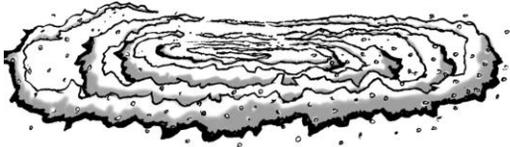


DUMAS



**THE THREE MESSENGERS
ALL FOR ONE, ONE FOR ALL**

I Tre Messaggeri

Lorenzo Caccianiga
Seminari Art and Science

08/05/2023

Lorenzo Caccianiga

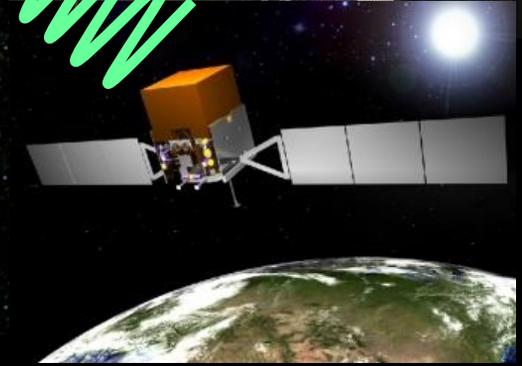
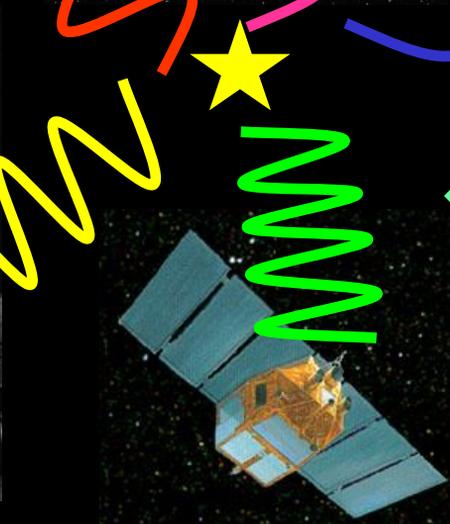
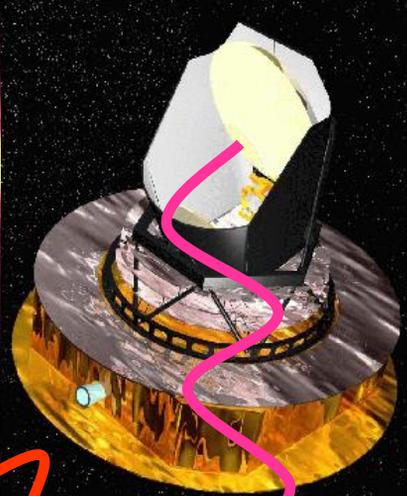
Lorenzo.caccianiga@mi.infn.it

Cosa fa un astrofisico?



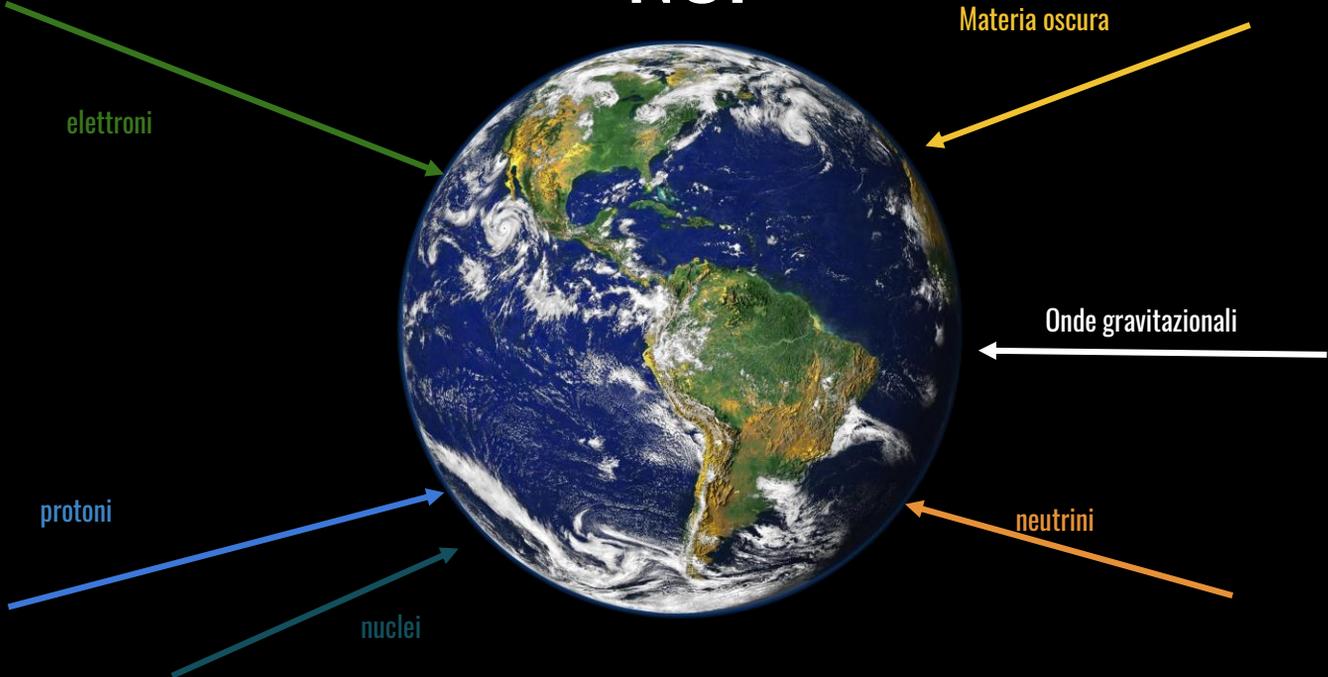
Cosa fa un astrofisico?





è tutto quello che ci arriva dallo spazio?

NO!



elettroni

Materia oscura

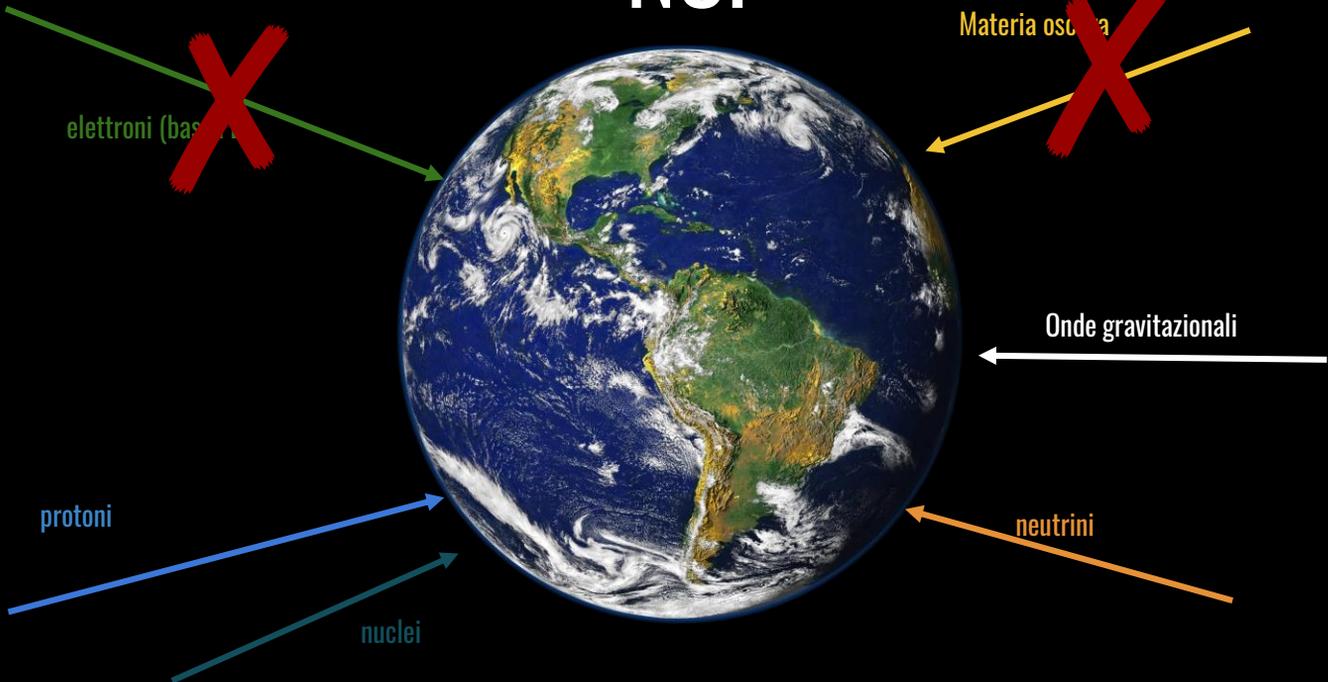
Onde gravitazionali

protoni

neutrini

nuclei

NO!



elettroni (bas)

Materia oscura

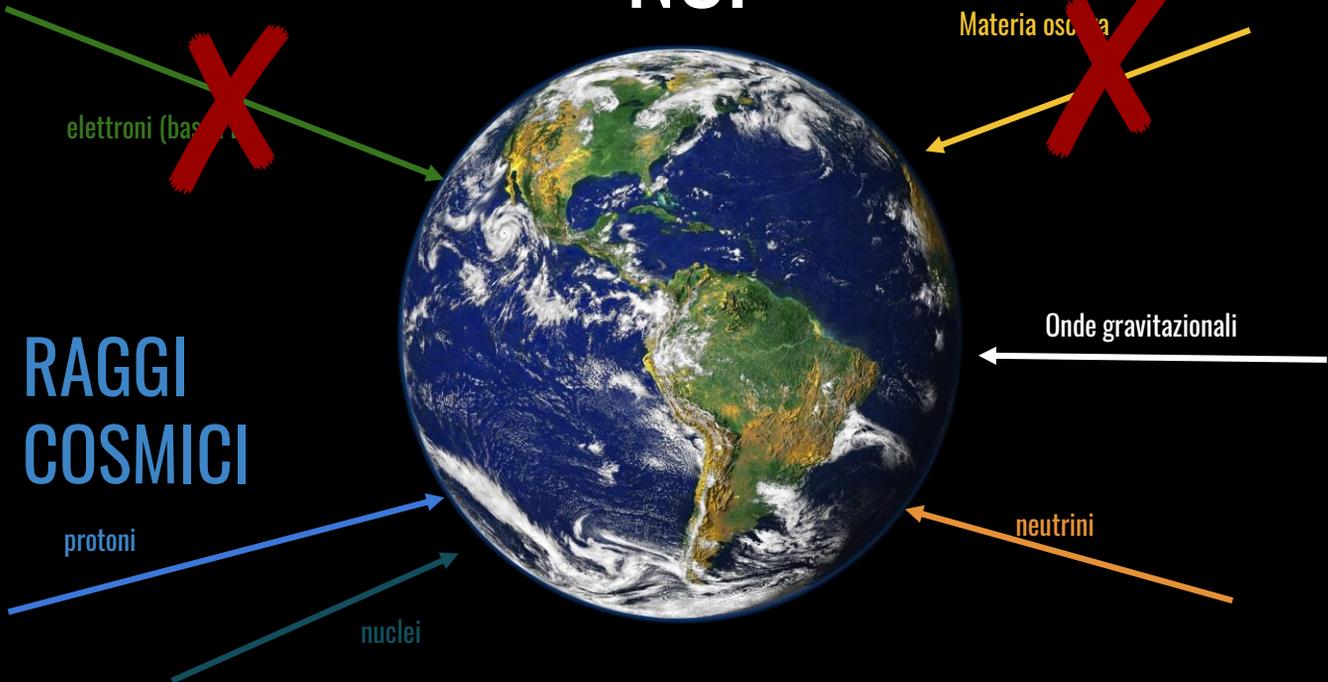
Onde gravitazionali

neutrini

protoni

nuclei

NO!



**RAGGI
COSMICI**

protoni

nuclei

Materia oscura

Onde gravitazionali

neutrini

elettroni (bas)

MATTER



Quarks



Leptons

FORCE



Gauge Bosons

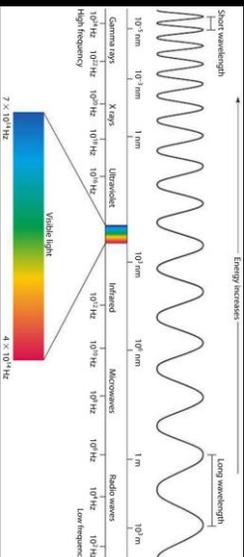


Higgs Boson?

THE STANDARD MODEL OF
PARTICLES AND FORCES

IS THIS ALL THAT EXISTS?

Luce



Neutrini



Onde Gravitazionali



Raggi cosmici



Nuclei



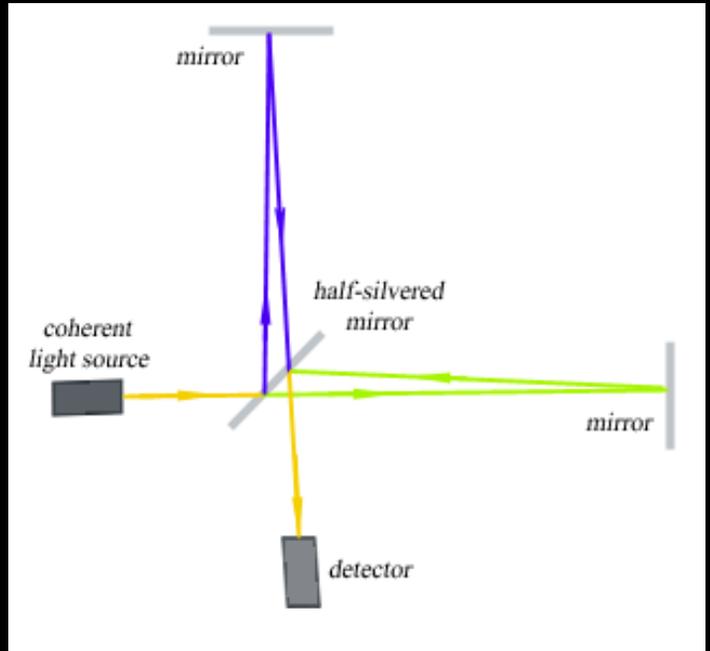
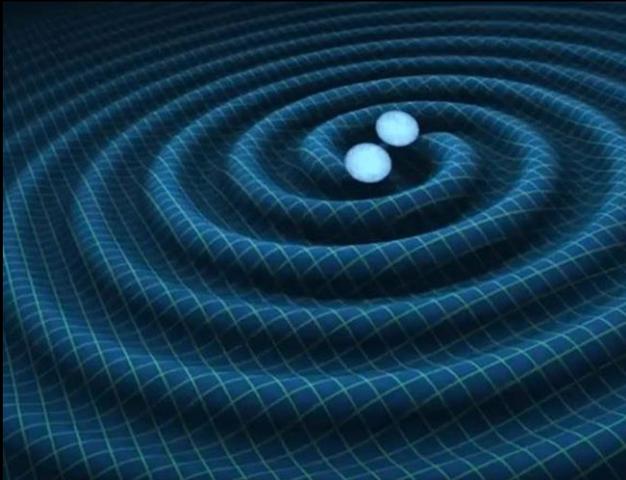
Protoni



Elettroni

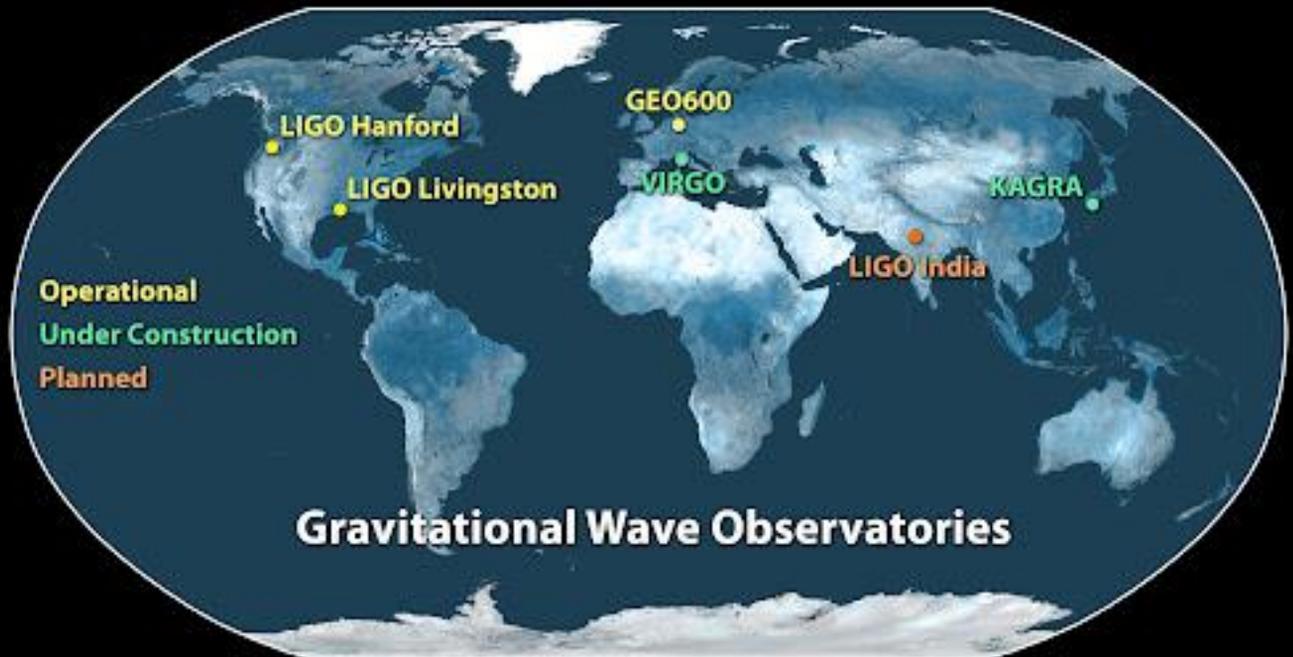


Onde Gravitazionali



Onde Gravitazionali

In progettazione: Einstein Telescope
(Forse in Sardegna)

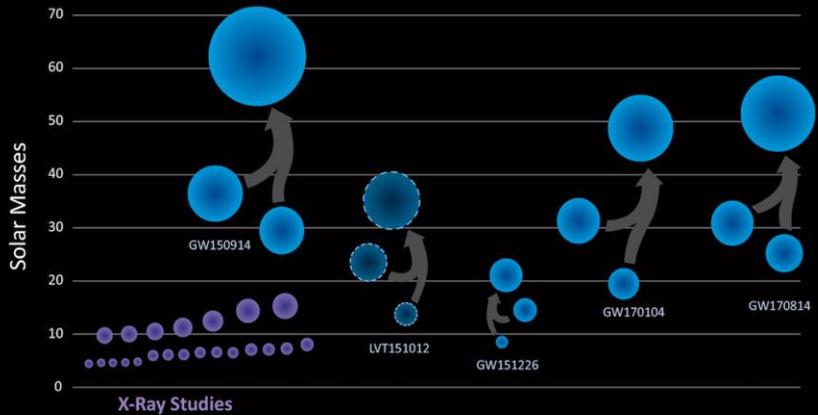


Onde Gravitazionali



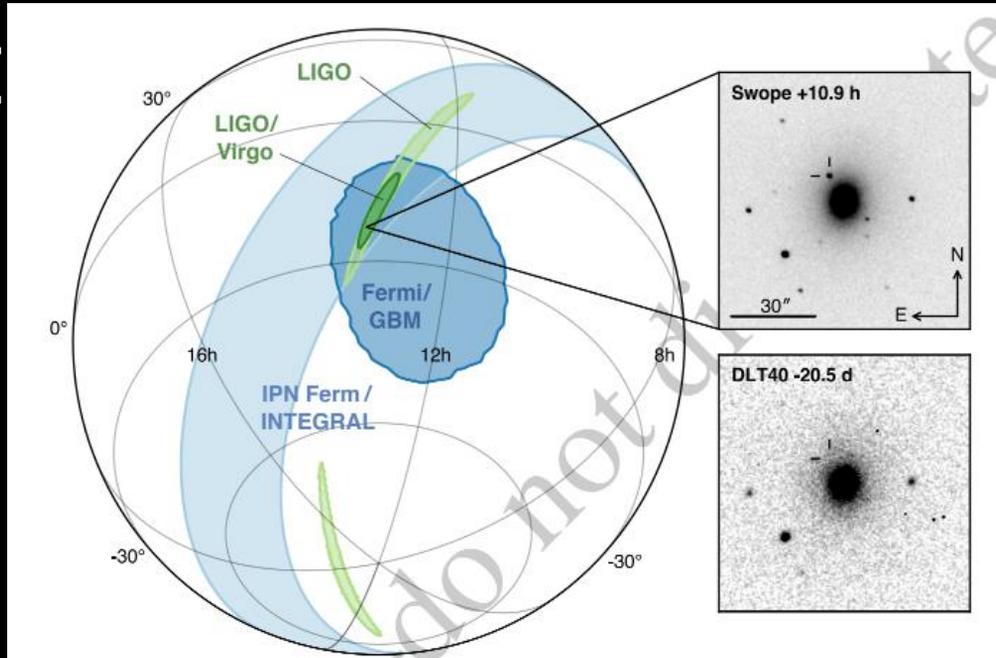
Onde Gravitazionali

Black Holes of Known Mass



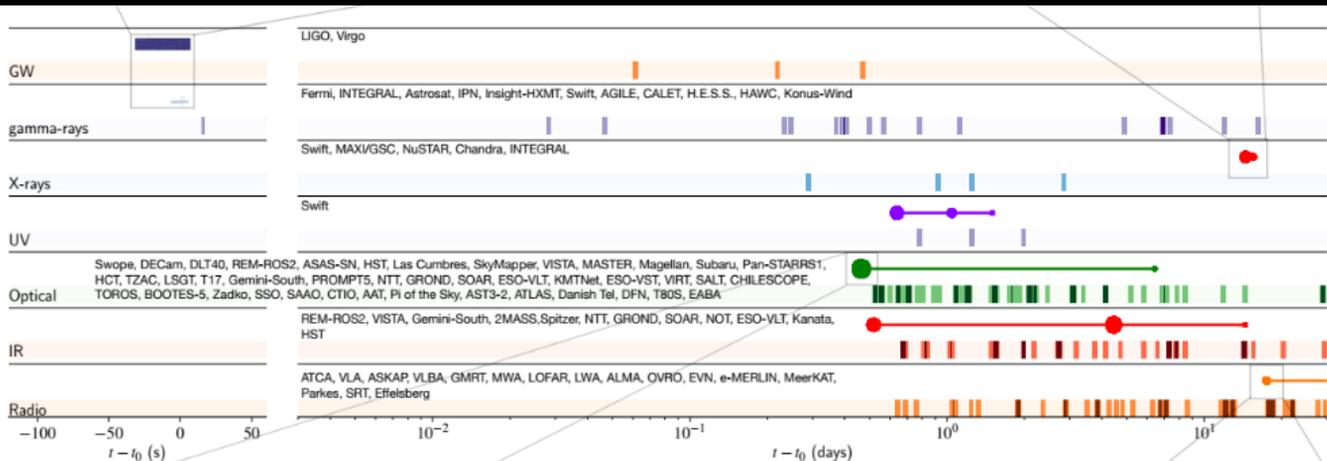
LIGO/VIRGO

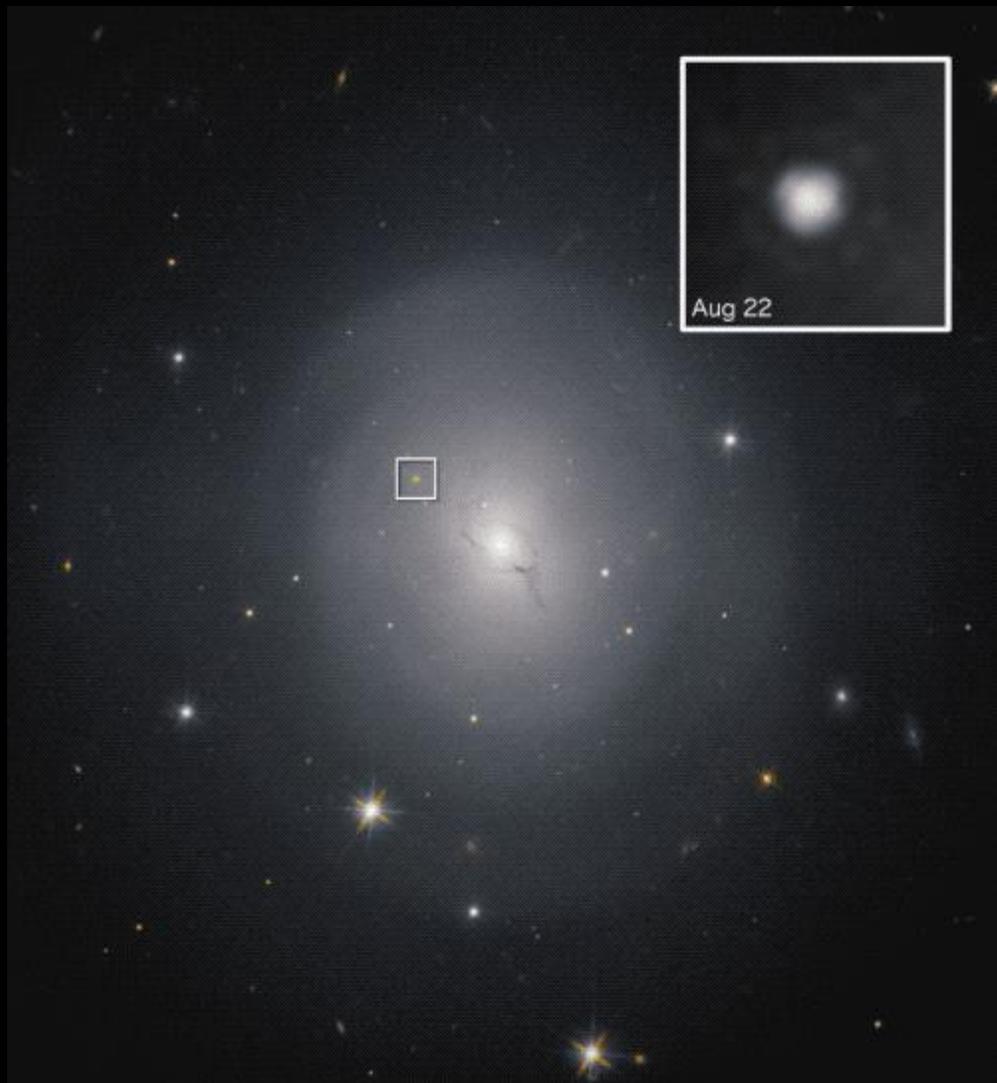
Onde Gravitazionali – stelle di neut



GW170817 – 40 Mpc di Distanza

Onde Gravitazionali

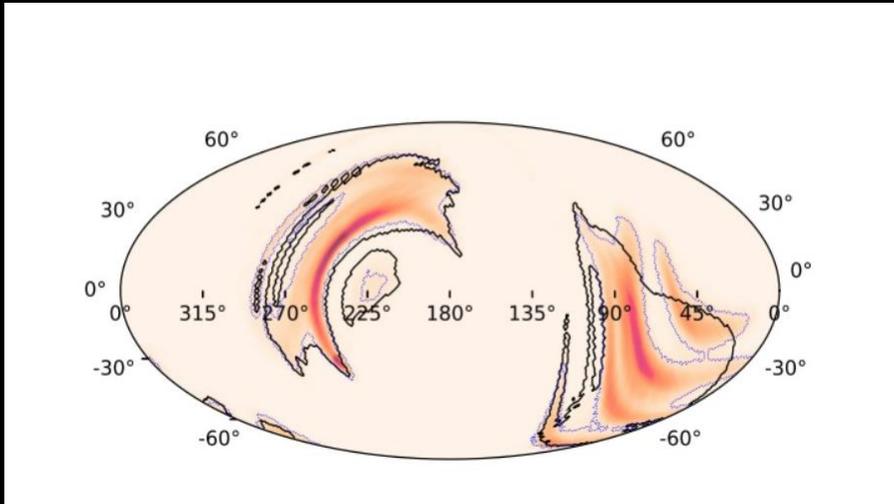




Aug 22

<https://youtu.be/zTs1yu-ezbY>

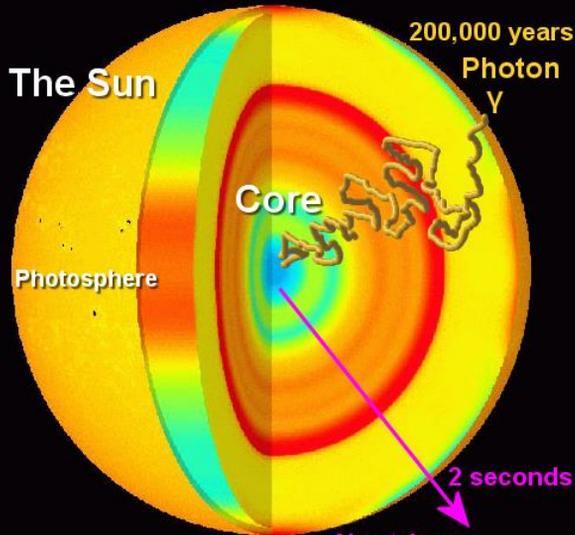
GW190425 – A new hope?



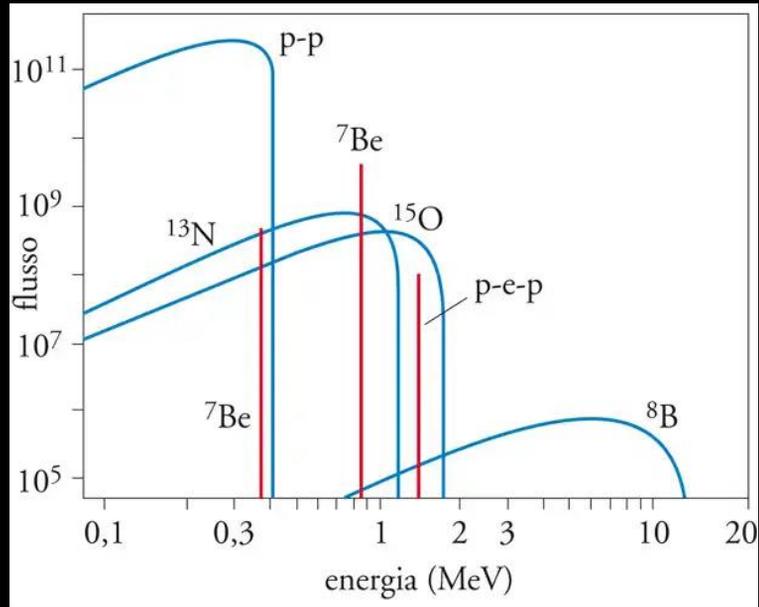
150 Mpc di Distanza – troppi candidati!

Neutrini solari

Photons take a long and tortuous path

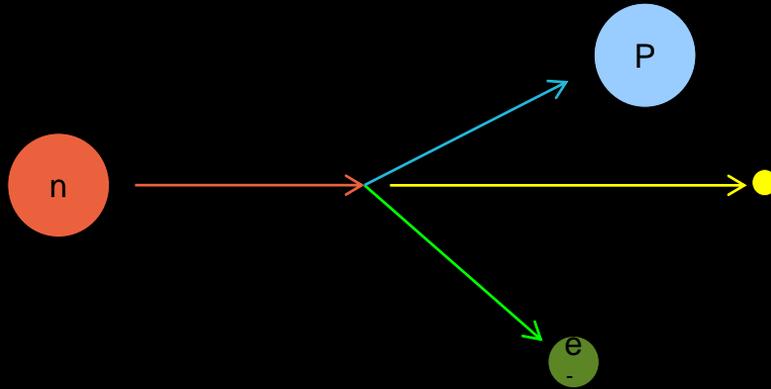


Neutrinos zip through quickly



i Neutrini

Teorizzati negli anni '30 da Pauli e Fermi per spiegare lo spettro del decadimento del **neutrone**



Breve parentesi: In realtà esistono 3 tipi di neutrini (ognuno con associata un'antiparticella):
elettronico muonico tau

MATTER



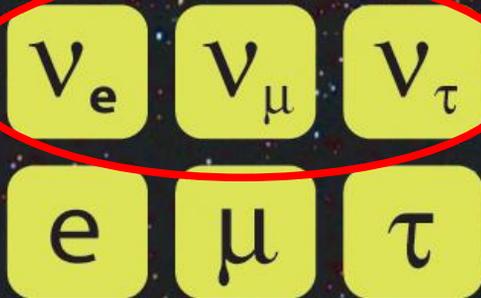
Quarks

FORCE



Gauge Bosons

Ma perché
Nel
decadimento
 β non li
vediamo?



Leptons



Higgs Boson?

THE STANDARD MODEL OF
PARTICLES AND FORCES

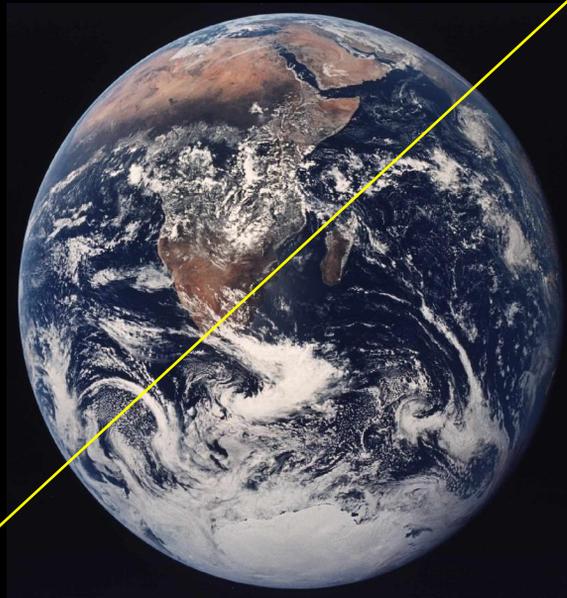
IS THIS ALL THAT EXISTS?

Parentesi: le interazioni fondamentali

	"forza" relativa	Raggio di azione
Interazione forte	10^{38}	10^{-15}m
Interazione elettromagnetica	10^{36}	∞
Interazione debole	10^{25}	10^{-18}m
Interazione gravitazionale	1	∞

Ma i neutrini Sono Leptoni Sono neutri (carica nulla!)

Quindi interagiscono poco!



● Neutrini

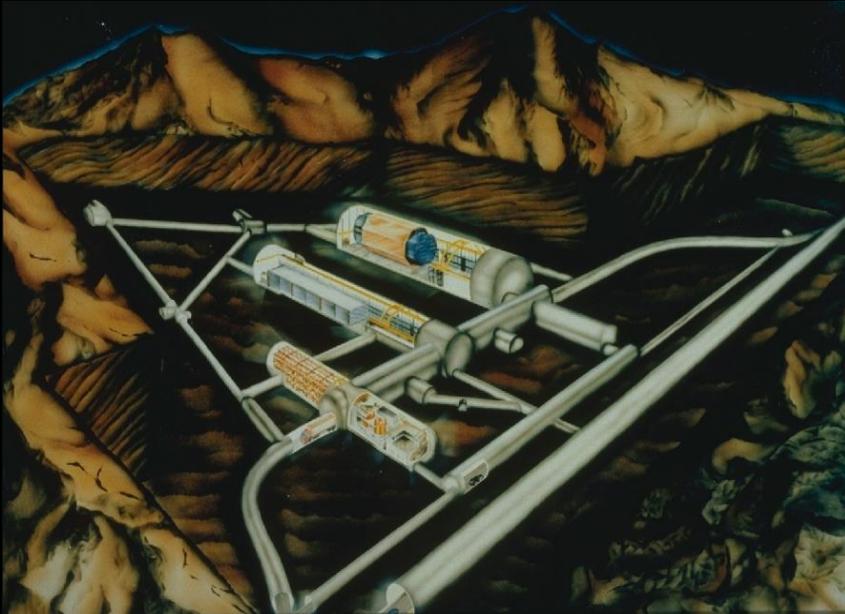
Questo non ci piace perchè....

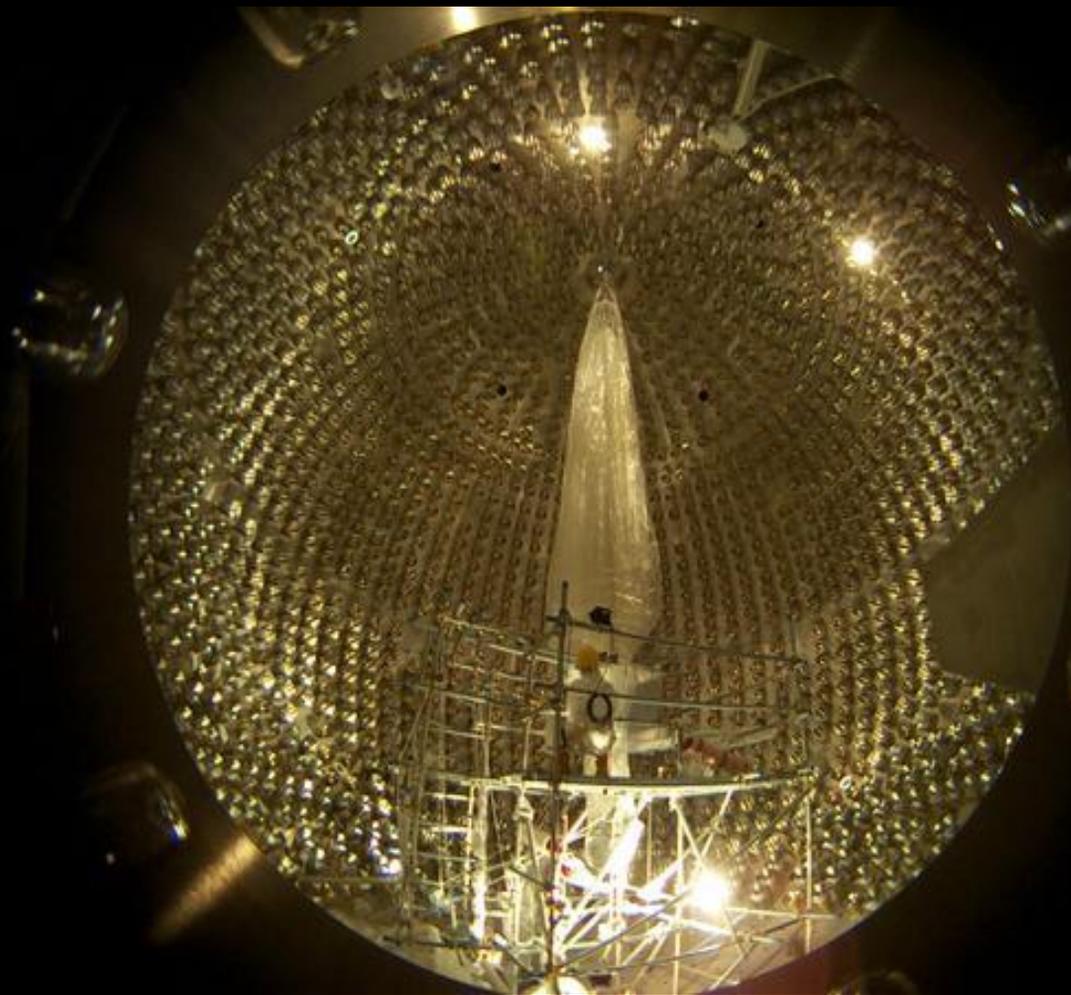
È difficilissimo rivelarli

Servono

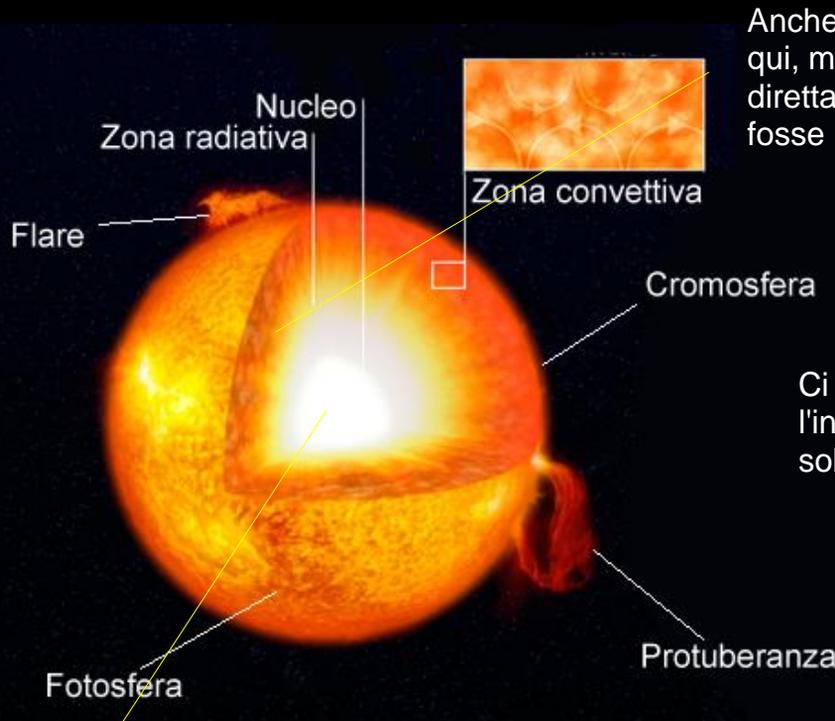
Laboratori sotterranei per schermarsi dai raggi cosmici

Grandi masse dove fare interagire i neutrini (tanta massa-> tanti atomi con cui il neutrino può interagire)

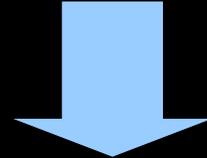




Ma ci piace perchè....

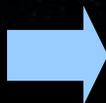


Anche i Neutrini vengono prodotti qui, ma interagendo poco arrivano direttamente a noi come se non ci fosse nulla di mezzo



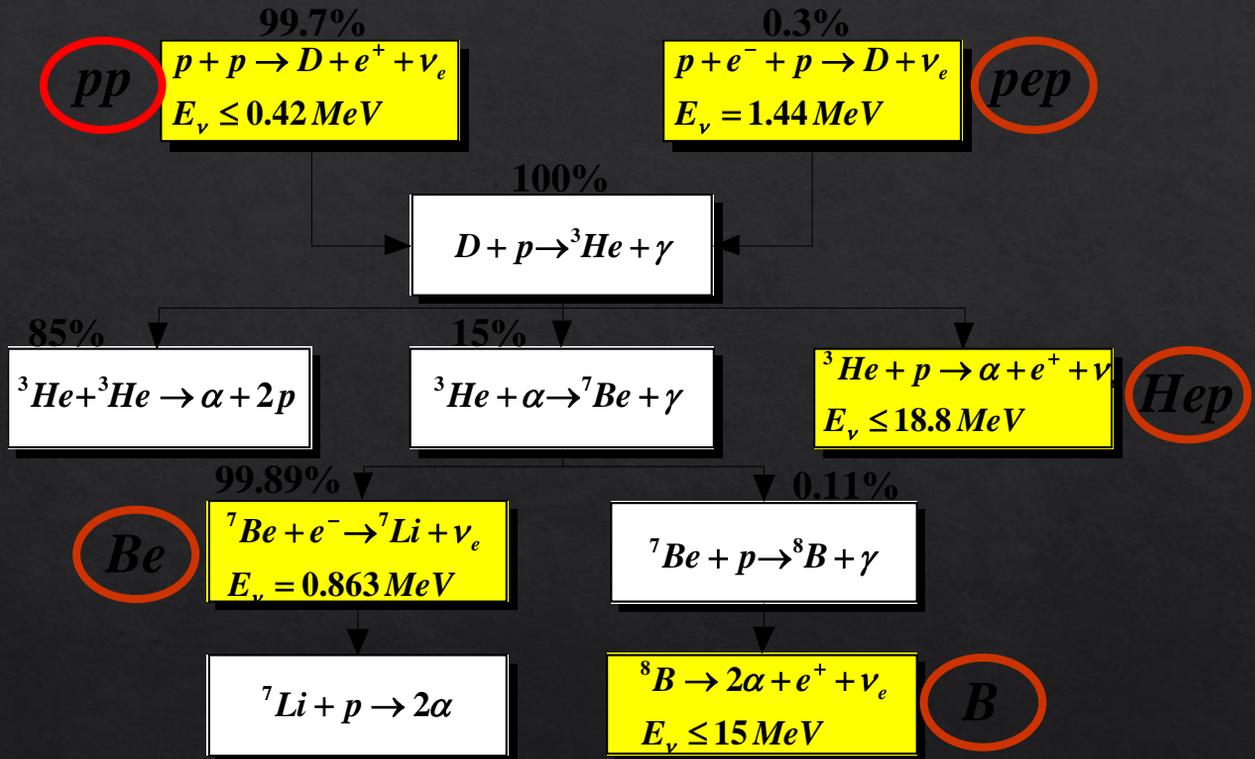
Ci portano immediatamente l'informazione sull'interno del sole

I fotoni (la luce!) vengono prodotti nel nucleo ma per arrivare alla fotosfera ci mettono 10 000 anni!

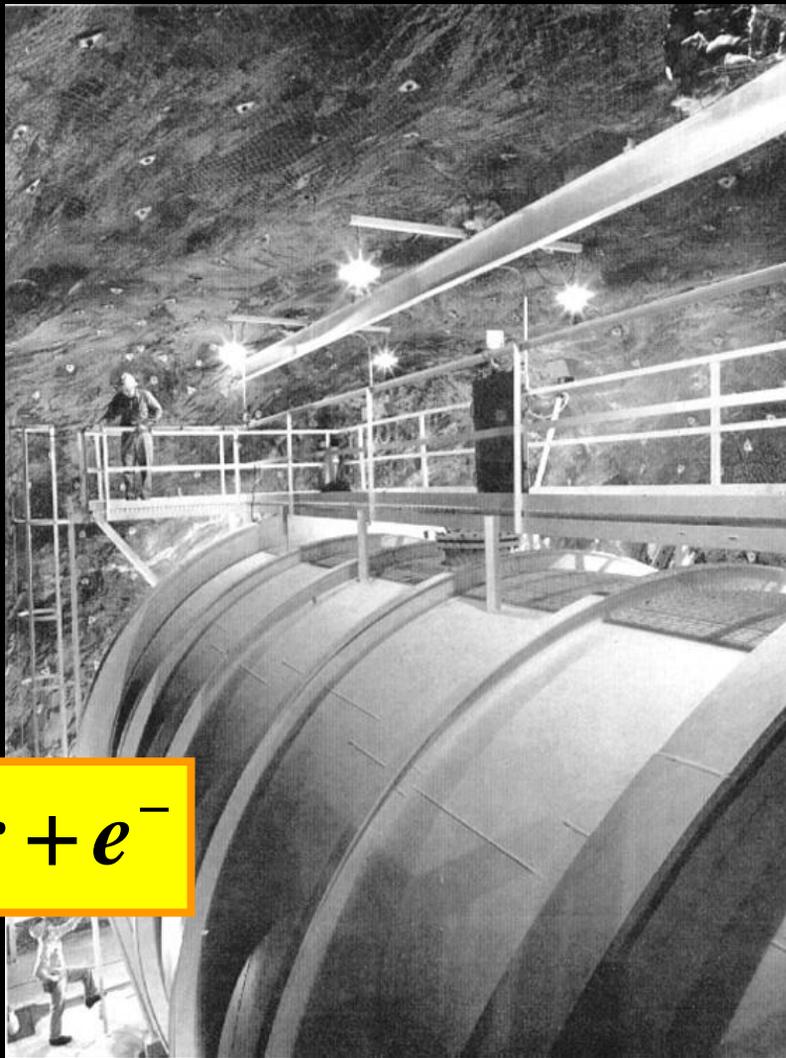
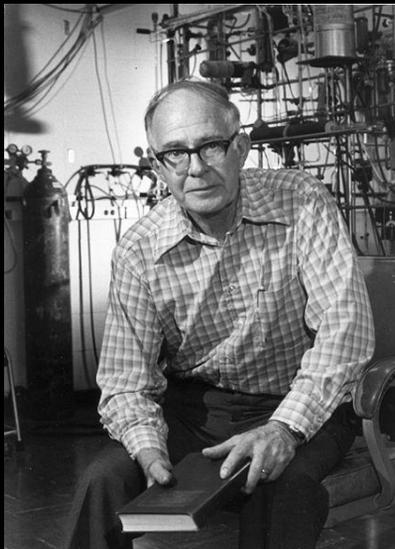


Sono stati continuamente deviati, assorbiti e riemessi dalla materia: le informazioni che trasportano sono SOLO sulla fotosfera (lo strato superficiale)

Il ciclo protone-protone $4p \rightarrow \alpha + 2e^+ + 2\nu_e$ $E=26\text{MeV}$



- La luminosita' del sole e' $L_\odot = 3.92 \cdot 10^{26}$ Watts = $2.4 \cdot 10^{39}$ Mev/sec
- La luminosita' in neutrini e' circa il 2% di quella in fotoni;



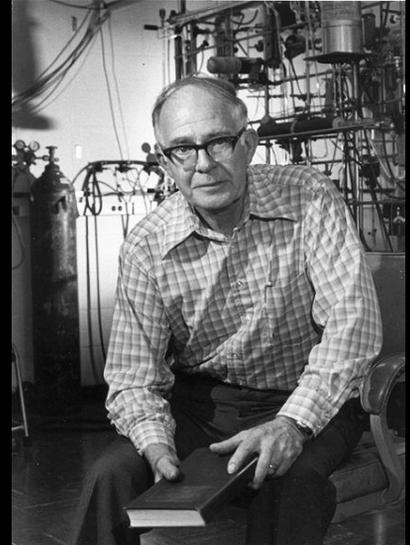
Il decennale problema dei neutrini solari

I protagonisti:



John Bahcall è un importante astrofisico e il maggiore studioso del **modello solare** che rappresenta le reazioni che avvengono nel nucleo del sole. Tale modello quindi prevede il flusso di neutrini.

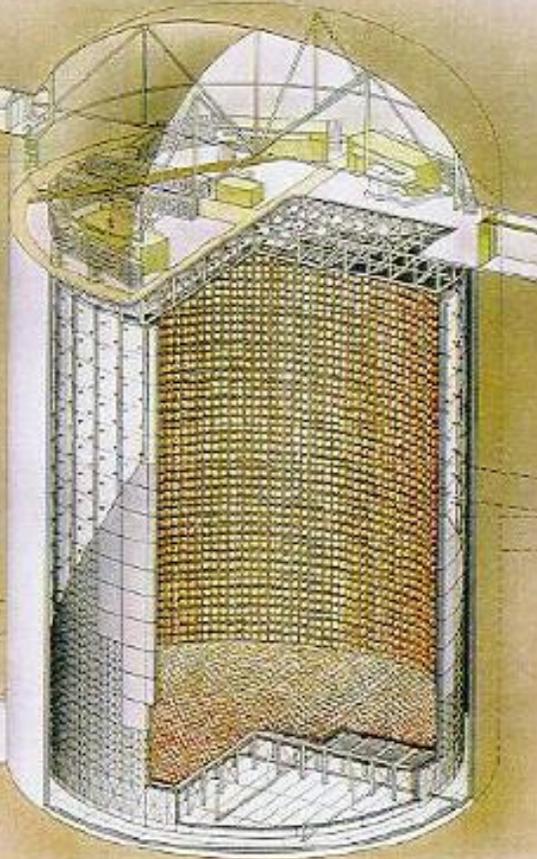
È anche amico di Ray Davis che è il capo dell'esperimento Homestake progettato per misurare (con molta difficoltà) il flusso di neutrini solari

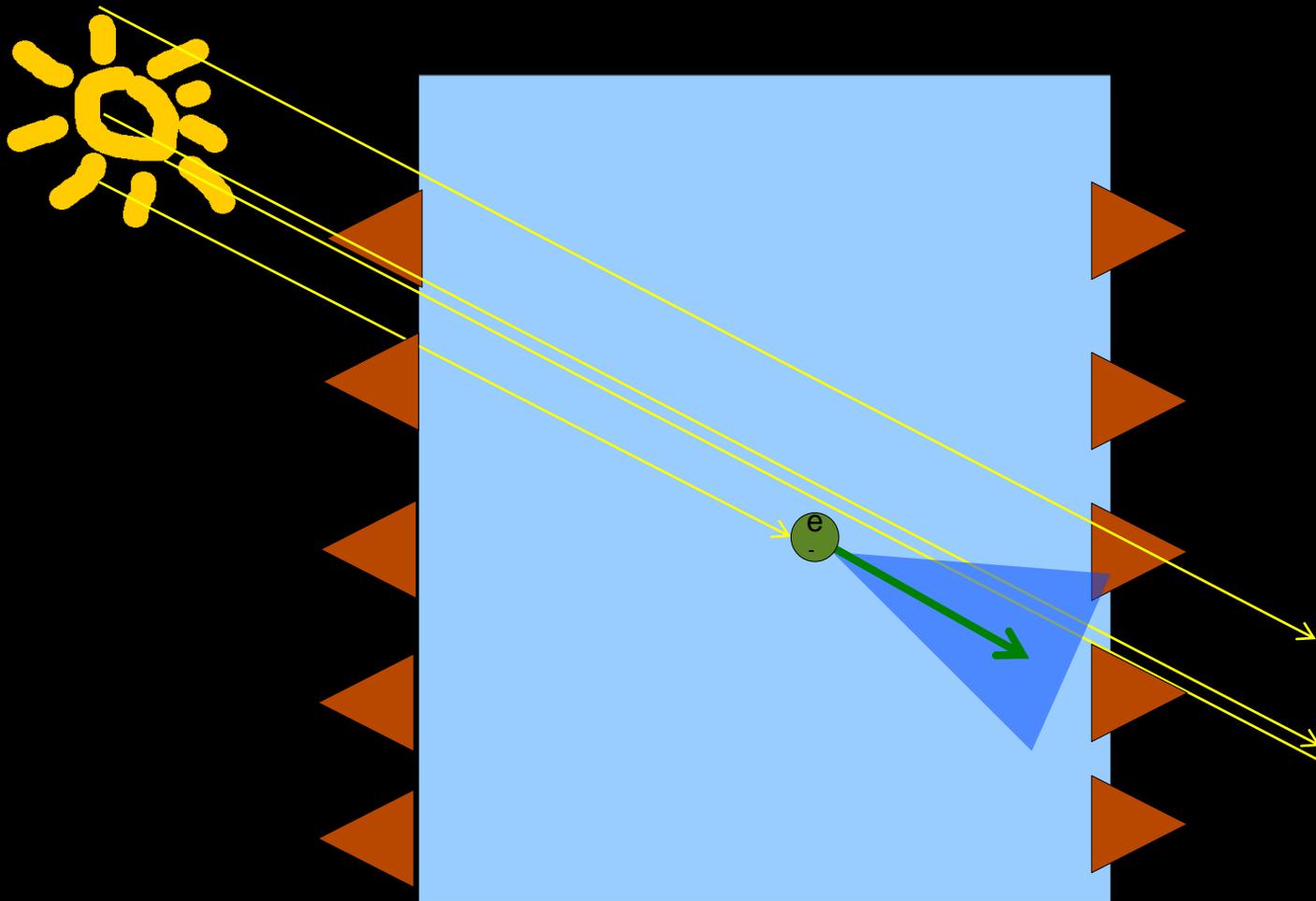


Dopo anni di misure escono i primi risultati di Homestake: osserva circa **UN TERZO**

La domanda sorge spontanea **chi dei due sbaglia?**

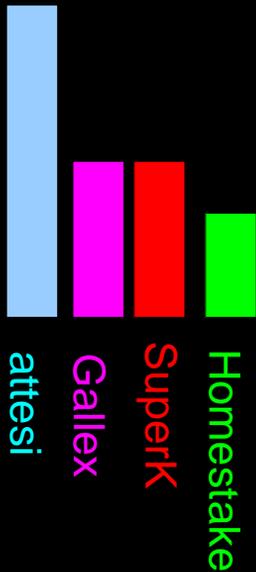
Il decennale problema dei neutrini solari





Il decennale problema dei neutrini solari

Homestake vedeva un terzo dei neutrini solari attesi SuperK e Gallex ne vedono la metà



Non solo gli esperimenti sono in disaccordo con la teoria ma sono in disaccordo tra loro!!!

La soluzione è, ovviamente, lì dove fino d'ora non la si era ancora cercata!

Vi ricordate?: all'inizio avevamo detto che esistono tre tipi di neutrino: neutrino elettronico, neutrino muonico e neutrino tau.

L'esistenza di questi altri neutrini era già nota, ma nessuno se ne era curato perché le reazioni del sole possono produrre SOLO neutrini elettronici

Il decennale problema dei neutrini solari

La soluzione sta proprio qui: **IL NEUTRINO OSCILLA.**



I neutrini prodotti nel sole sono TUTTI **elettronici** e nel viaggiare verso la terra possono “oscillare” e diventare **muonici** o **tau**

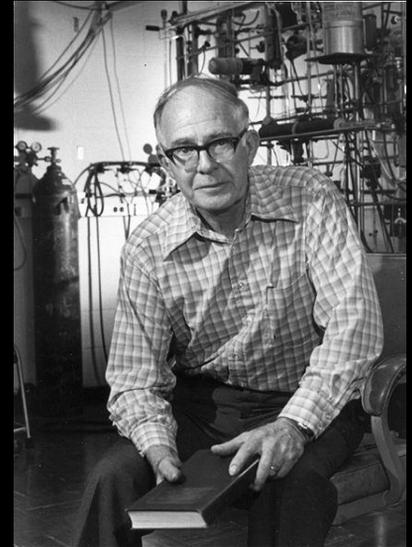
Homestake era progettato per vedere SOLO i neutrini **elettronici** vedeva solo quelli **SuperK** nonostante fossero anche loro progettati per vedere i neutrini elettronici in realtà vedevano, pur con meno efficienza, anche i **muonici** o **tau** quindi osservavano un flusso leggermente superiore

Il decennale problema dei neutrini solari

Quindi chi sbagliava? **NESSUNO!**

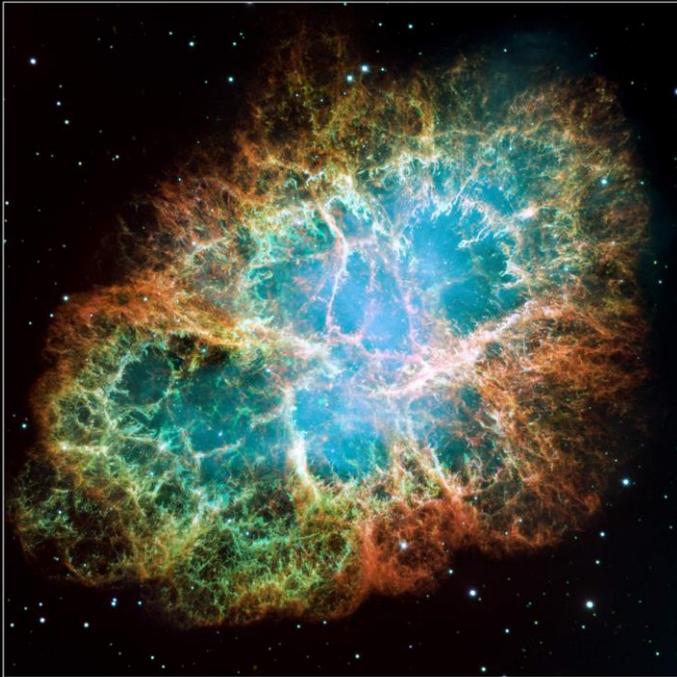


**Masatoshi
Koshiba**



Nobel 2002

I neutrini non arrivano solo dal sole!



Crab Nebula • M1
Hubble Space Telescope • WFPC2

NASA, ESA, and J. Hester (Arizona State University)

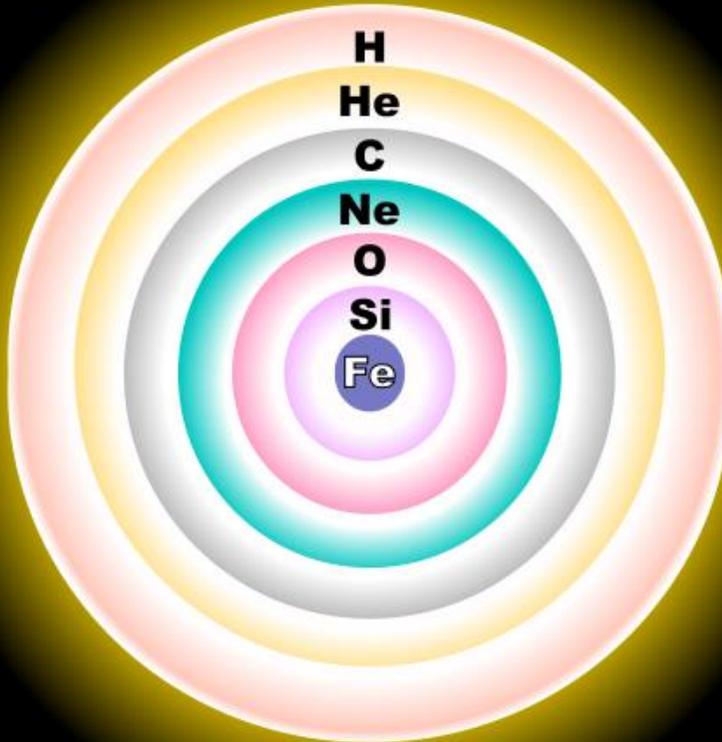
STScI-PRC05-37

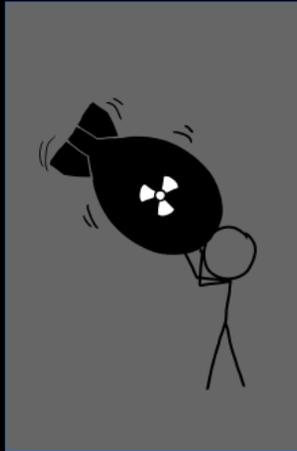
Quando una stella finisce il proprio “carburante”, a seconda della propria massa può esplodere in una supernova. Tali eventi sono i più luminosi dell'universo: una supernova può raggiungere e superare la luminosità di una galassia!

Ma dell'energia liberata nell'esplosione solo lo 0,01% va in **luce**, mentre il 99% va ai **neutrini** emessi (il restante va in energia cinetica del gas espulso dall'esplosione)



I neutrini da Supernova







SN 1987a

Grande nube di magellano

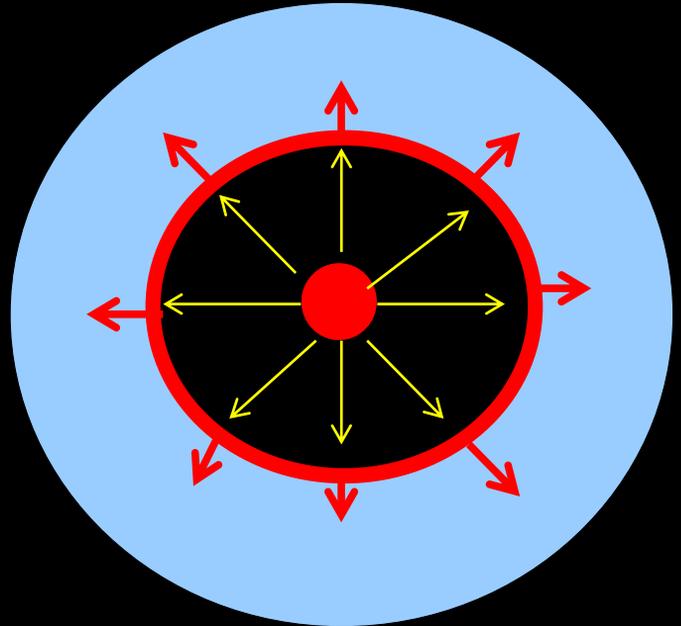




I neutrini ci sono arrivati tra le 2 e 3 ore prima del segnale luminoso. E questo lo sappiamo solo grazie a degli astrofili!

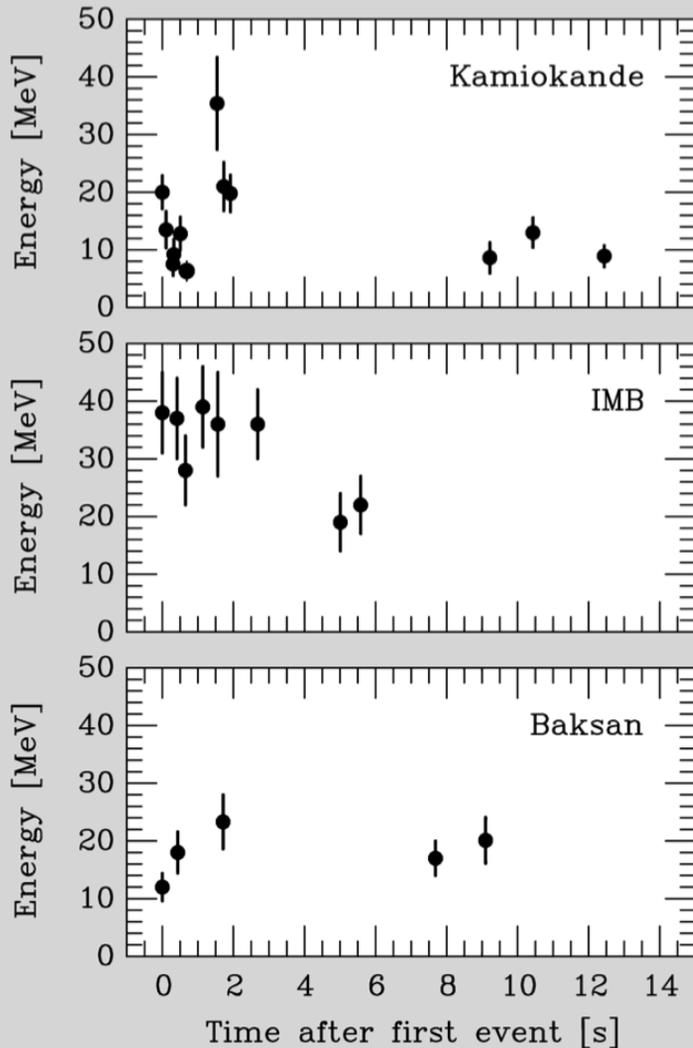
Questo NON vuol dire che i neutrini vadano più veloce della luce. Semplicemente, sono usciti prima dalla Supernova

Il fronte d'onda dell'esplosione (che è quello che poi causa il flash di luce) deve percorrere 100000 km!



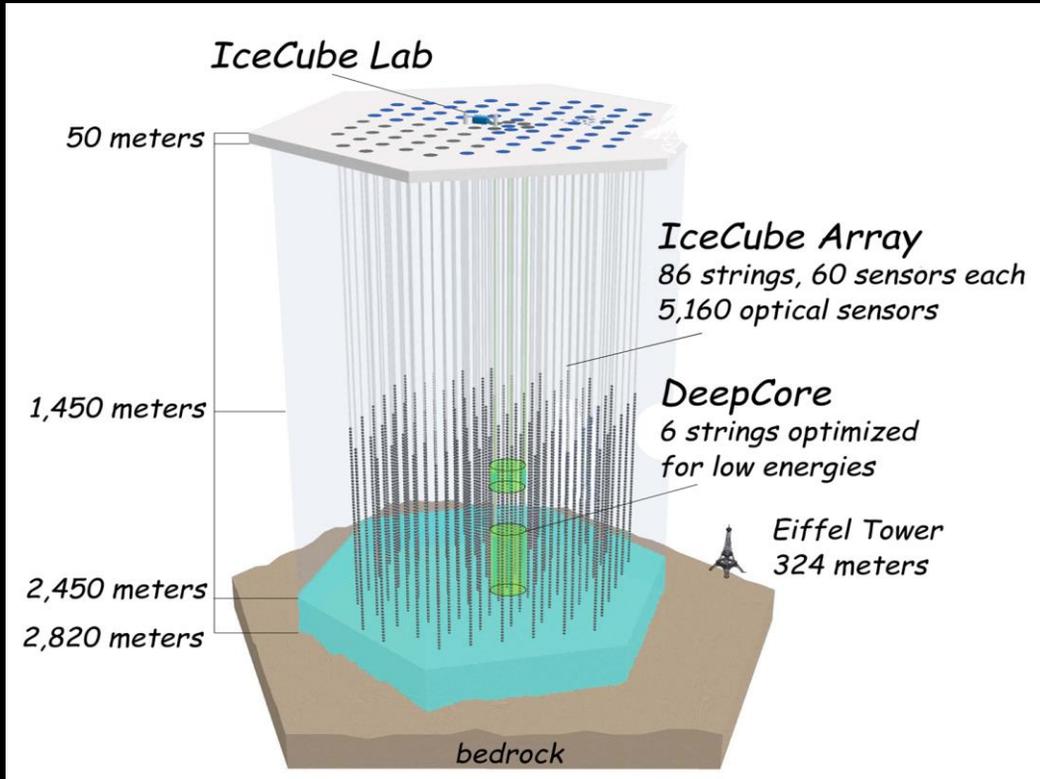
Di tutti i neutrini emessi da SN1987a quanti ne abbiamo visti...?

25!

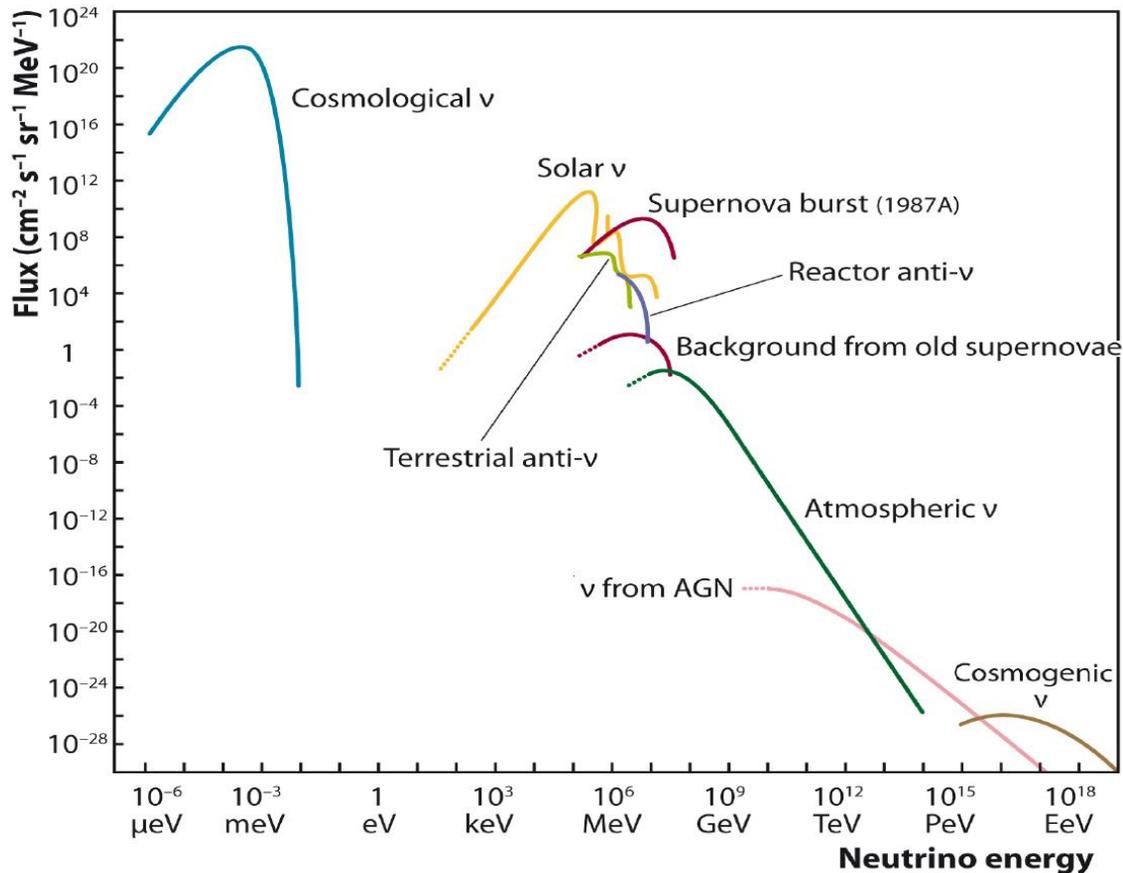


Oggi, se esplodesse una Supernova saremmo più pronti!

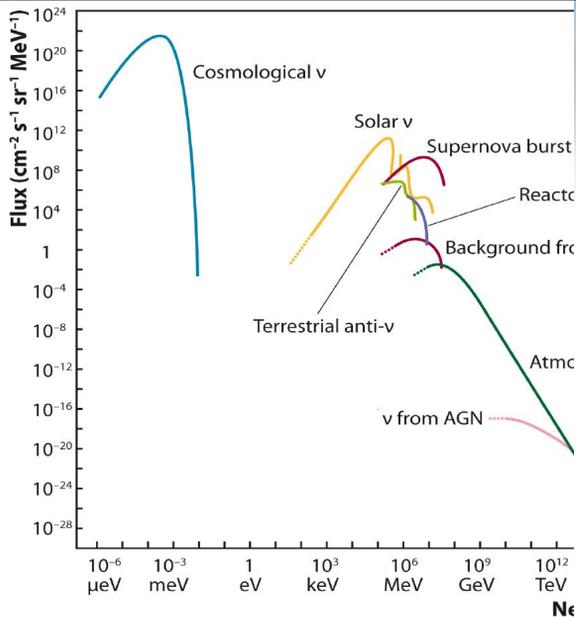
SuperNova Early Warning System (SNEWS). Network di tutti gli esperimenti che possono rivelare neutrini da SN in modo da notificare immediatamente l'arrivo di neutrini da SN



Neutrini di alta energia



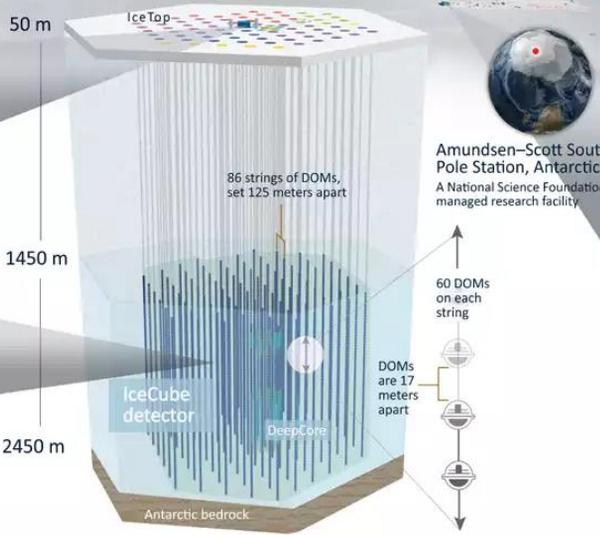
Neutrini di alta energia



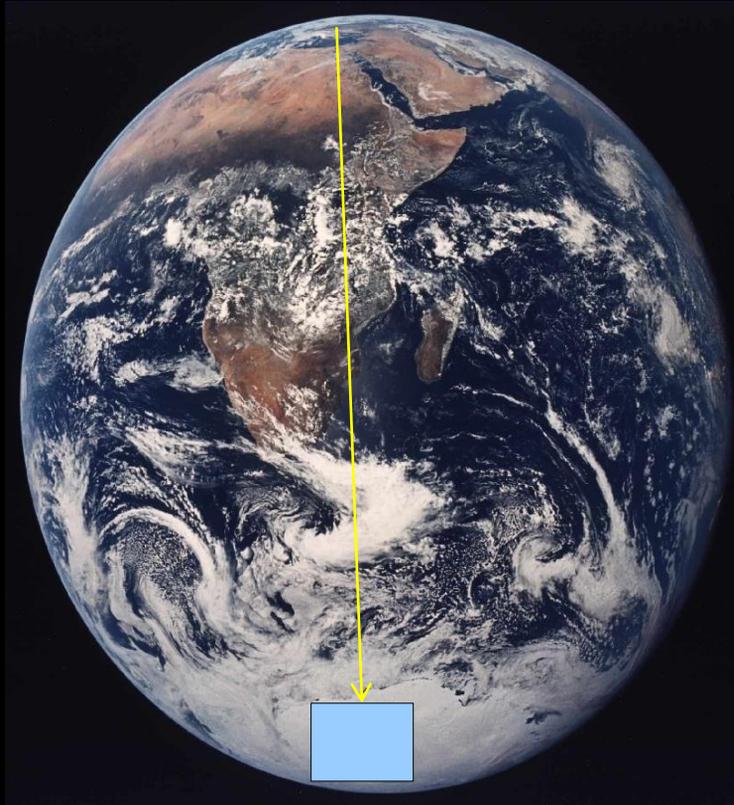
IceCube Laboratory
Data is collected here and sent by satellite to the data warehouse at UW-Madison



Digital Optical Module (DOM)
5,160 DOMs deployed in the ice



● Neutrini

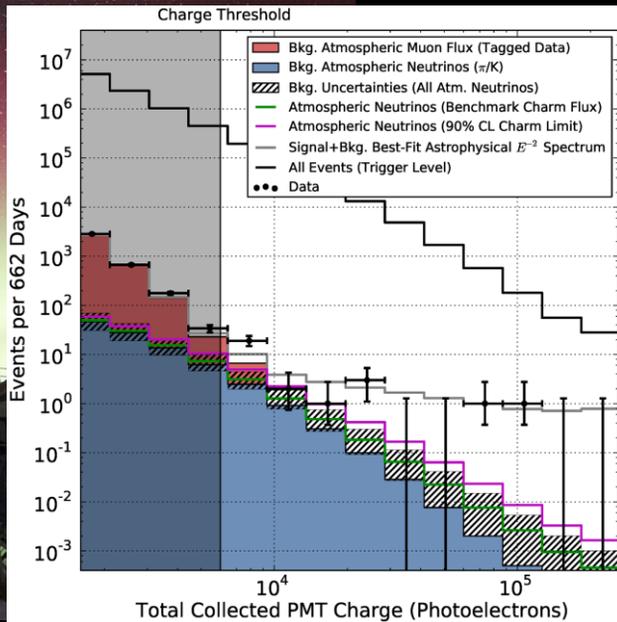


ICE CUBE

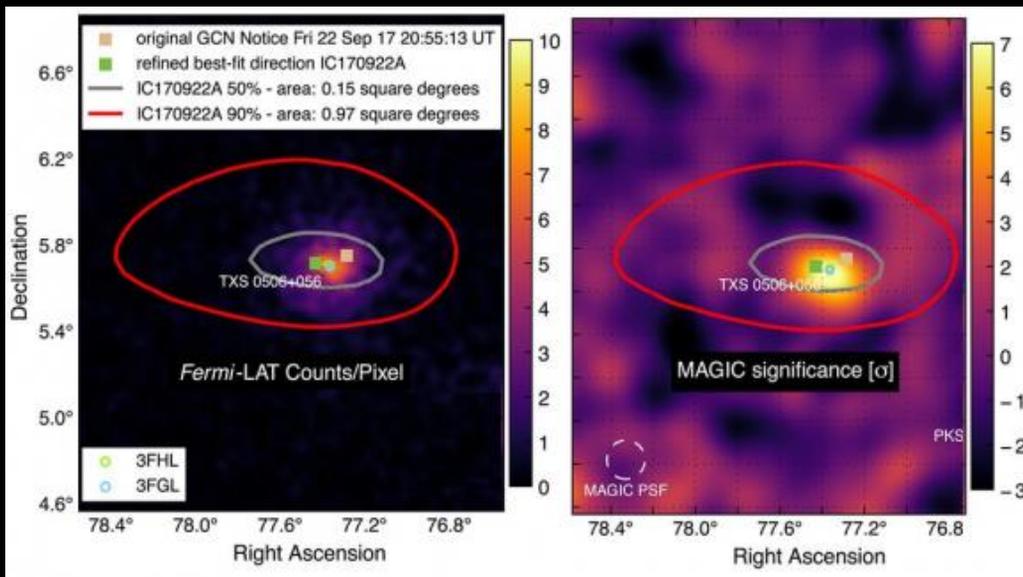
Neutrini di alta energia



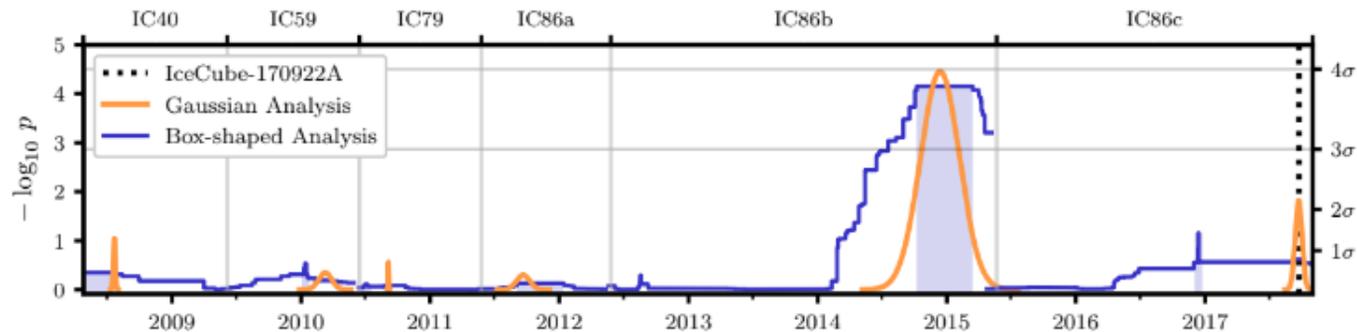
Neutrini di alta energia



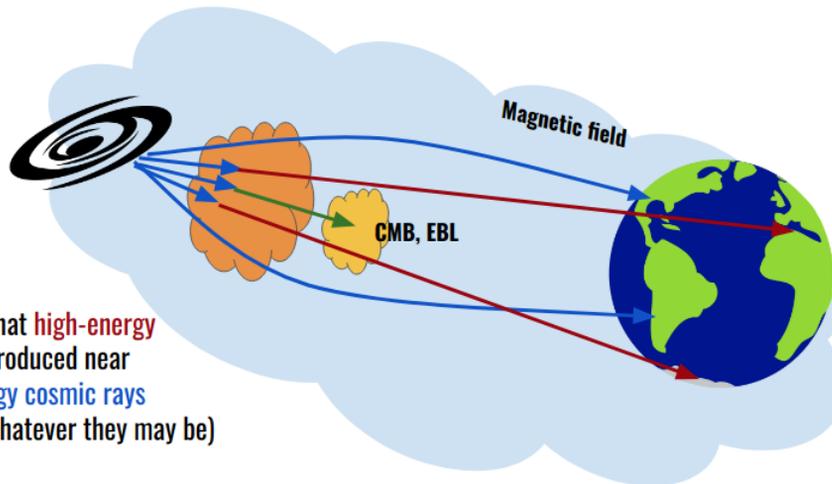
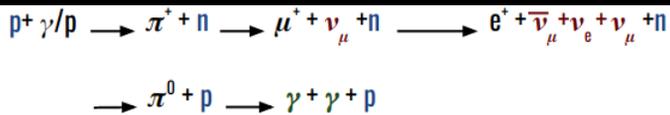
Neutrini di alta energia



Neutrini di alta energia

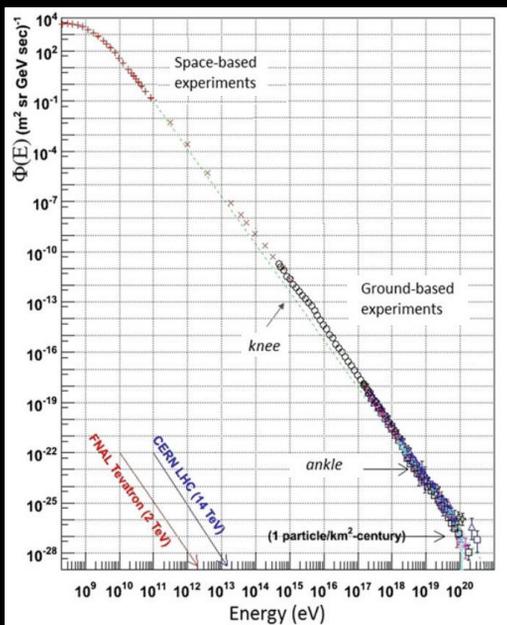


Neutrini di alta energia

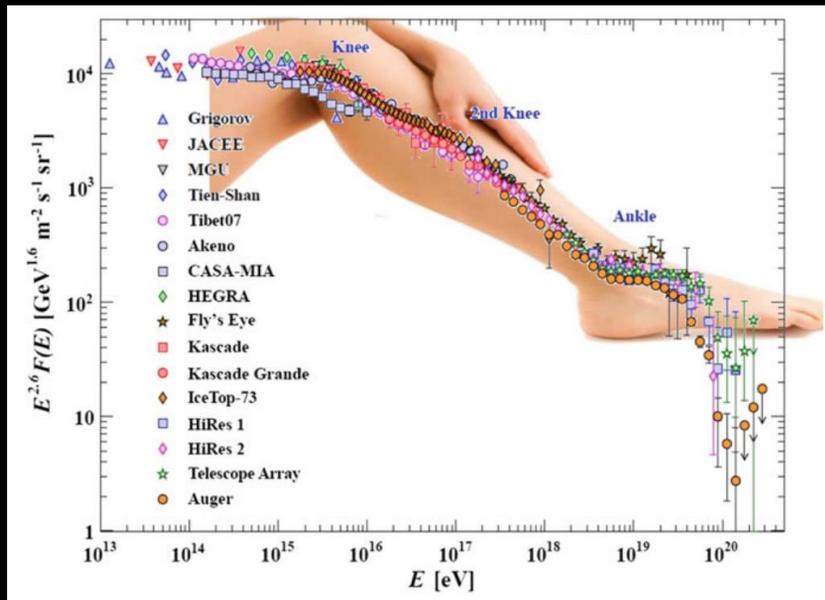
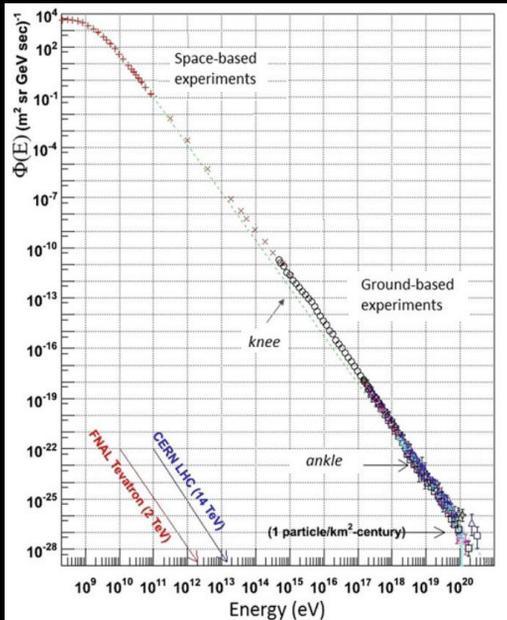


It is expected that **high-energy neutrinos** are produced near **ultra-high energy cosmic rays accelerators** (whatever they may be)

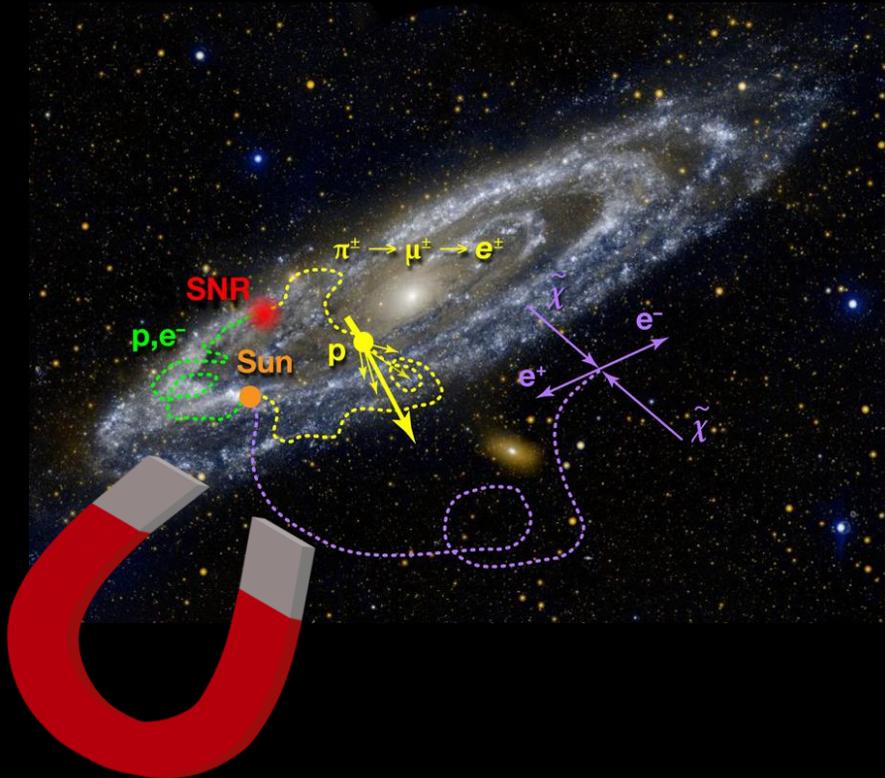
Raggi cosmici

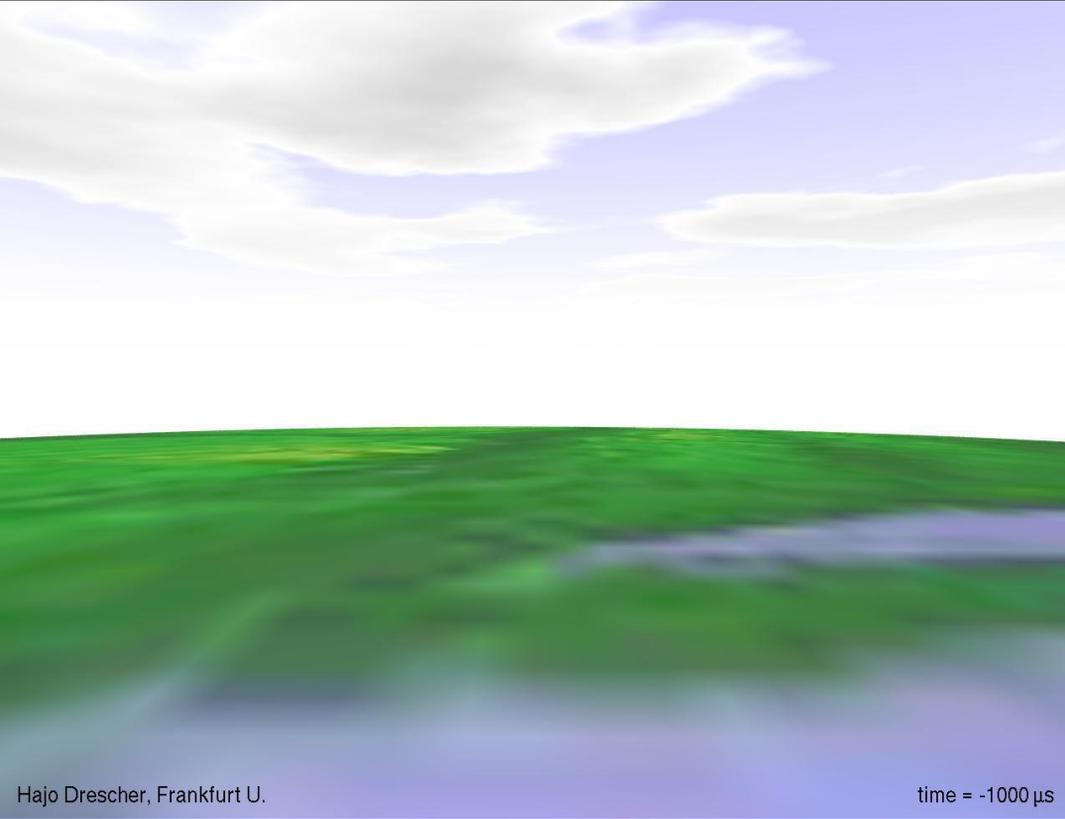


Raggi cosmici



Raggi cosmici: particelle cariche!





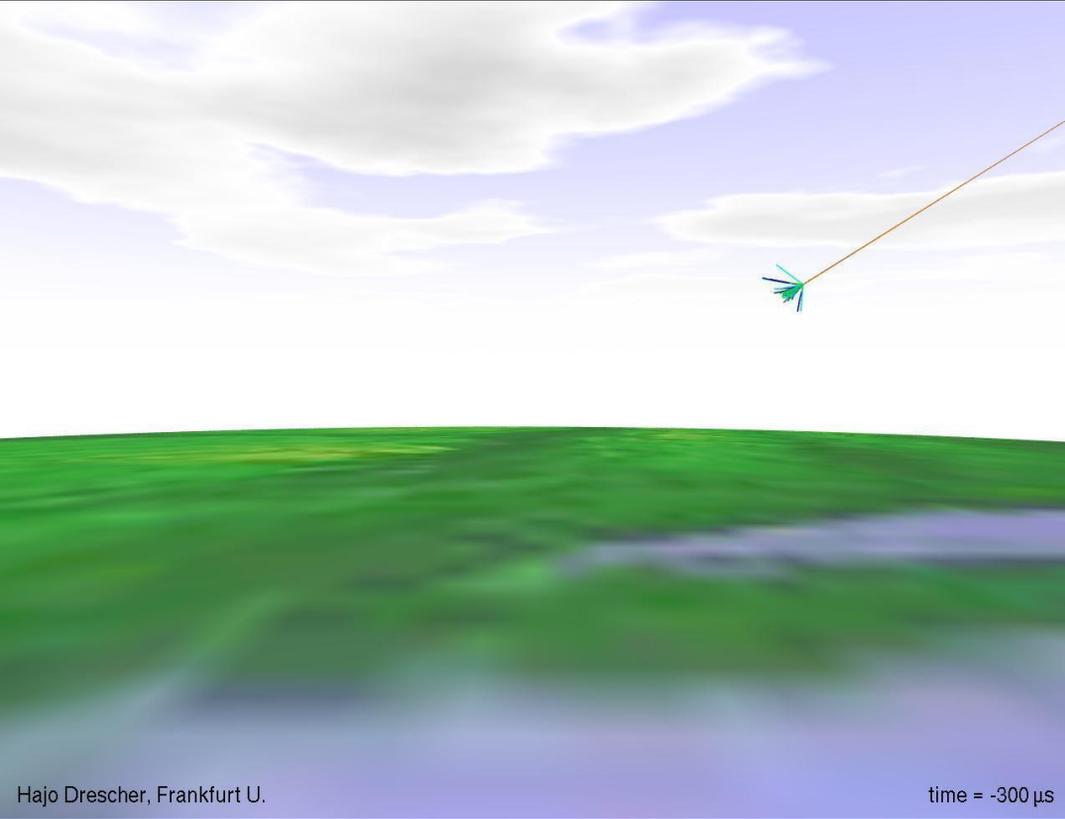
Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = -1000 μ s



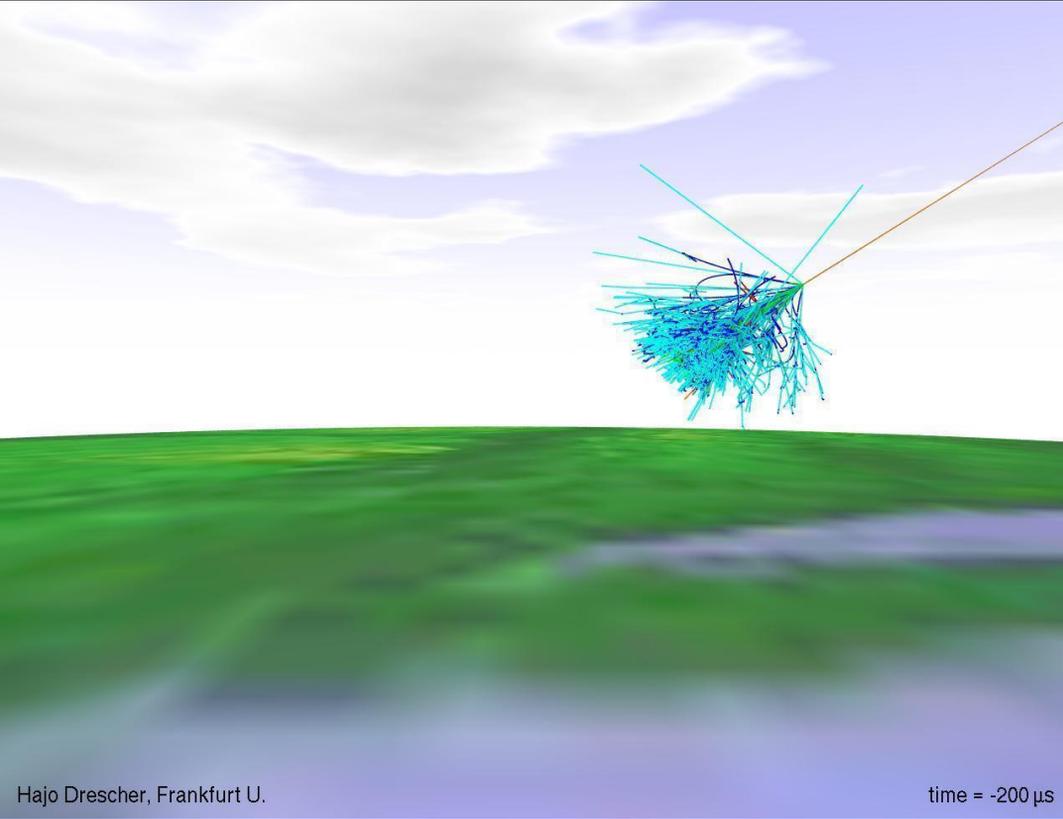
Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = -400 μ s



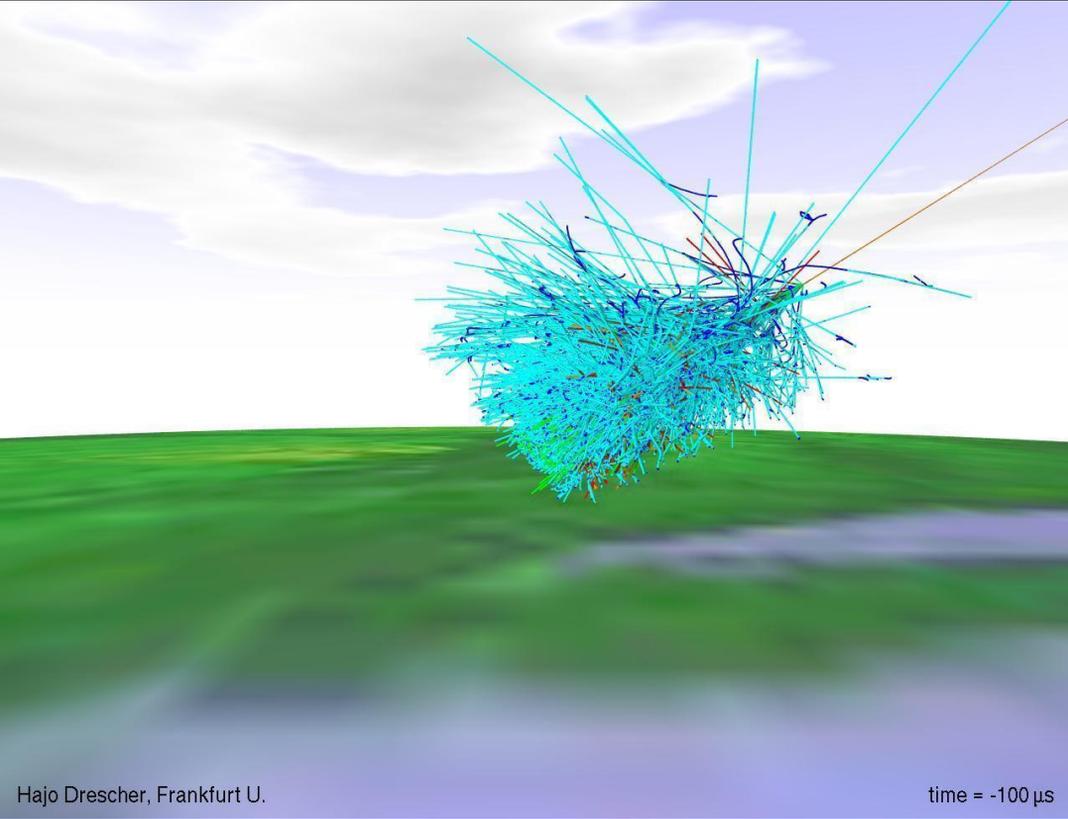
Hajo Drescher, Frankfurt U.

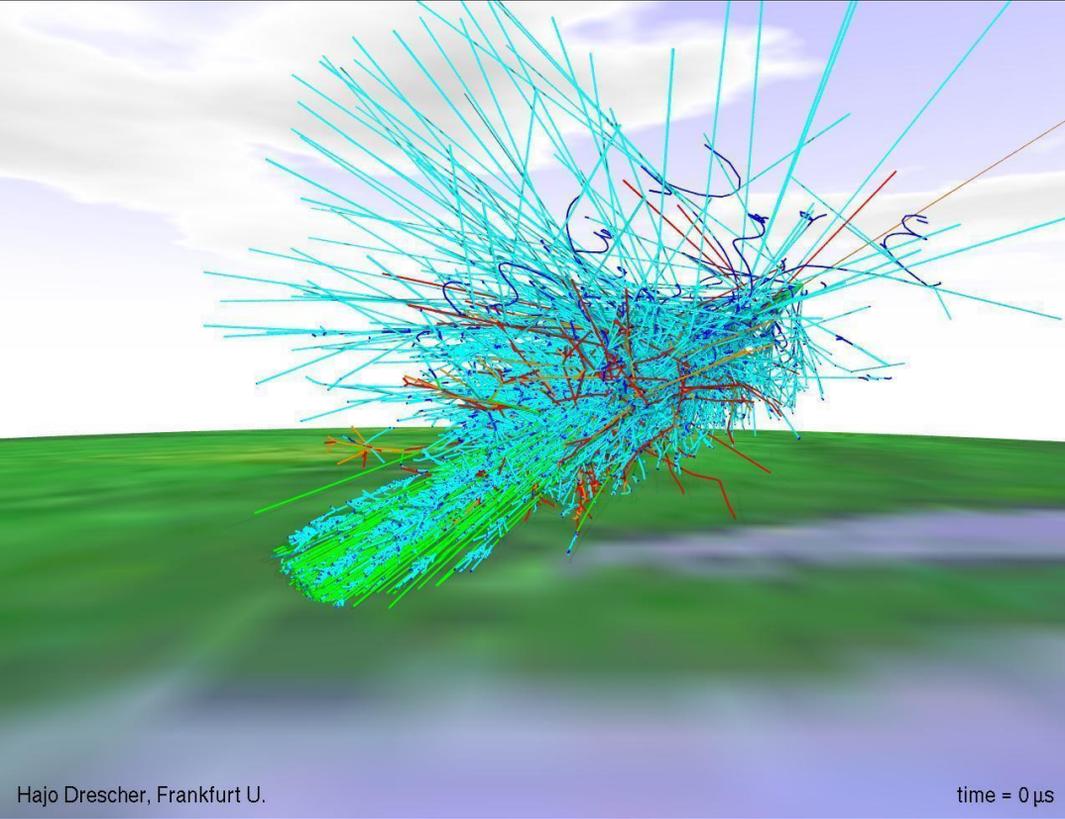
time = -300 μ s

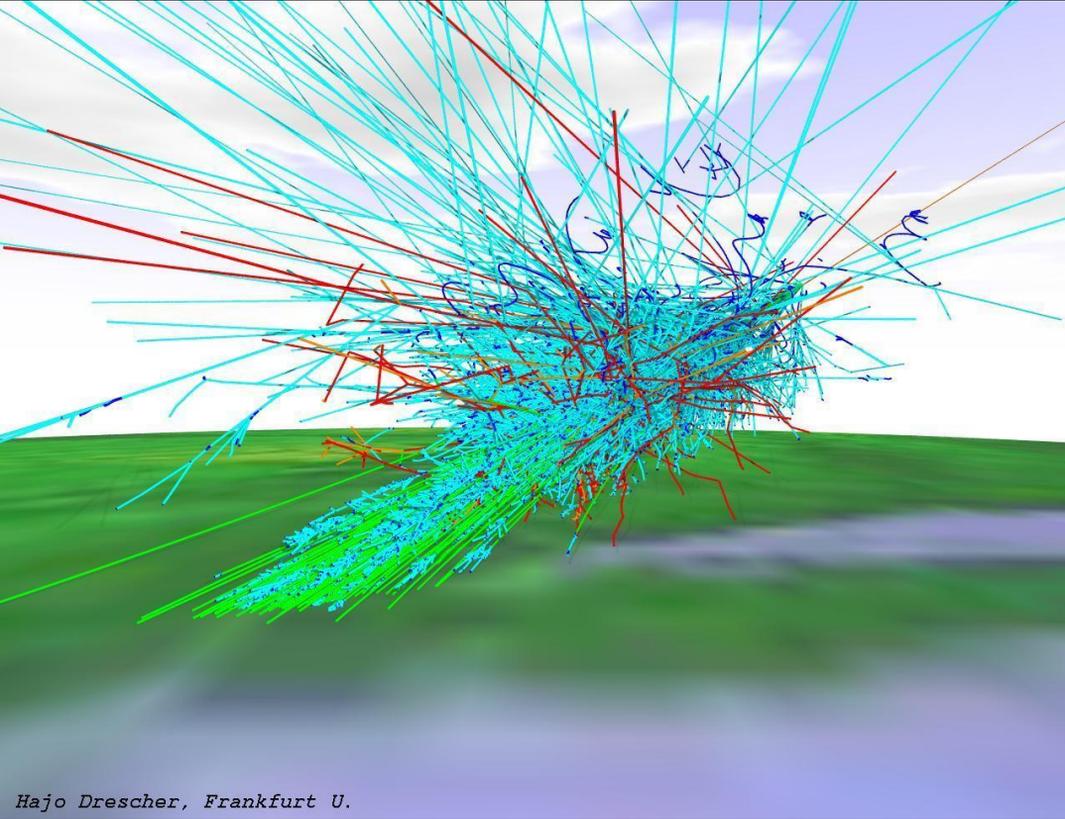


Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = -200 μ s

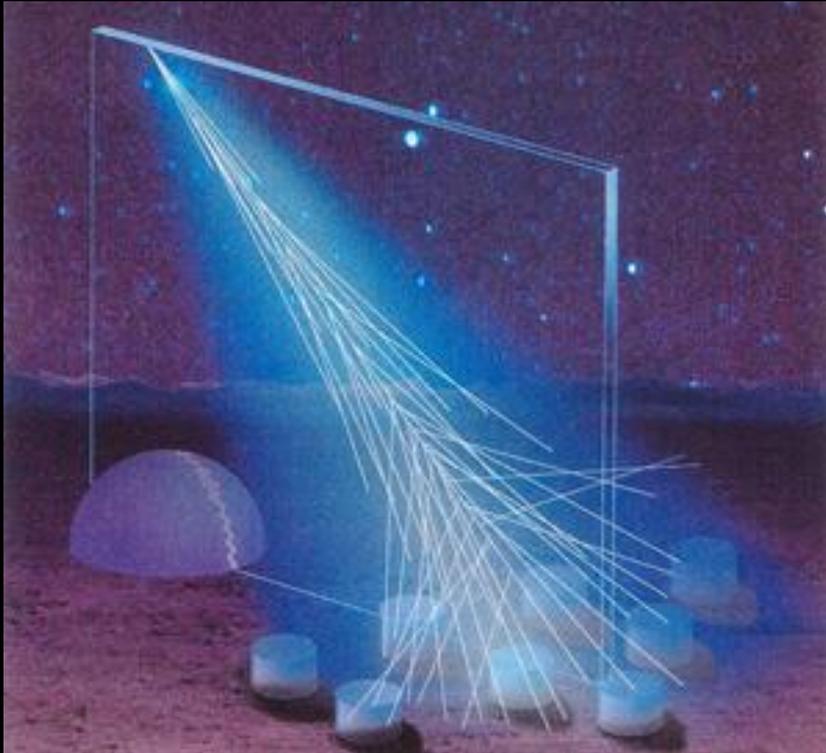






Hajo Drescher, Frankfurt U.

Come vederle?



2 modi di rivelare lo sciame di particelle secondarie:

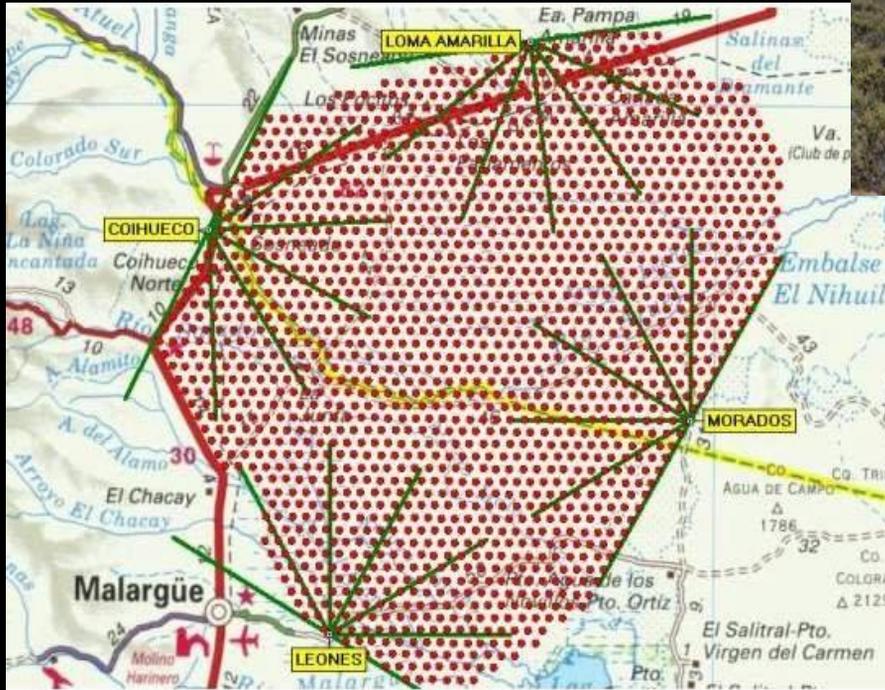
1) schiera di rivelatori a terra per intercettarlo quando arriva al suolo

2) telescopi UV per osservare la (debolissima!) luce che producono eccitando le molecole dell'aria: come in una lampada al Neon

3) (in fase di studio) rivelare l'emissione radio/microonde

L'Osservatorio Pierre Auger

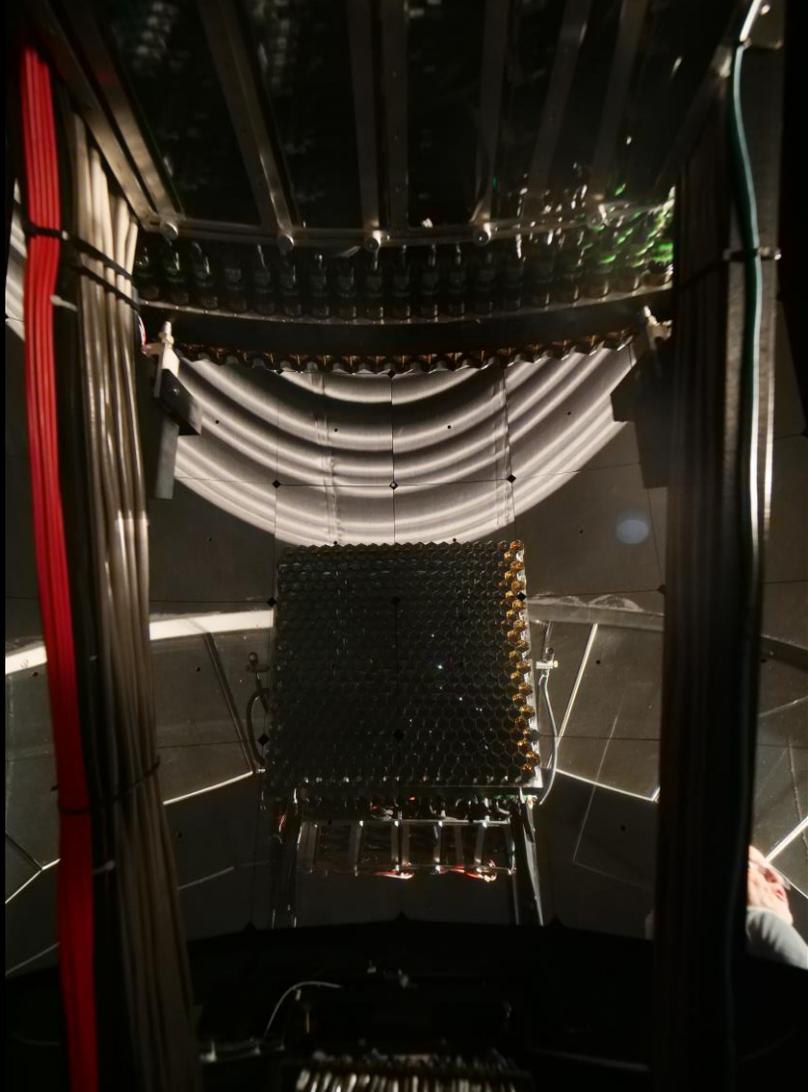
1600 taniche di acqua ultrapura disposte ad 1,5km l'una dall'altra su 3000 km² (la dimensione della provincia di Milano)

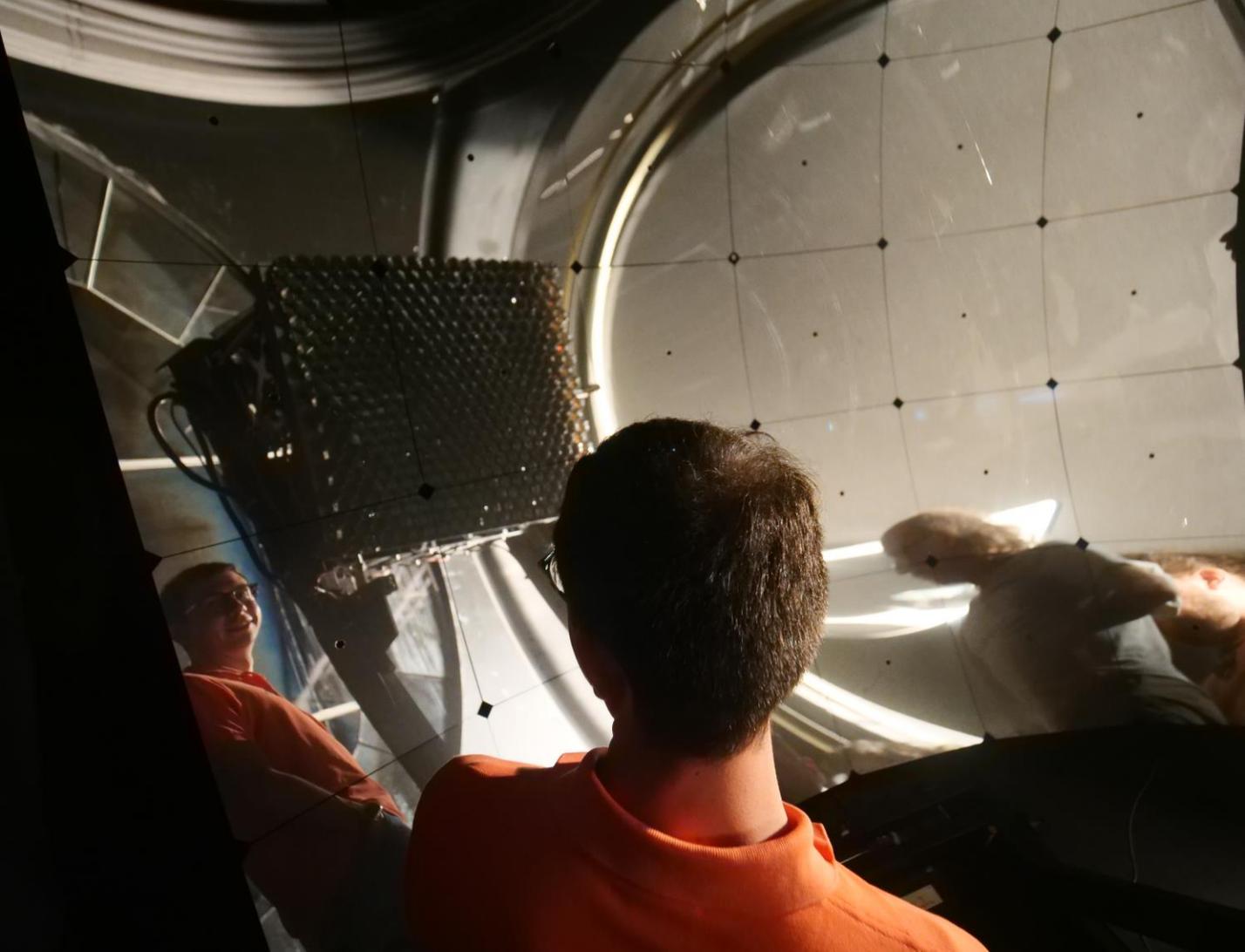


E' inoltre utile che il tutto sia situato in altitudine, ma tutti i rivelatori devono essere alla stessa altezza.

La pampa argentina è perfetta perché è un grande altopiano ai piedi delle Ande









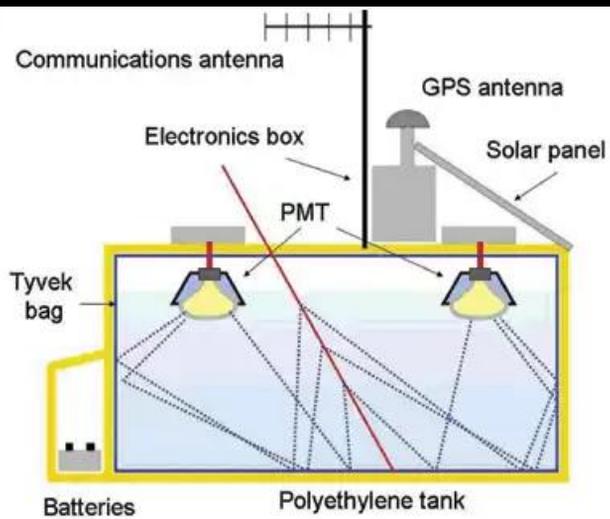
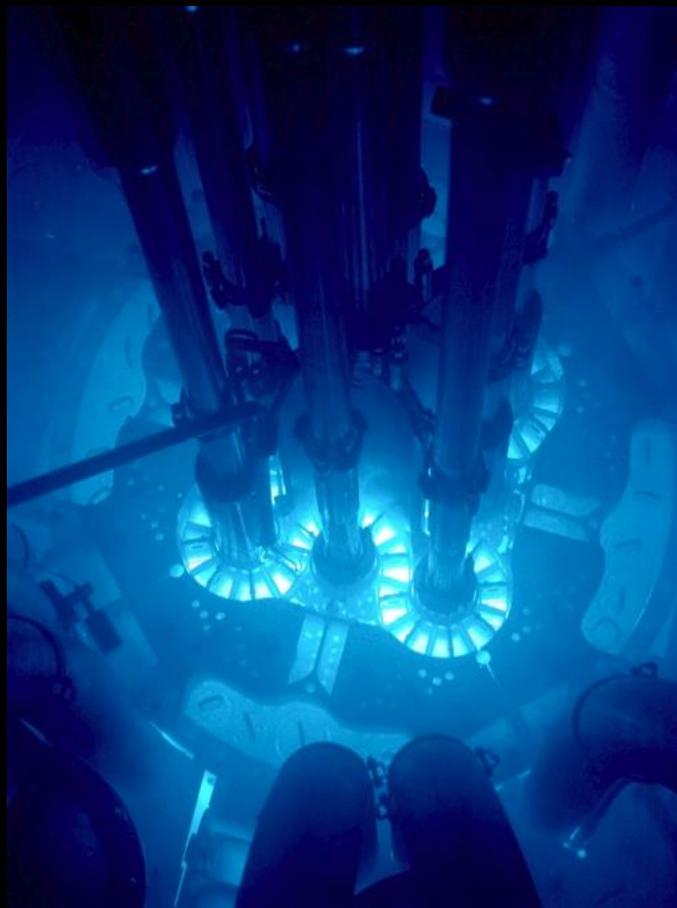


FIG. 2: A schematic view of the Cherenkov water tanks, with the components indicated in the figure.














```
Integral of each map 722892
reading file ./IC/casc_maps_converted_to_eq.pickleout8.txt
Integral of each map 638643
reading file ./IC/casc_maps_converted_to_eq.pickleout9.txt
Integral of each map 894478
Integral 2.21263e+7
Returning

-----+
| udgrade_cxx |
|-----+

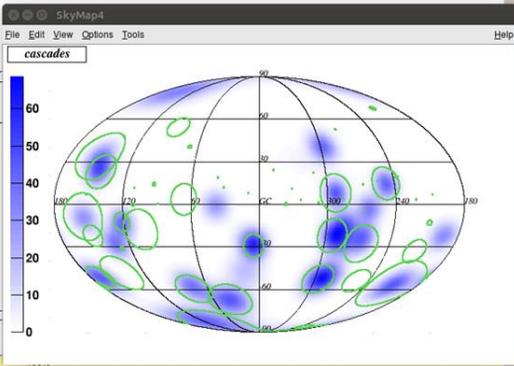
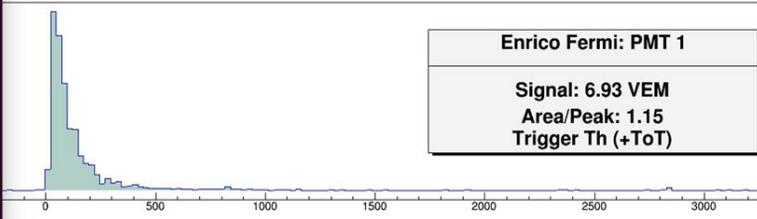
Application was compiled without OpenMP support;
running in scalar mode.

Parser: double_precision = F <default>
Parser: infile = /tmp/tnpmap_in419747470.fits
Parser: outfile = /tmp/tnpmap_out419747470.fits
Parser: nside = 128
Parser: polarisation = F <default>
Parser: pessimistic = F <default>
WARNING: Could not find COORDSYS keyword in file /tmp/tnpmap_out419747470.fits
Returning
```

```
testimportICMaps.cxx (~/toolkitNew/Toolkit-v3.0) - gedit

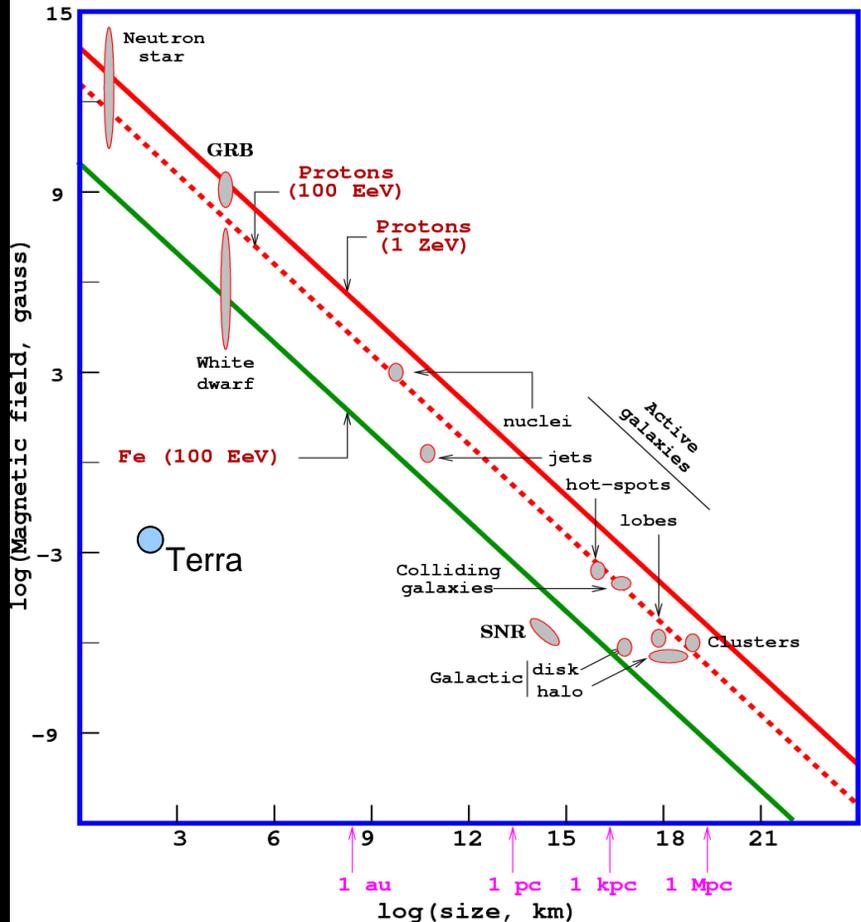
Open | Save

151 char ftsmapc = ftsmap0;
152 //map.WriteFits(ftsmapc);
153 TProjMap MapProj(map, sizeX, sizeY, declimit);
154
155 //TApplication* app = new TApplication("App", &argc, argv);
156
157 MapProj.SkyMap(tipo);
158 MapProj.ShowGrid(60.,30.);
159 //app->Run();
160
161 THealpixMap map2=map.Map2Map(128);
162 //CHANGE OF COORDINATES
163 for(unsigned int j=0;j<map.size();j++){
164     double l_tmp(0.), b_tmp(0.);
165     map.GetVec(j, l_tmp, b_tmp);
166     //cout << "l " << l_tmp << " b " << b_tmp << endl;
167     long ipix = map2.Ip(l_tmp, -b_tmp);
168     map2[ipix]=map[j];
169 }
170
171 map2.WriteFits(ftsmapc);
172 TProjMap MapProj2(map2, sizeX, sizeY, declimit);
173 MapProj2.SkyMap(tipo);
174 MapProj2.ShowGrid(60.,30.);
175
176 char eventFileNu[256]="./Events/
IceCube_deg_all_E_gt_60_TeV_real_and_tracks_err_lt_20.dat";
177 vector <neutrino> NUs;
178 int nNu, nCasc=1;
179 cout << "Reading neutrino events file " << eventFileNu << endl;
180 ifstream letturNUL;
```



Hillas-plot

(candidate sites for $E=100$ EeV and $E=1$ ZeV)



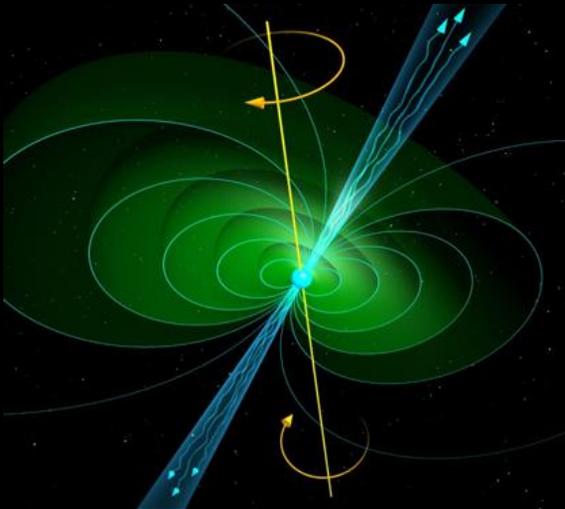
$$E_{\text{max}} \sim ZBL \quad (\text{Fermi})$$

$$E_{\text{max}} \sim ZBL\Gamma \quad (\text{Ultra-relativistic shocks-GRB})$$

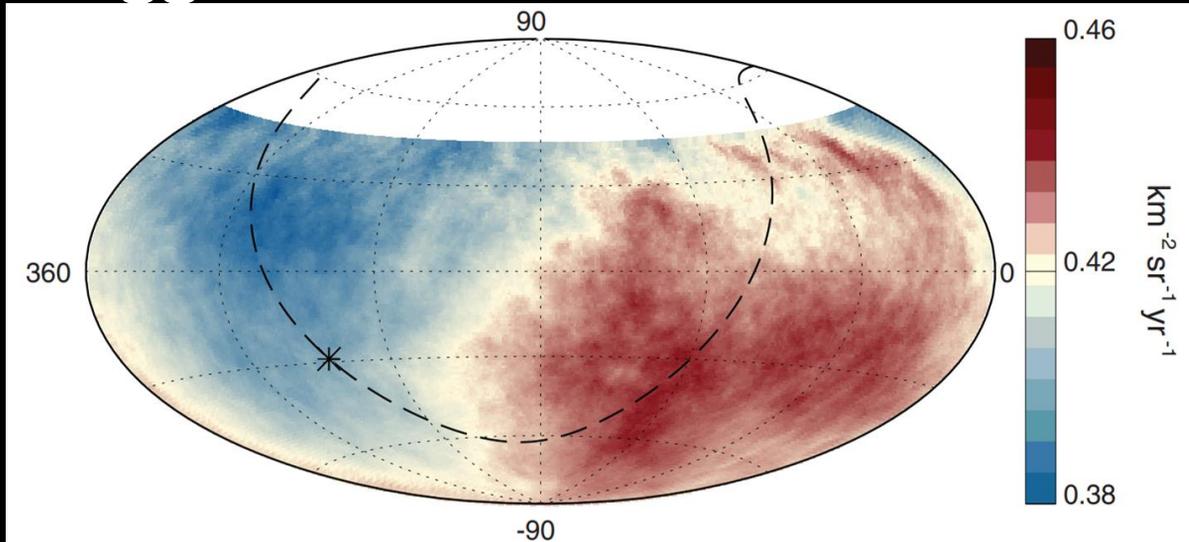
Per accelerare una particella ad energie altissime devo avere:

Campi magnetici fortissimi anche su
“piccola” scala:

Campi magnetici deboli ma su
larghissima scala



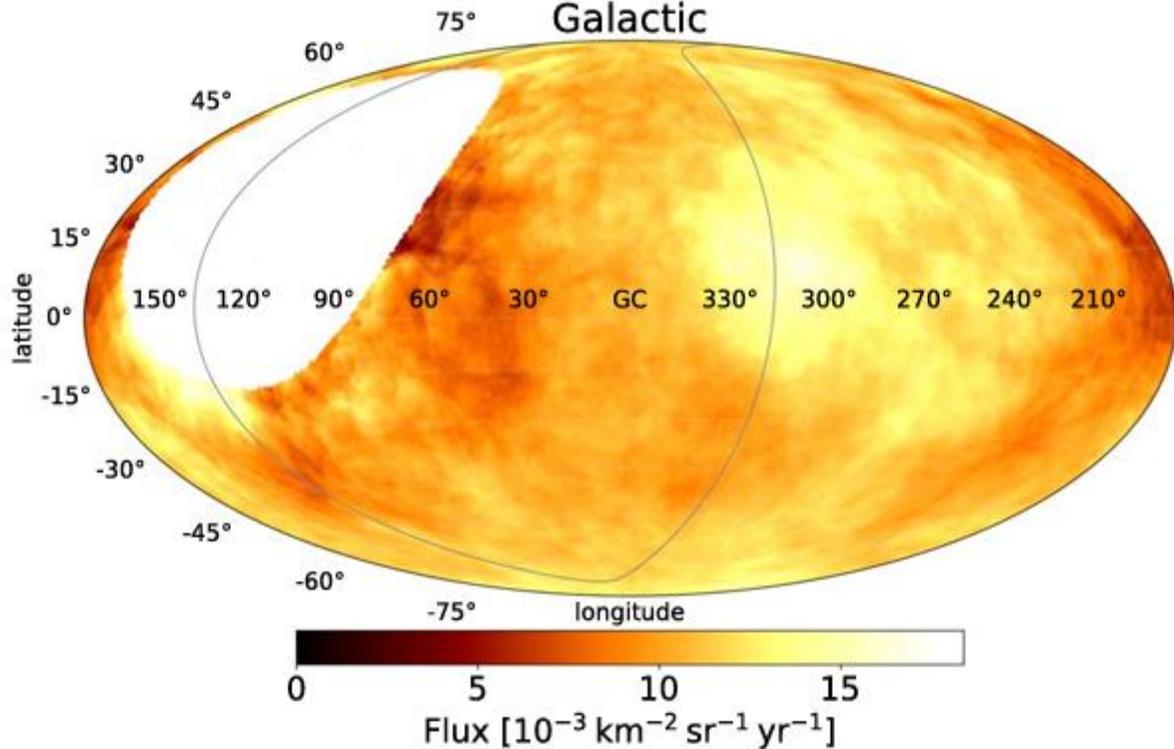
Raggi cosmici: cosa ci dicono?



Anisotropia sopra 8 EeV -> sorgenti extra-galattiche

$\Phi(E_{\text{Auger}} \geq 40 \text{ EeV}) - \Psi = 25^\circ$

Galactic



Conclusioni

Per ora viste correlazioni luce+1 messenger
manca ancora un evento “bino” (o “trino”)

network per multi-messenger “prompt”



analisi dati per multi-messenger “ex post”

Lorenzo.caccianiga@mi.infn.it

@lorenzocaccianiga



I tre messaggeri
Uno per tutti, tutti per uno