

L'Astronomia dei Neutrini

Stefano Spagocci

GACB



Introduzione

- L'astronomia, per ovvie ragioni, fino ad alcuni decenni fa si è basata sulle osservazioni (successivamente anche fotografia e fotometria) nella banda del visibile.
- Negli ultimi decenni, però, si sono anche affermate astronomie che si basano sulle componenti non visibili dello spettro elettromagnetico e astronomie non basate sullo spettro elettromagnetico.
- Alla seconda categoria di astronomie, e in particolare all'astronomia del neutrino, è dedicata questa conferenza.



I Neutrini, Questi Sconosciuti

- Cominciamo col chiarire cosa siano queste "misteriose" particelle elementari.
- Attorno alla fine dell'Ottocento ricercatori quali Henry Becquerel e Pierre e Marie Curie scoprirono che certi elementi chimici si trasformano in altri elementi, emettendo opportune particelle.
- Si tratta della radioattività.



I Neutrini, Questi Sconosciuti

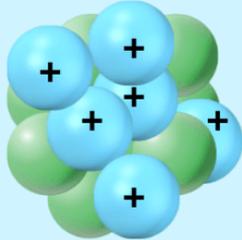
- Esistono tre tipi di radioattività: la alpha, la beta e la gamma.
- Radioattività alpha: emissione di nuclei di elio (due protoni e due neutroni).
- Radioattività beta: emissione di elettroni o antielettroni (positroni).
- Radioattività gamma: emissione di raggi gamma (fotoni di alta energia).



Beta Decay

Beta decay is radioactive decay that either releases an electron (beta minus) or positron (beta plus).

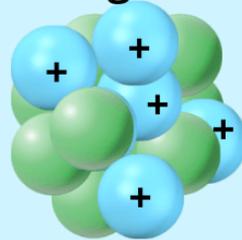
carbon-14



6 protons
8 neutrons



nitrogen-14



7 protons
7 neutrons

antineutrino

+

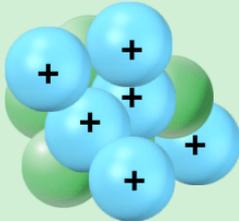


+

electron



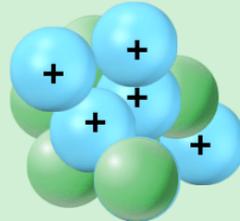
carbon-10



6 protons
4 neutrons



boron-10



5 protons
5 neutrons

neutrino

+



+

positron



I Neutrini, Questi Sconosciuti

- Per quanto riguarda il decadimento beta, fu osservato che gli elettroni o positroni emessi non hanno sempre la stessa energia.
- Questo comportamento fu da Wolfgang Pauli (1930) interpretato come dovuto al fatto che una "misteriosa" particella è emessa insieme all'elettrone o positrone e si porta via parte dell'energia.



I Neutrini, Questi Sconosciuti

- Tale particella doveva avere carica elettrica e massa nulle (si è poi scoperto che il neutrino ha massa, seppur molto piccola).
- Il nome "neutrino" è dovuto ad Enrico Fermi che elaborò la prima teoria del decadimento beta.



	First generation	Second generation	Third generation
LEPTON	 Electron neutrino	 Muon neutrino	 Tau neutrino
	 Electron	 Muon	 Tau
QUARK	 Up	 Charm	 Top
	 Down	 Strange	 Bottom



- Il neutrino non ha carica elettrica e "sente" solo la forza debole, quindi praticamente non interagisce con le altre particelle che trova sul suo cammino.
- Un neutrino può attraversare un muro di piombo avente spessore di un anno luce come se fosse vuoto (la cosa vale anche per i neutrini cosmici con la Terra)!



Scoperta del Neutrino

- Questa “misteriosa” particella negli anni Trenta era solo un'ipotesi.
- Clide Cowan e Frederick Reines idearono un esperimento che portò alla scoperta del neutrino (1955).
- Nell'esperimento di Cowan e Reines si rivelarono gli antineutrini provenienti dal reattore nucleare di Savannah River (South Carolina, USA).



Scoperta del Neutrino

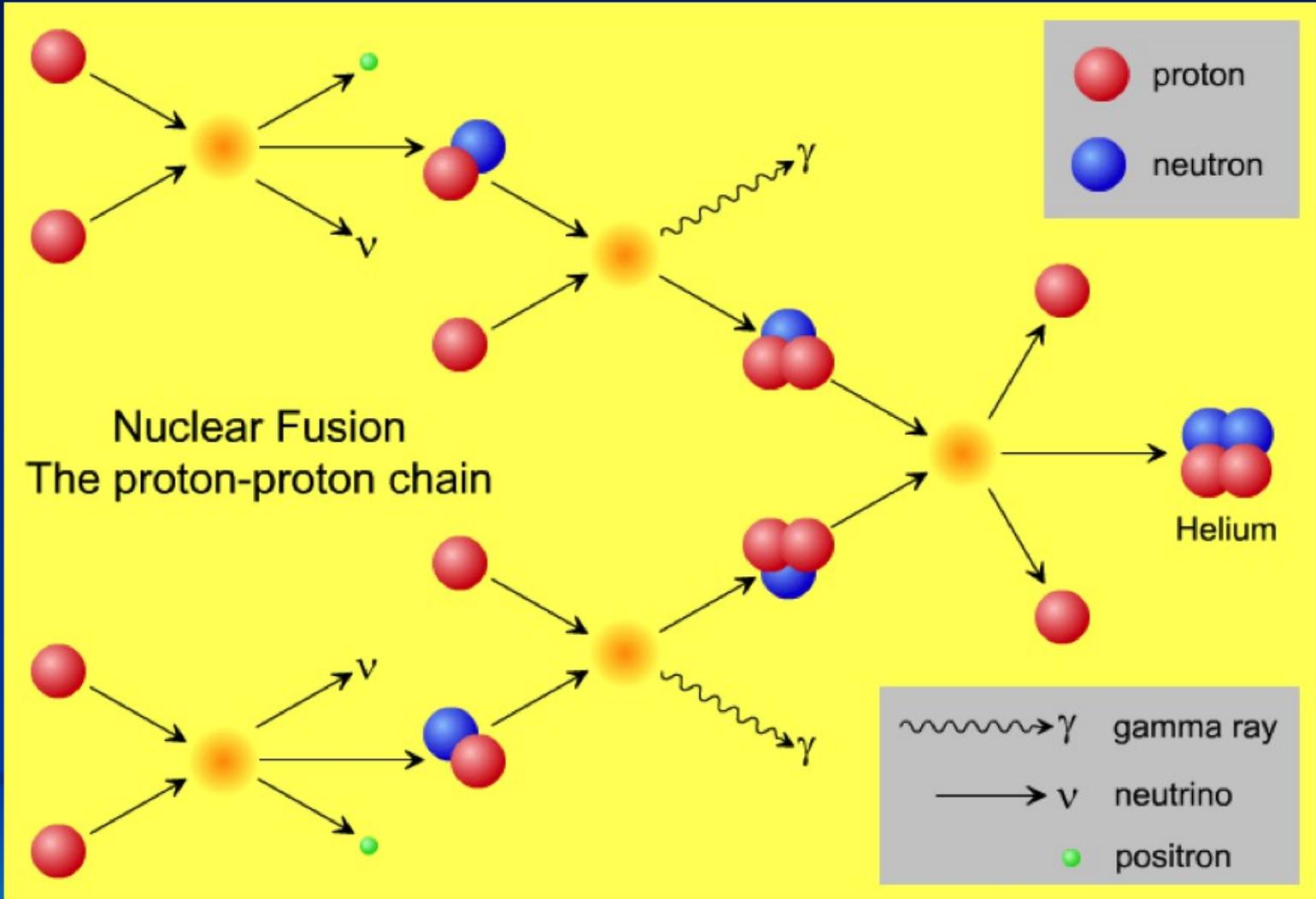
- Nell'esperimento di Cowan e Reines gli antineutrini interagivano con i protoni in una vasca da 200 litri di acqua, trasformandoli in neutroni, con emissione di un positrone (decadimento beta inverso).
- Un positrone si trasforma in due fotoni gamma. Nella vasca erano poi disciolti 40 kg di cadmio. Il cadmio assorbiva il neutrone, emettendo a sua volta raggi gamma.



Scoperta del Neutrino

- La "firma" dell'antineutrino era l'emissione di due raggi gamma seguiti, dopo alcuni millisecondi, da altri raggi gamma.
- Si registrò un flusso di circa 3 reazioni per ora, come la teoria aveva previsto.
- Per la scoperta del neutrino a Reines fu conferito il Premio Nobel per la Fisica 1995.





Hydrogen to Helium – Neutrino creation

Image Credit – Randy Russell

Neutrini Solari

- Le reazioni nucleari al centro del Sole (e delle altre stelle) portano all'emissione di neutrini.
- Fu dunque naturale cercare di rivelare tali neutrini.
- Il primo esperimento fu quello della miniera di Homestake (South Dakota, USA), ideato da Raymond Davis (Premio Nobel per la Fisica 2002).



Neutrini Solari

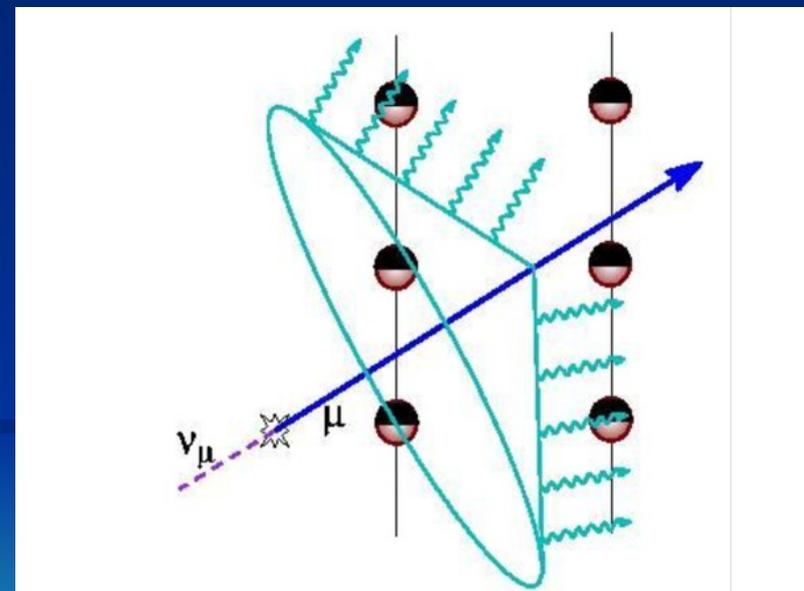
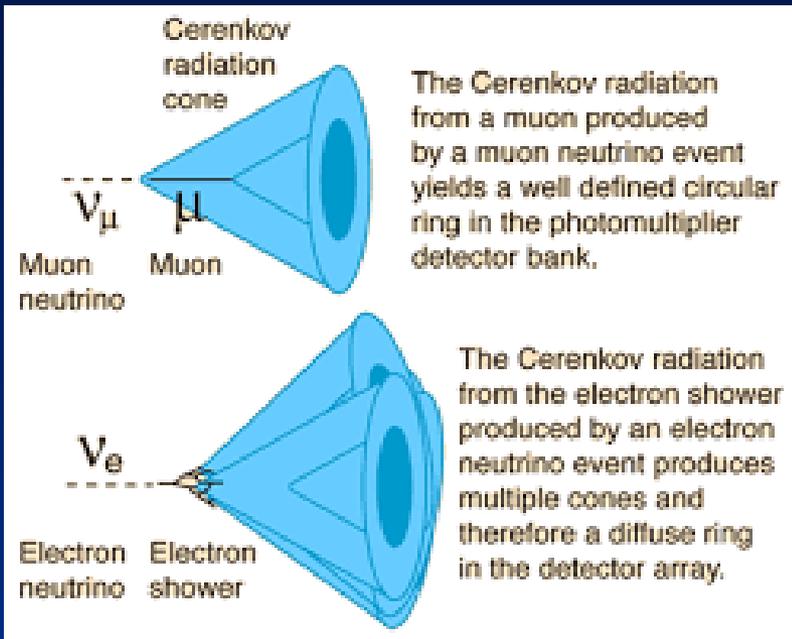
- Nell'esperimento di Homestake (1965, posto 1400 m sotto terra per schermarsi dai raggi cosmici) si aveva una vasca contenente 615 tonnellate di tetracloroetilene.
- Il cloro 37 del tetracloroetilene, investito da un neutrino, si trasforma in argon 37. E' stato così possibile rivelare i neutrini.

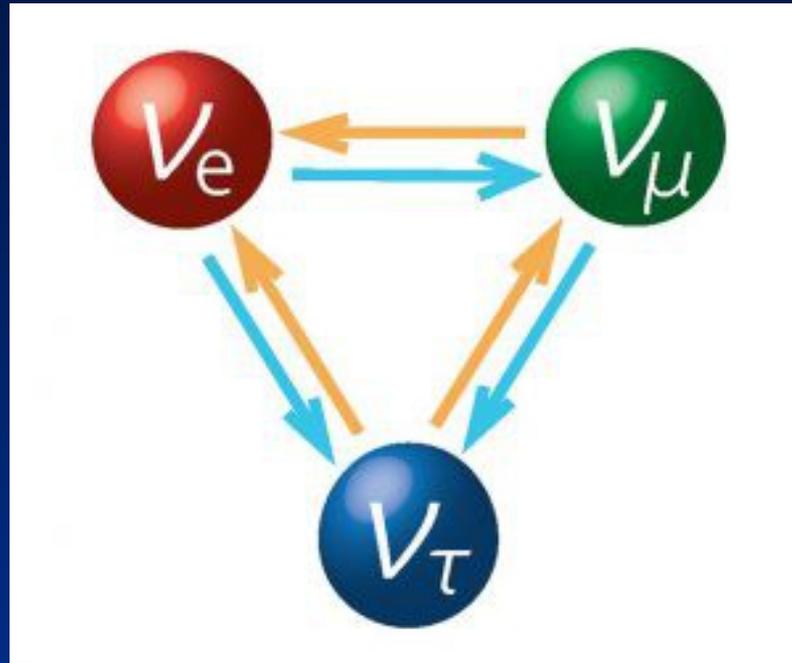


Neutrini Solari

- I risultati di Homestake (circa 10 eventi al giorno) furono confermati dall'esperimento KamiokaNDE (1985, miniera di Kamioka, Giappone, 3000 tonnellate di acqua, situato a 1000 m di profondità).
- Per le ragioni che vedremo, entrambi gli esperimenti trovarono un flusso di neutrini solari pari a circa $1/3$ del valore atteso!







- Come previsto alla fine degli anni '50 da Bruno Pontecorvo, i neutrini possono oscillare tra neutrino elettronico, neutrino muonico e neutrino tauonico, trasformandosi periodicamente da una forma all'altra. Per questa ragione si trovò un flusso pari ad $1/3$ circa del valore atteso!

Neutrini Solari

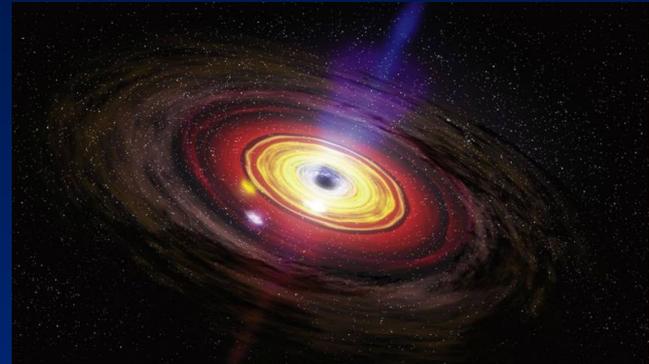
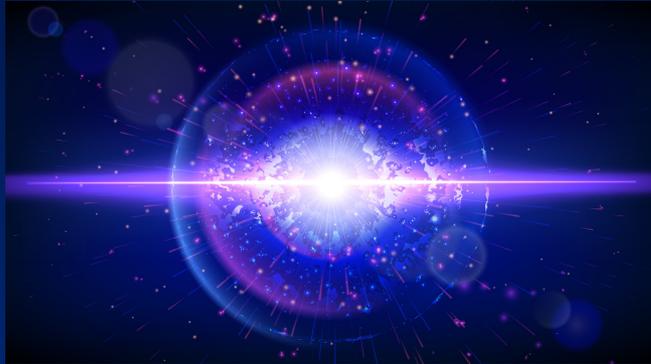
- L'oscillazione dei neutrini fu poi più direttamente confermata dagli esperimenti Super-KamiokaNDE (1998, 50000 tonnellate di acqua!) e SNO - Sudbury Neutrino Observatory (2001, a 2000 m di profondità, miniera di Sudbury, Canada).



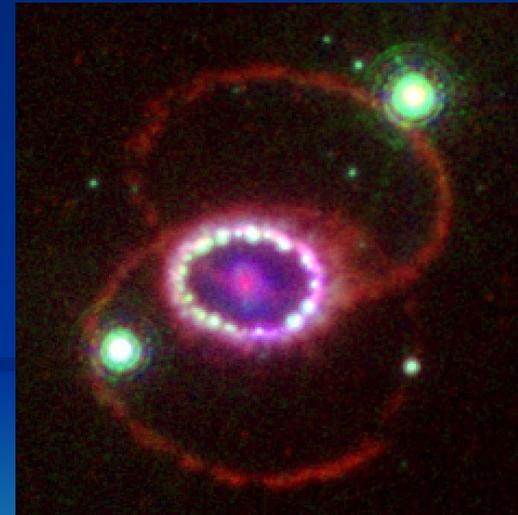
Neutrini Solari

- Per la rivelazione dei neutrini solari il Nobel per la Fisica 2002 fu attribuito a Raymond Davis (Homestake) e Masatoshi Koshiba (KamiokaNDE).
- Per la conferma dell'oscillazione dei neutrini il Nobel per la Fisica 2015 fu attribuito a Takaaki Kajita (Super-KamiokaNDE) e Arthur McDonald (SNO).





- Neutrini possono essere generati da pulsar, supernovae e nuclei galattici attivi (protoni \rightarrow pioni \rightarrow muoni \rightarrow neutrini muonici ed elettroni \rightarrow neutrini elettronici).



SN 1987A

- SN 1987A è la supernova esplosa nel 1987 nella Grande Nube di Magellano (la supernova più vicina a noi dopo quelle galattiche).
- Quando una stella di grande massa esaurisce il "combustibile nucleare" gli strati più esterni precipitano verso il nucleo ad una velocità di 70000 km/s ($\frac{1}{4}$ della velocità della luce!)



SN 1987A

- Intanto il nucleo continua la sua contrazione, finchè la pressione quantistica (principio di esclusione di Pauli) non lo costringe ad arrestarsi.
- Gli strati esterni, poi, "rimbalzano" sul nucleo e ricominciano ad espandersi.
- L'emissione di neutrini (mediante il meccanismo prima descritto e come conseguenza della fusione di elettrone + protone \rightarrow neutrone) durante tali processi dura una decina di secondi.



SN 1987A

- Neutrini provenienti da SN 1987A furono contemporaneamente rivelati dagli esperimenti KamiokaNDE, IMB – Irving-Michigan-Brookhaven (USA) e dall'esperimento russo installato nel lago Baksan (Caucaso del nord).
- I flussi rivelati (da 5 a 9 neutrini!) si rivelarono essere quelli attesi sulla base dei calcoli teorici.



- Gli osservatori neutrinici riescono a rivelare tali particelle con il meccanismo al quale si è precedentemente accennato: i neutrini, interagendo con i protoni delle molecole d'acqua, producono muoni. I muoni, che viaggiano ad una velocità superiore a quella della luce nell'acqua, emettono il caratteristico cono di luce blu di Čerenkov che viene rivelata da schiere di fotomoltiplicatori.



Osservatori Neutrinici

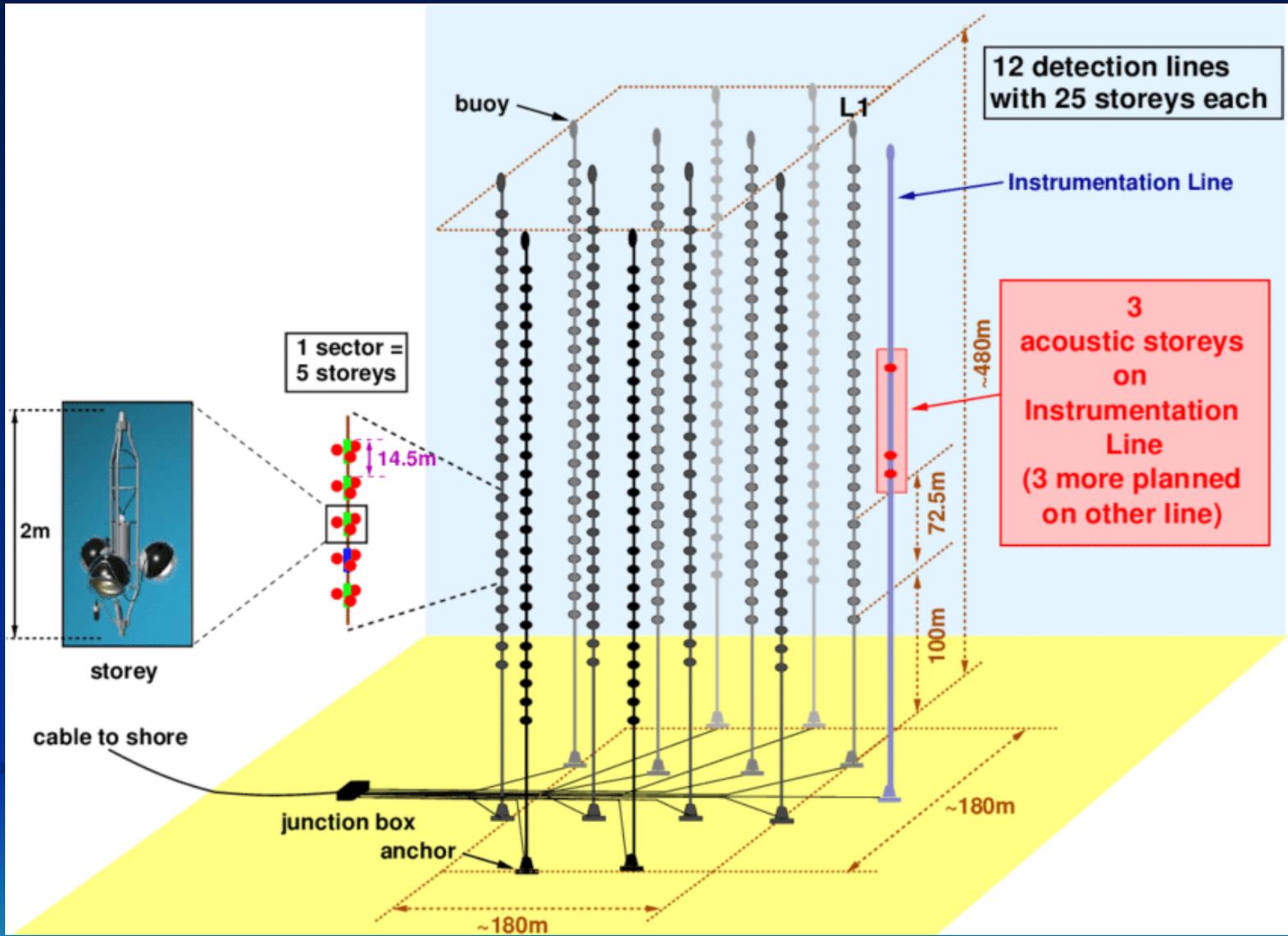
- Per schermarsi dai raggi cosmici, che darebbero segnali che simulano la rivelazione di un neutrino, i primi osservatori neutrinici "guardavano verso il basso".
- In tal modo, infatti, i muoni dai raggi cosmici erano assorbiti dalla Terra, mentre i neutrini non incontravano praticamente ostacolo.



Osservatori Neutrinici

- Uno dei primi osservatori neutrinici fu quello russo, sito nel lago Bajkal (1993, Siberia meridionale, collocato 1000 m sott'acqua).
- Illustrato nella figura seguente è l'osservatorio ANTARES (2008, sito al largo di Tolone - Francia, a 2500 m di profondità).

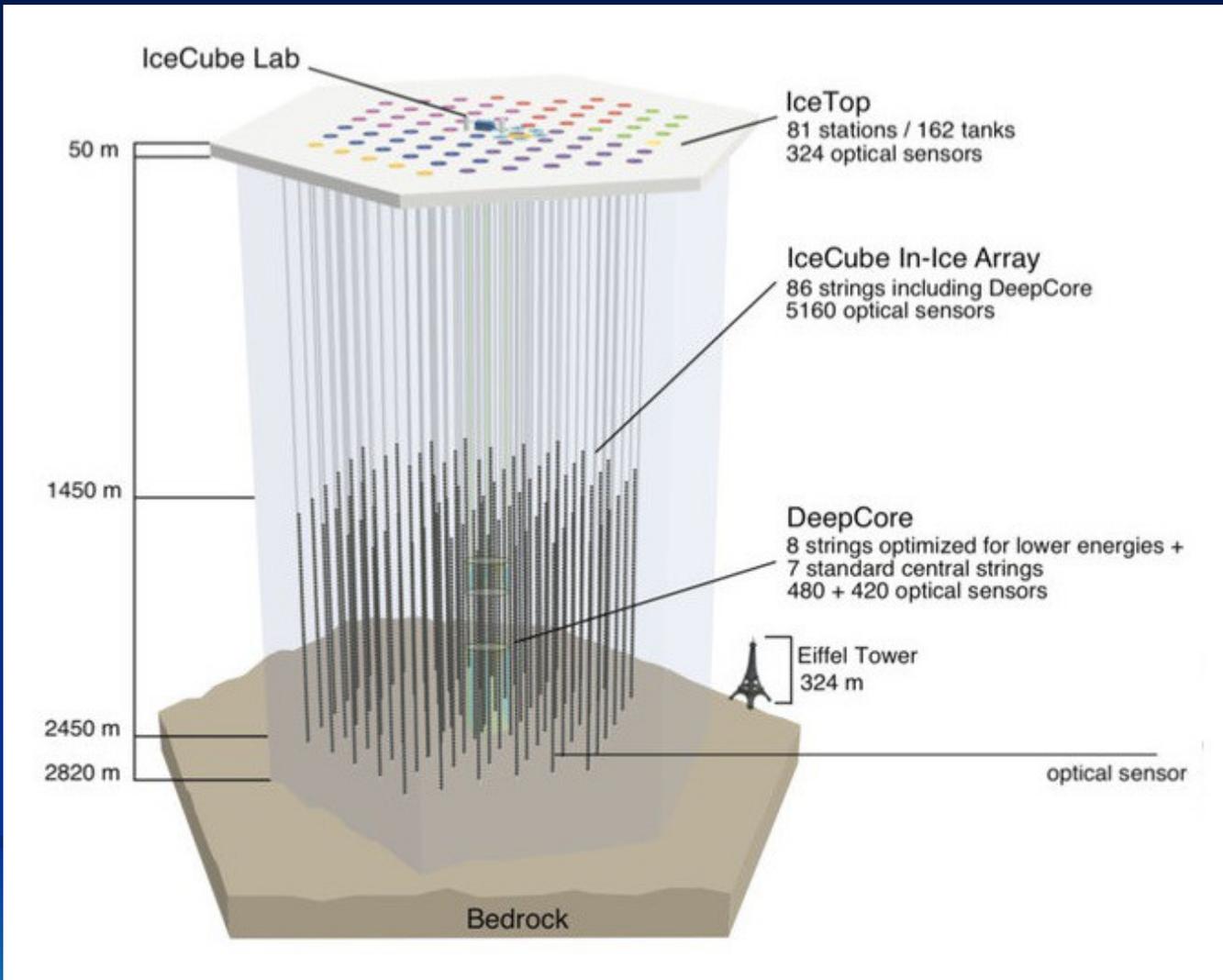




Osservatori Neutrinici

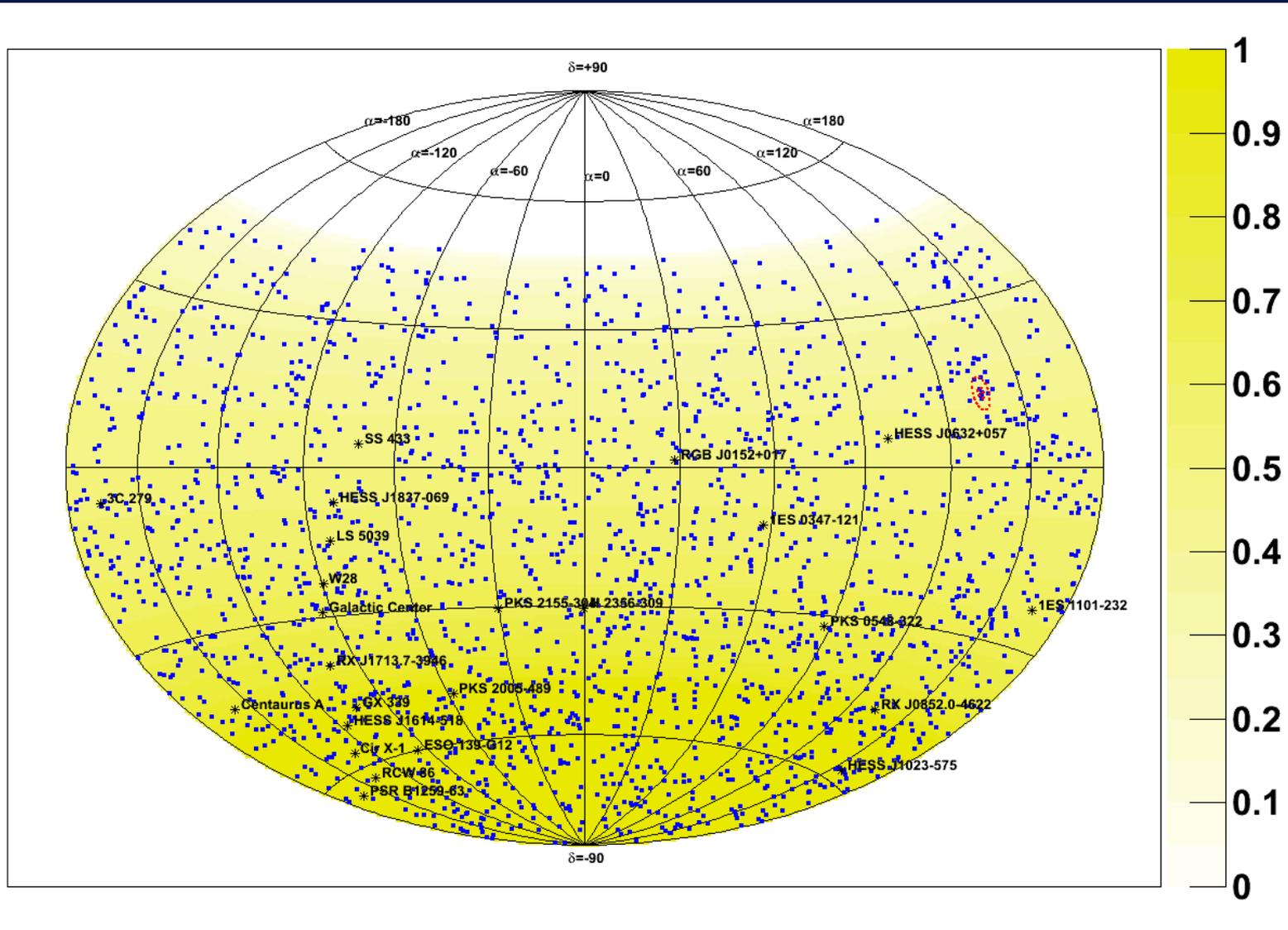
- Un osservatorio europeo ancora in fase di progetto e costruzione è KM3NET che, come suggerisce la sigla, sarà un reticolo di rivelatori avente 1 km di lato!
- Va poi citato l'osservatorio AMANDA, costituito da una schiera di rivelatori nel ghiaccio antartico (1995, sito ad una profondità tra 1500 e 2000 m).





- Ad AMANDA ha fatto seguito il precedentemente illustrato IceCube (2005, sito al Polo Sud), una schiera di rivelatori disposti lungo un reticolo avente 1 km di lato (tra 1450 e 2450 m di profondità)!





- Come mostra la figura precedente, si sono avute delle identificazioni di massima per varie sorgenti di neutrini cosmici. Il numero di neutrini finora rivelati, però, è troppo piccolo per consentire identificazioni più precise.

