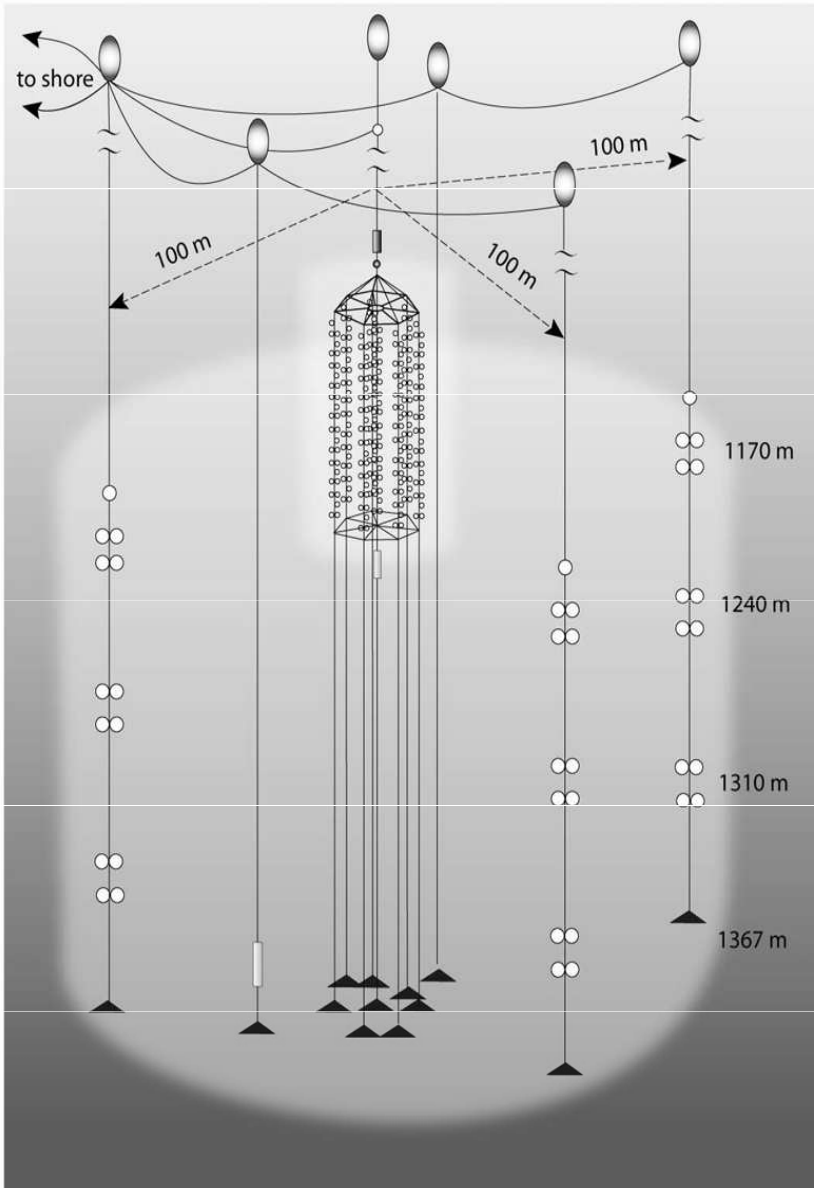
• I PMT sono rivolti verso il basso e sono riuniti a coppie in cosiddetti Optical Module (OM);

• Il rivelatore ha una soglia piuttosto bassa, cioe' puo' rivelare neutrini di energia a partire da E>10-20 GeV;



http://www.ifh.de/baikal/baikalhome.html

Il rivelatore Baikal (2)



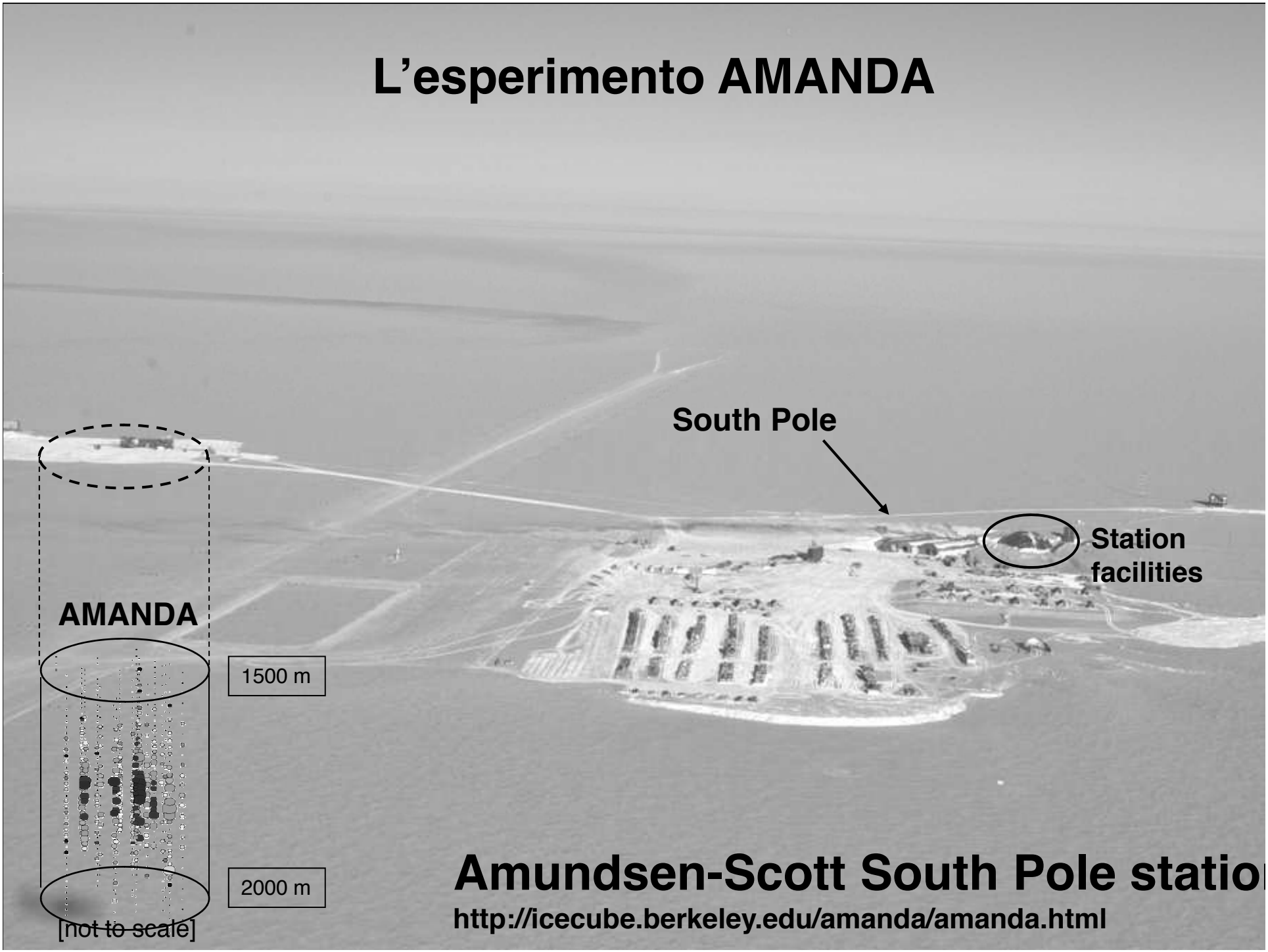
Nel 2005 sono stati fatti dei miglioramenti all'apparato:

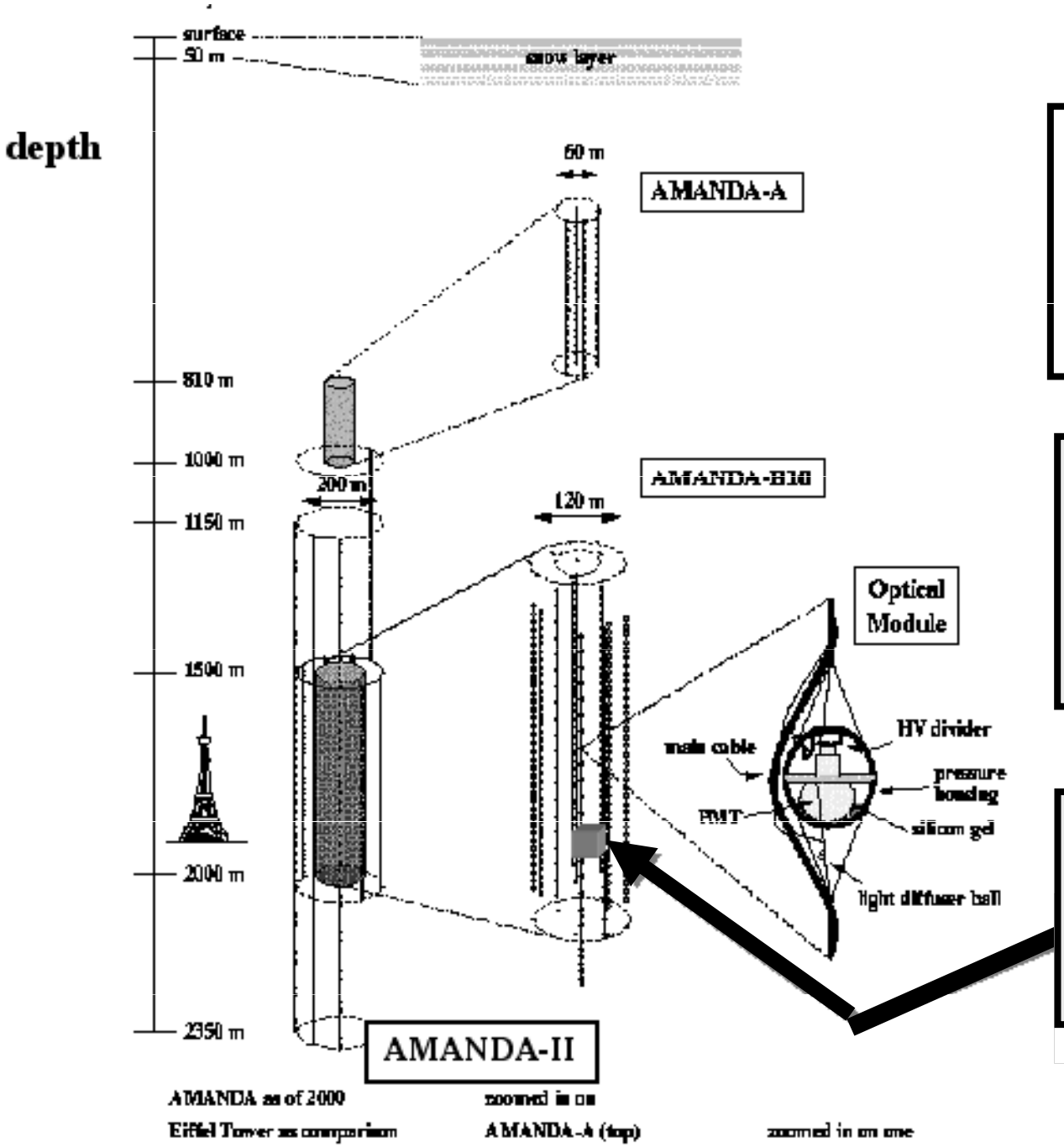
•Sono state aggiunte 3 stringhe di fototubi piu' esterne e con granularita' meno fine: in questo modo allargano il volume sensibile e aumentare l'efficienza per neutrini di energia ultra-elevata;

•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

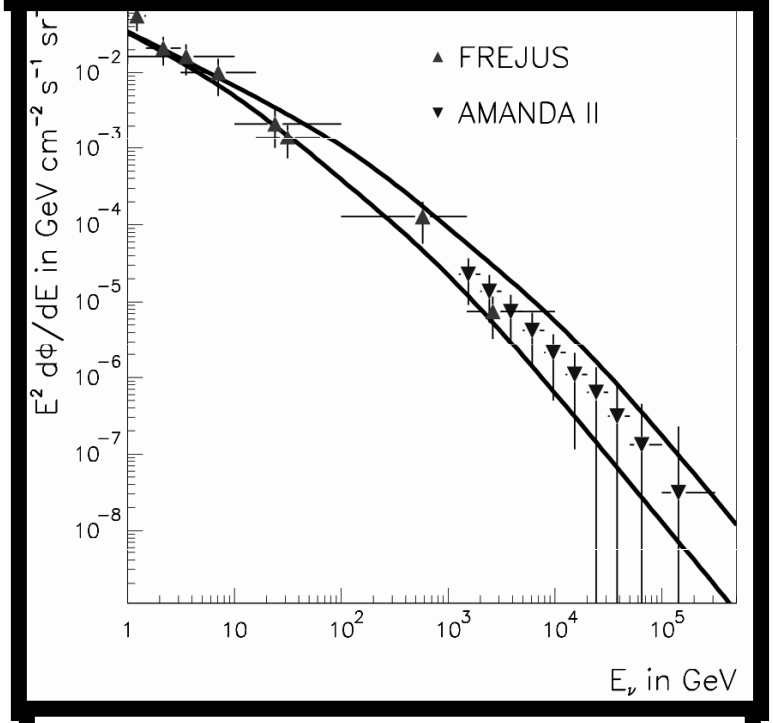
AMANDA-B10
(cuore di AMANDA-II)
10 stringhe
302 OMs
Anno:1997-99

AMANDA-II
19 stringhe
677 OMs
Anno:2000

Caratteristiche di AMANDA

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

Neutrini atmosferici



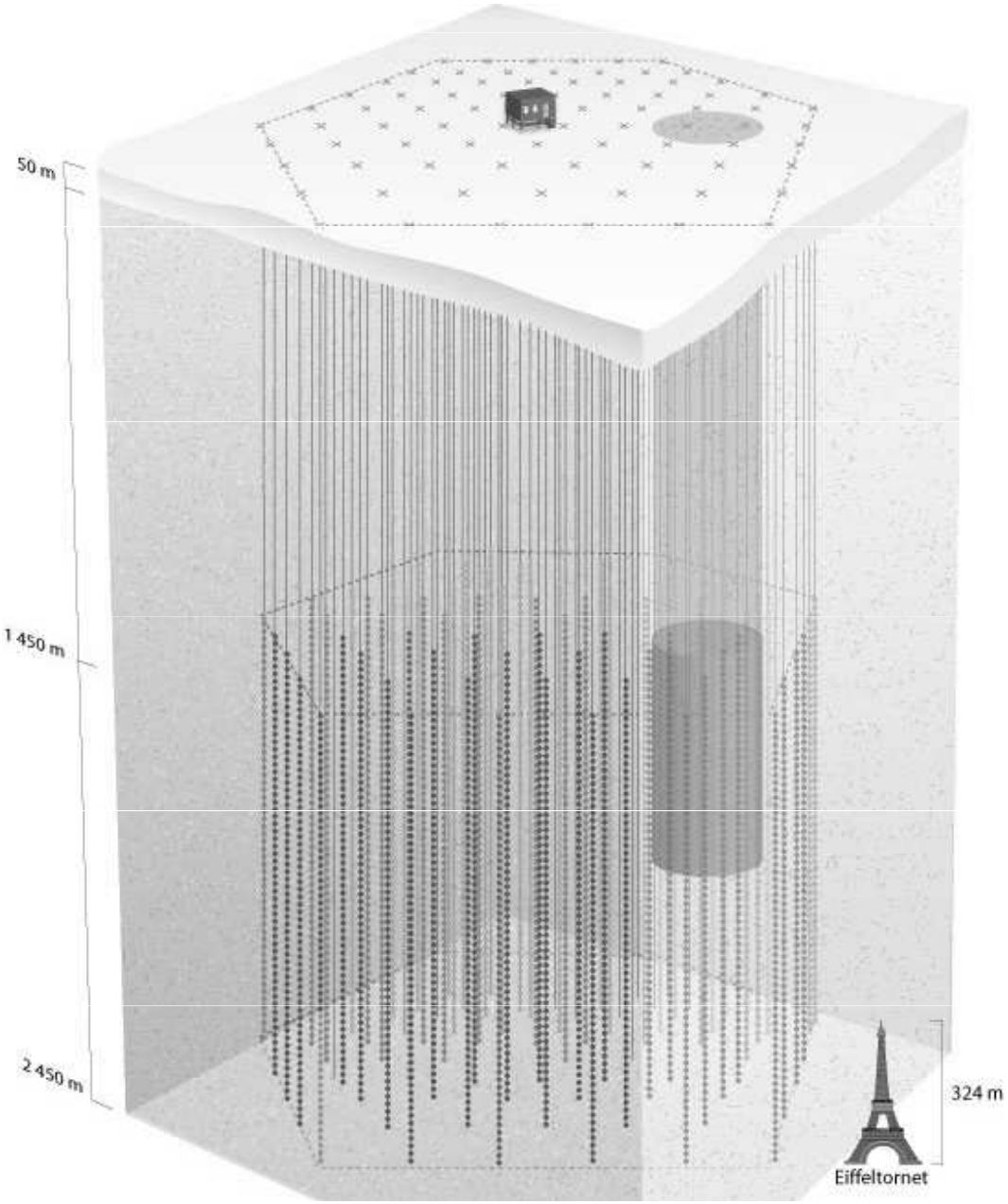
Il flusso misurato e' compatibile con le previsioni teoriche sul flusso di ν atmosferici;

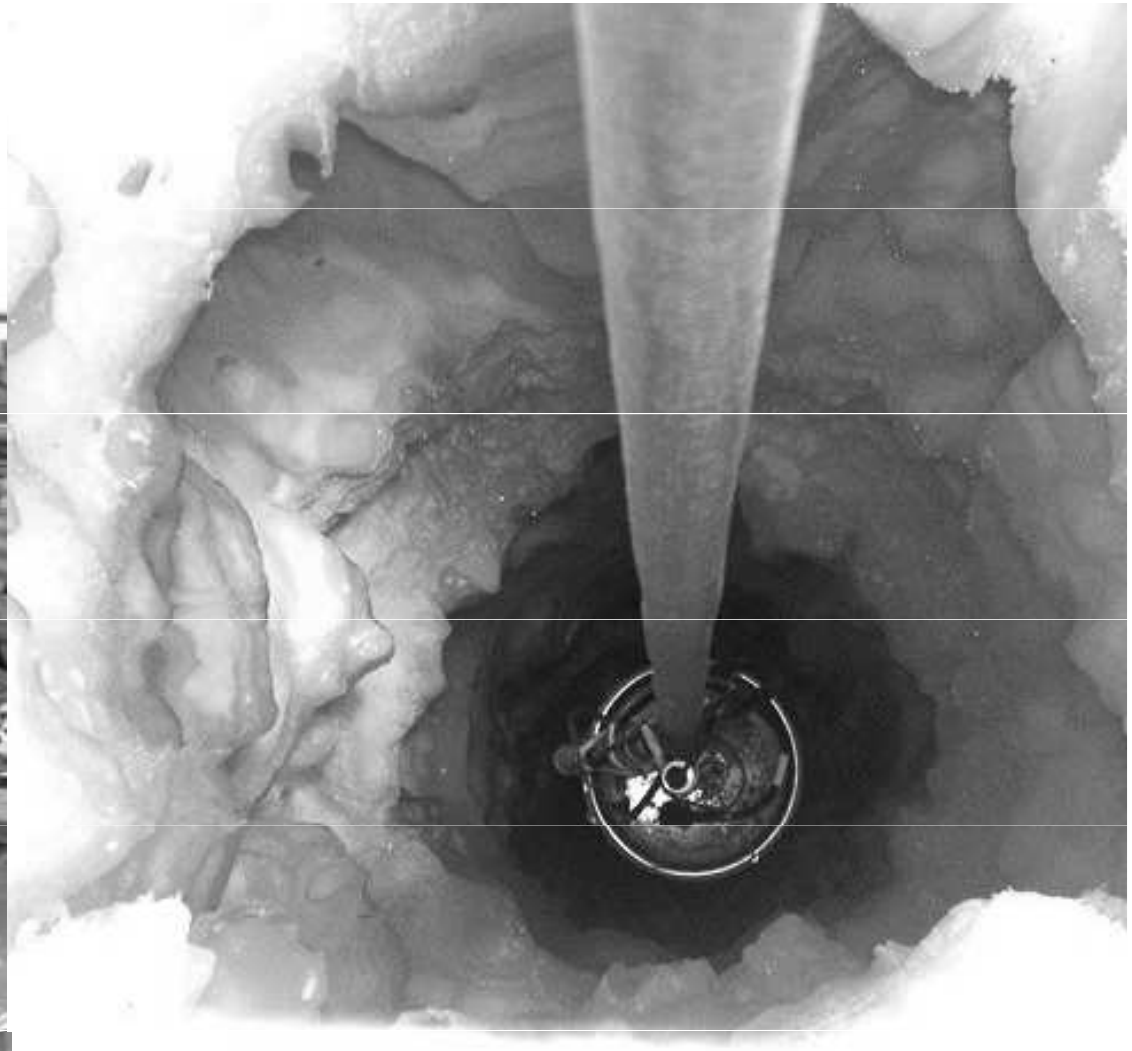
Energia	Produzione
MeV	Supernove
GeV-TeV	Atmosfera, Annichilazione di Wimps, Centro della galassia
TeV_EeV	μQuasars, SN remnant AGN,GRB

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);**
- **$\Delta\theta \sim 0.8^0$;**
- **Range di energia 10^{15}-10^{18} eV;**





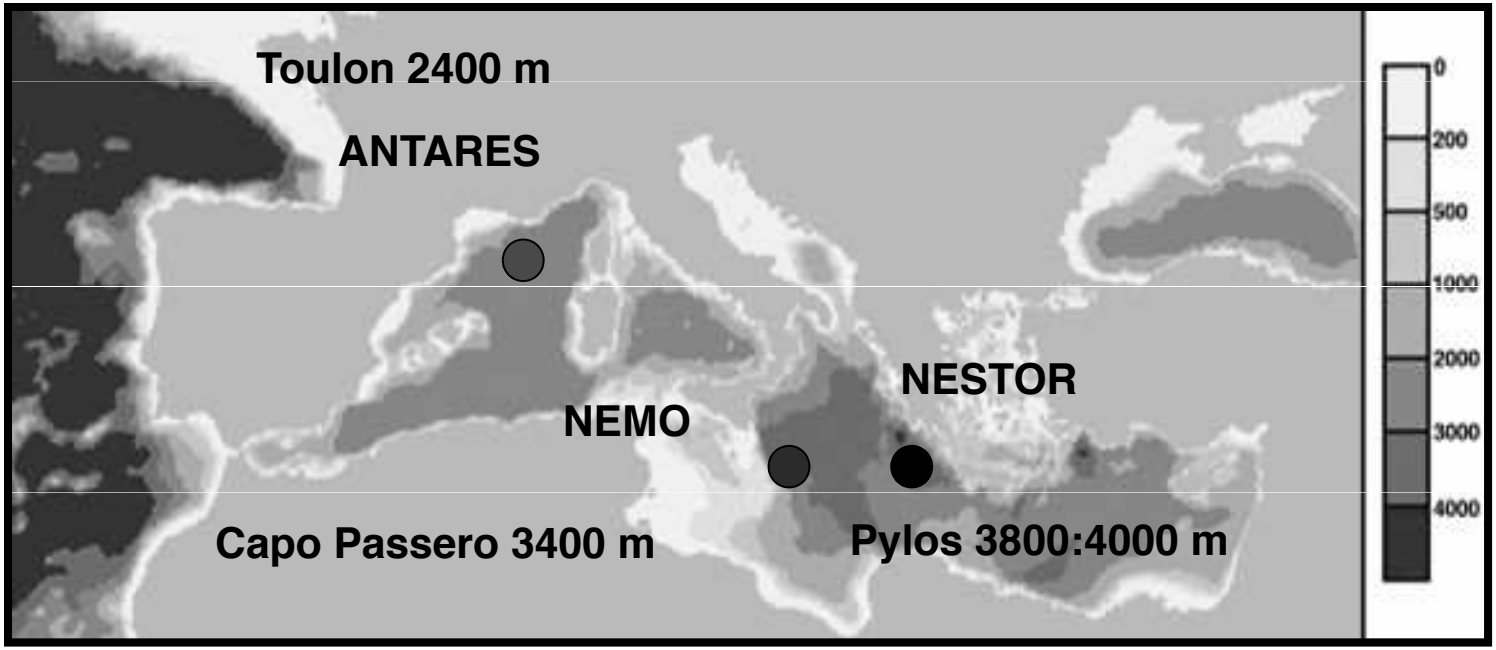
- **La prima stringa di ICECUBE e' stata calata a gennaio 2005;**
- **L'intero rivelatore dovrebbe esser istallato per il 2010;**
- **Intanto prende dati!**

Progetti per rivelatori nel Mediterraneo

- **3 progetti**
  - ANTARES
  - NESTOR
  - NEMO

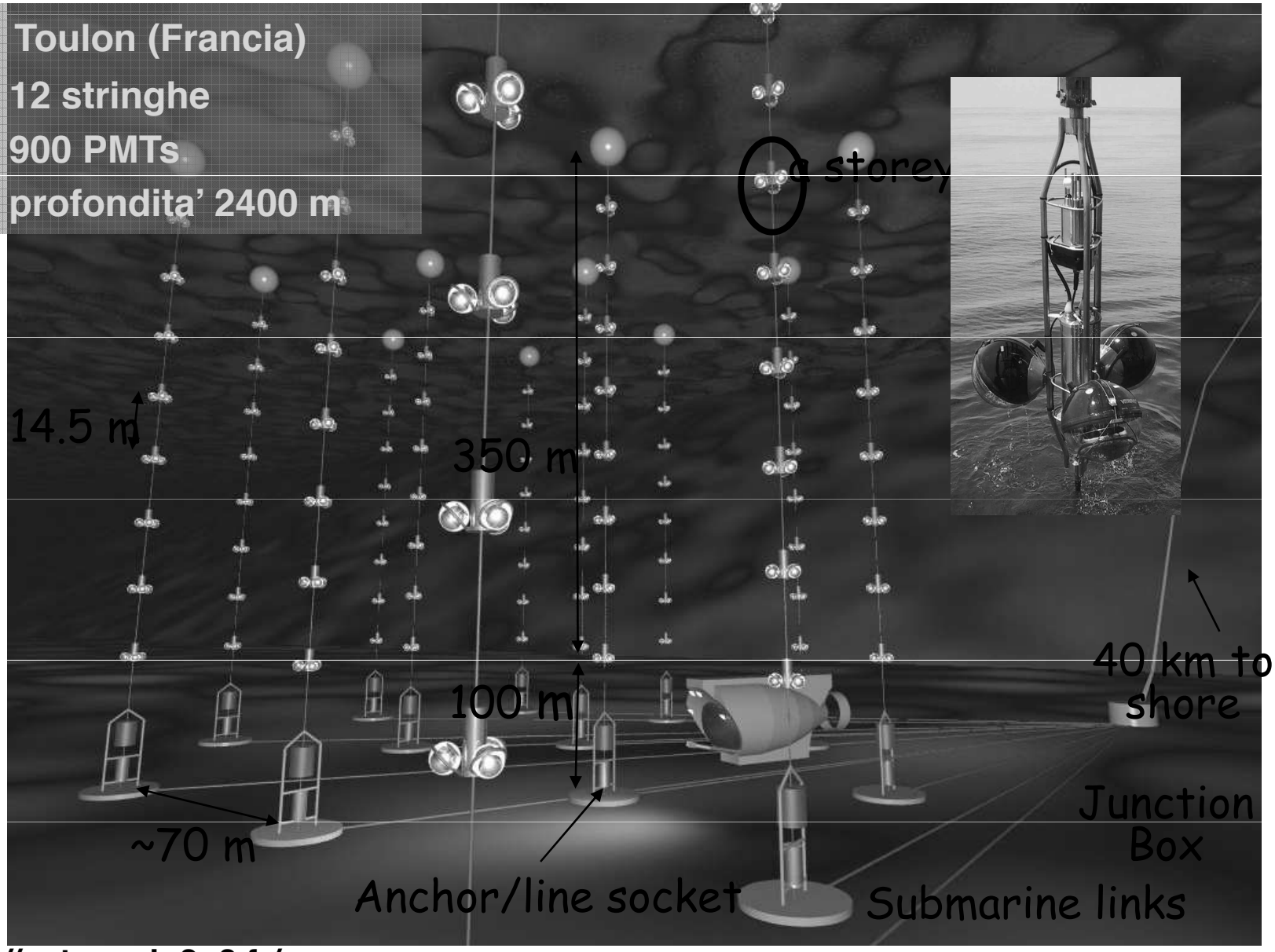
Potrebbero in futuro convergere nel progetto KM3NeT

Complementare ad IceCube, perche' situato nell'emisfero Nord



Il progetto ANTARES

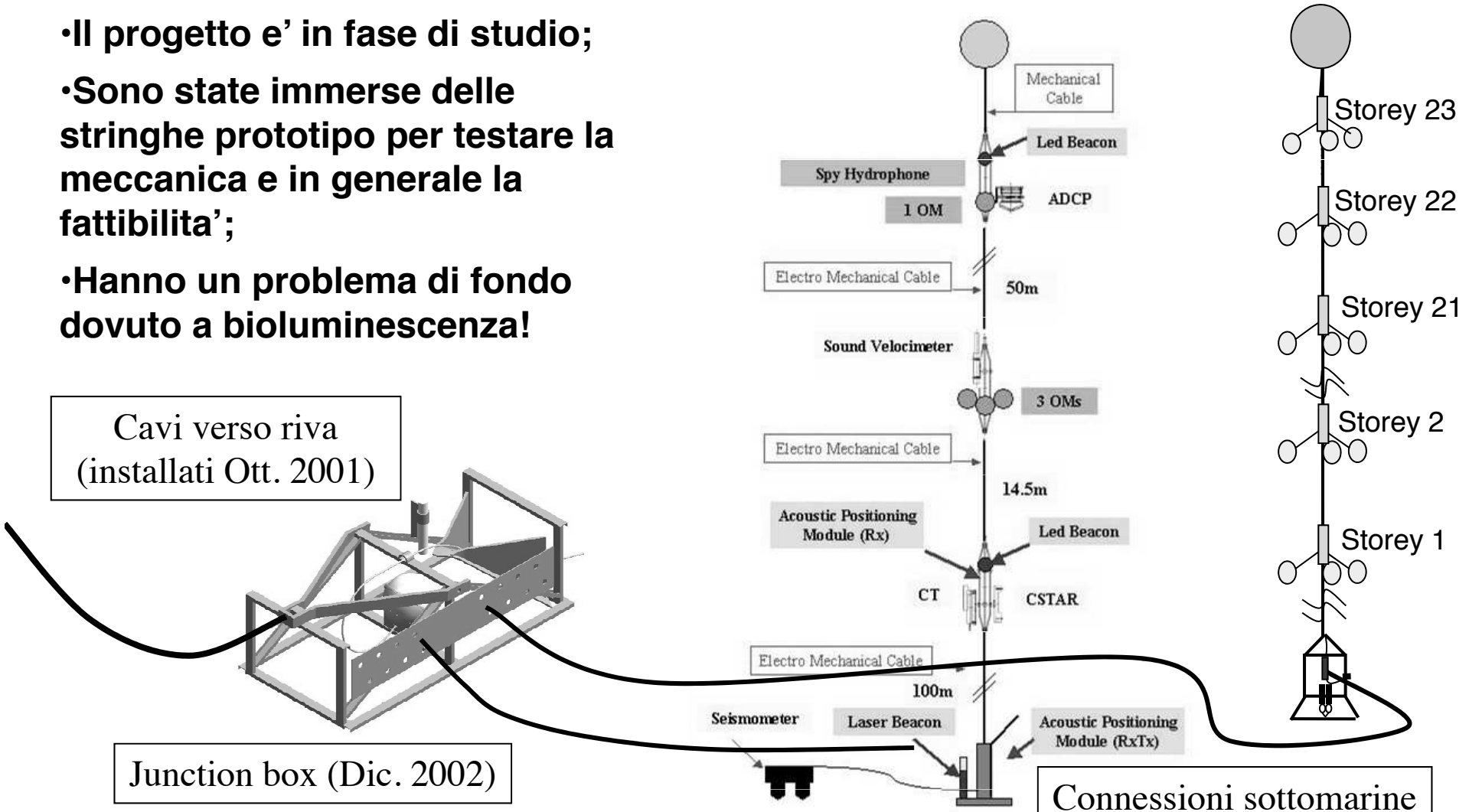
- Toulon (Francia)
- 12 stringhe
- 900 PMTs
- profondita' 2400 m



http://antares.in2p3.fr/

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)

Connessioni sottomarine (April 2005)

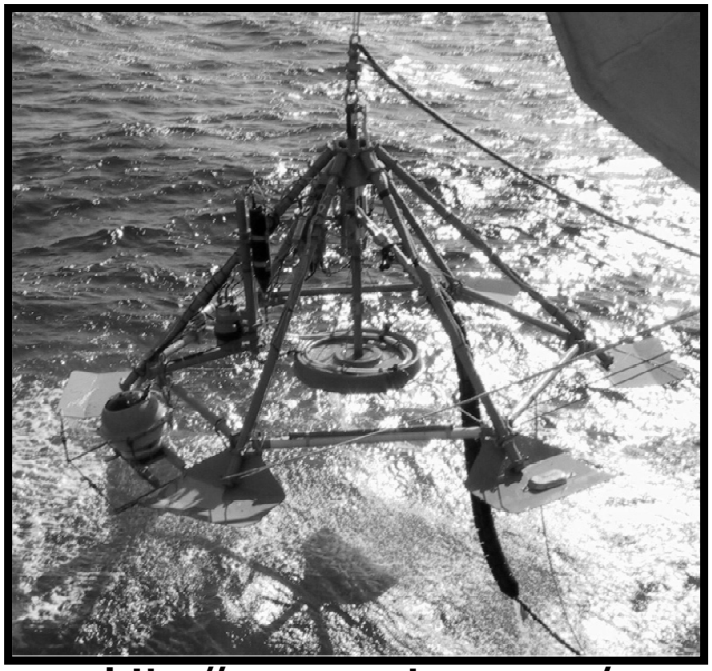
Il sito di ANTARES

Sottomarino per l'istallazione subacquea

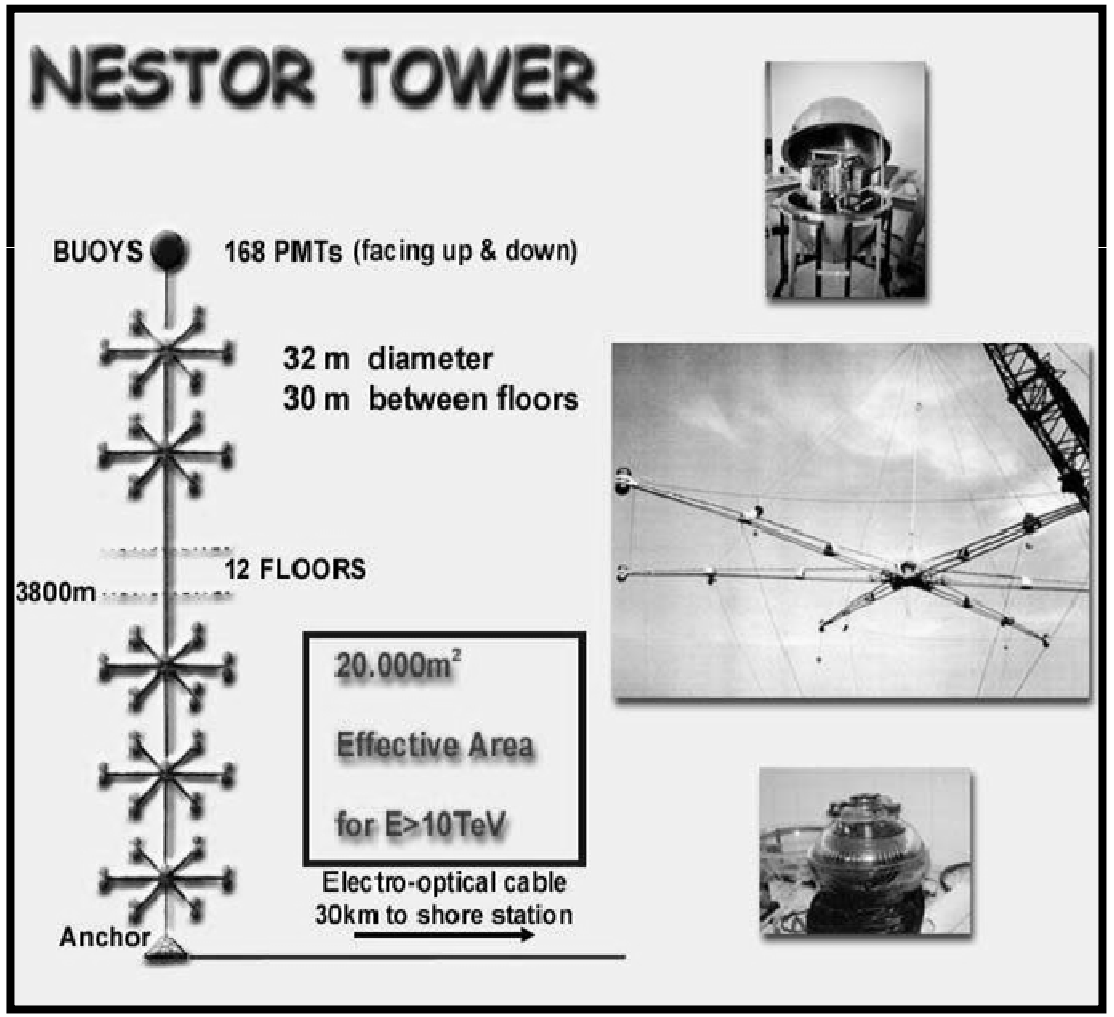
Junction box a 2400 m di profondita'

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;**



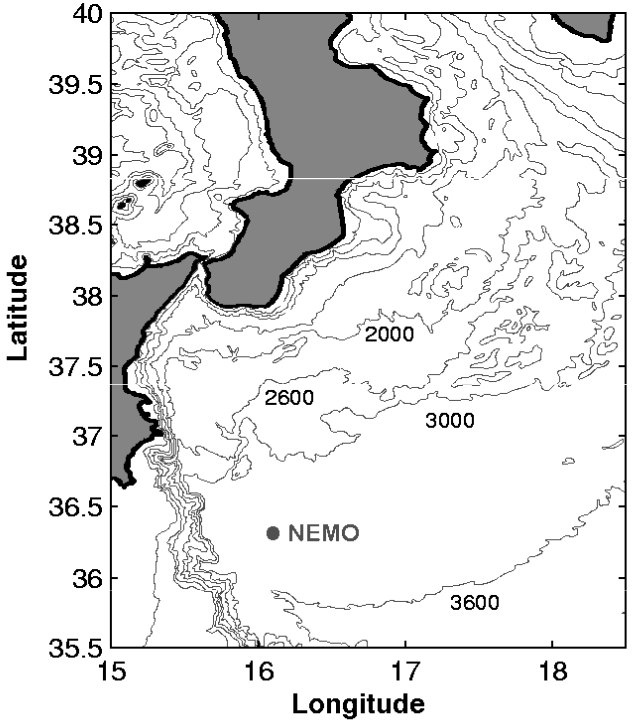
http://www.nestor.org.gr/



- **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 profondita';**
- **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;



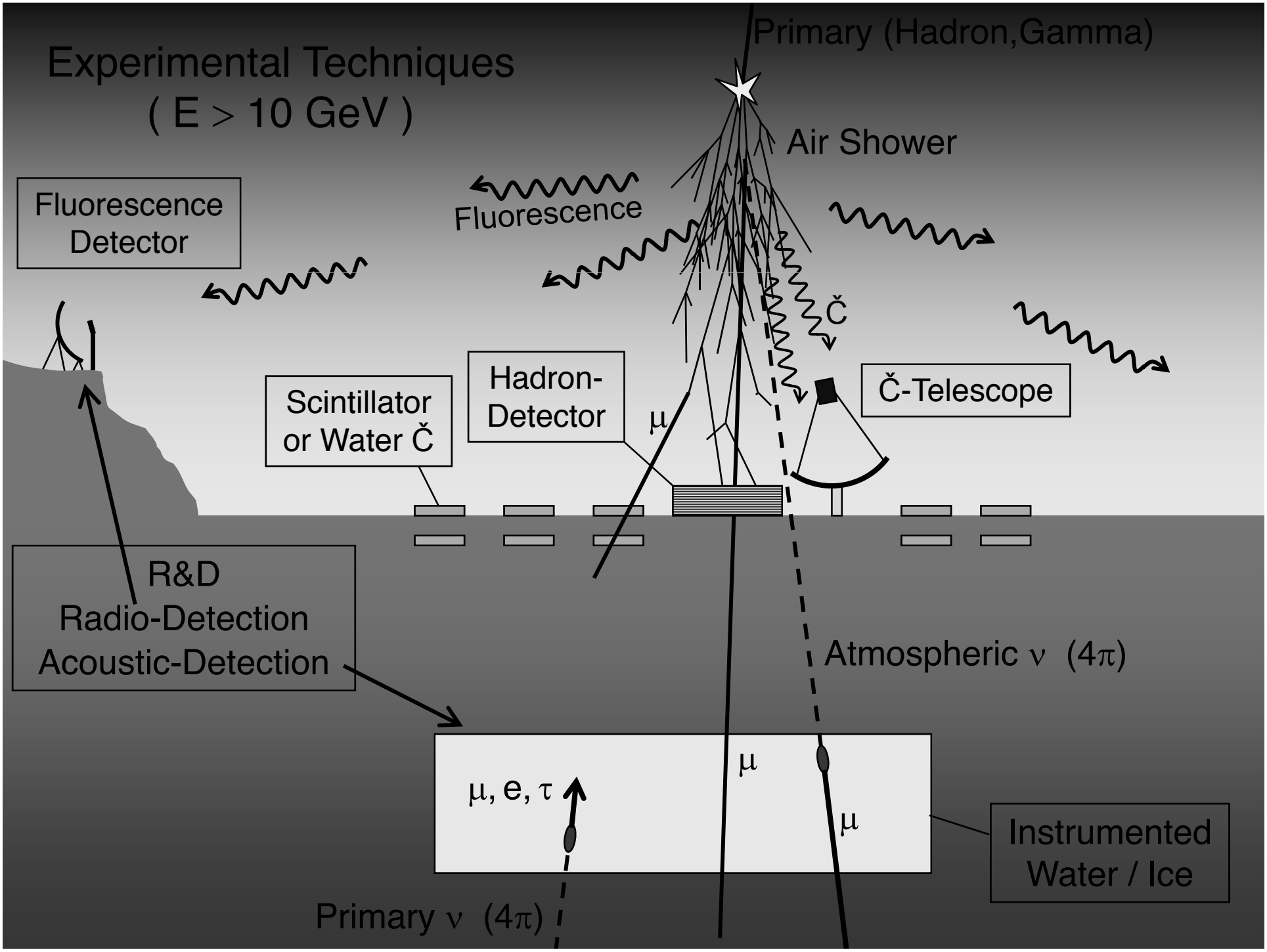
http://nemoweb.lns.infn.it/

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 ~ 0.3^0; (migliore di quella di IceCube, in quanto l'acqua ha in generale L_{scatt} maggiore);**
4. **Dovrebbe avere una soglia di E~ 100 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 GeV)
Primary (Hadron,Gamma)
Air Shower
Fluorescence
Fluorescence Detector
Č
Č-Telescope
Hadron-Detector
Scintillator or Water Č
μ
R&D
Radio-Detection
Acoustic-Detection
Atmospheric ν (4π)
μ, e, τ
μ
μ
Instrumented Water / Ice
Primary ν (4π)