

CENTO ANNI DI RAGGI COSMICI

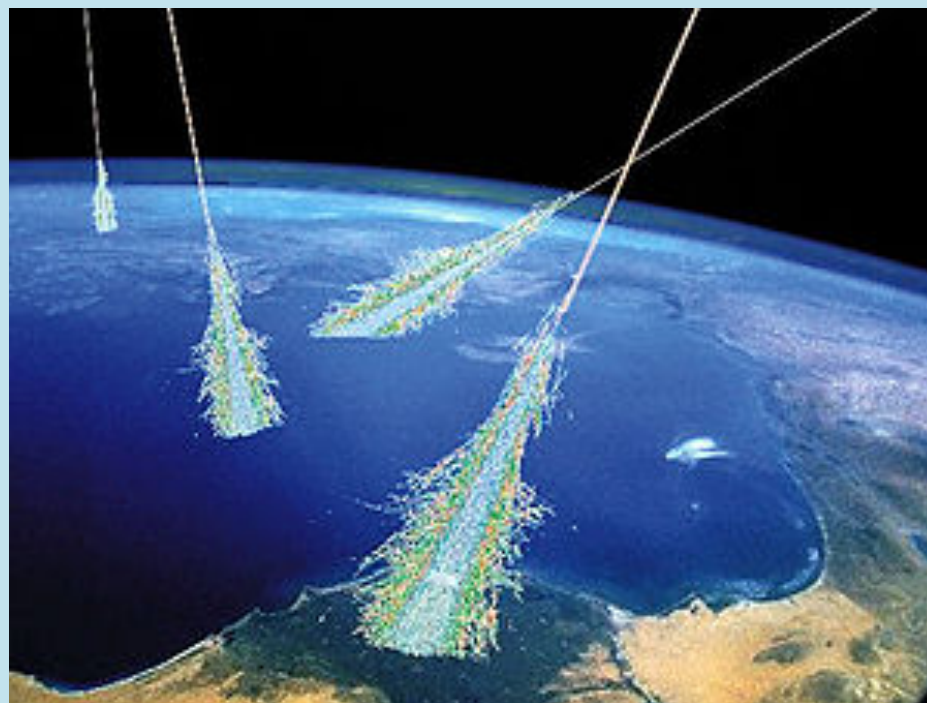
I SECONDI CINQUANTA

a cura di

Fabrizio Boffelli

Dipartimento di Fisica
Università degli Studi di Pavia
&

I.N.F.N. (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare)
Sezione di Pavia



RAGGI COSMICI

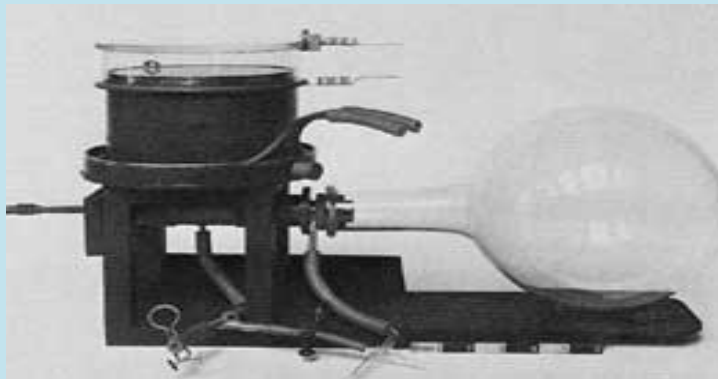
FISICA DELLE PARTICELLE

- Sviluppo della fisica dei raggi cosmici: le sorgenti astrofisiche forniscono “proiettili” ad altissima energia.
- Indagine sulla natura dei proiettili.
- I RC sono impiegati come strumento per studiare le particelle e le loro interazioni con la materia.

RAGGI COSMICI: INIZIO FISICA DELLE PARTICELLE

CON I RAGGI COSMICI

- Fatte molte scoperte, le più importanti nella storia della fisica delle particelle.
- **SCOPERTA DELL'ANTIMATERIA:** equazione di Dirac (1902-1984) prediceva l'esistenza di anti-particelle per tutte le particelle di materia esistenti.
- Nel frattempo prendeva piede un nuovo strumento per lo studio dei RC: *la camera a nebbia* (CN).



FISICA DELLE PARTICELLE “moderna”

- La scoperta dei mesoni si può considerare come l'origine della “moderna” fisica delle particelle elementari.
- Rapido sviluppo dei gruppi di ricerca che si occupavano di RC.
- Progresso delle tecniche sperimentali di rivelazione (si sfrutta la complementarità tra CN ed emulsioni nucleari, poco costose).
- Era opportuno attrezzare laboratori sulle montagne; in Europa: Italia, Francia e Unione Sovietica.
- Laboratorio della Testa Grigia di Cervinia (nel posto più in alto d'Italia raggiungibile tutto l'anno: 3505 m). In alluminio e legno per la massima penetrazione dei RC, inaugurato nel 1948; formò la scuola di Torino.

ACCELERATORI DI PARTICELLE

- Tuttavia, la tecnologia degli acceleratori di particelle cominciava ad affermarsi: si avevano misure in condizioni controllate. Nonostante i grandi progressi, le più alte energie saranno comunque sempre raggiunte dai RC.
- ✓ Acceleratori di particelle....natural.

Table 1. Discovery of elementary particles

Particle	Year	Discoverer (Nobel Prize)	Method
→ e^-	1897	Thomson (1906)	Discharges in gases
→ p	1919	Rutherford	Natural radioactivity
→ n	1932	Chadwik (1935)	Natural radioactivity
→ e^+	1933	Anderson (1936)	Cosmic Rays
μ^\pm	1937	Neddermeyer, Anderson	Cosmic Rays
π^\pm	1947	Powell (1950) , Occhialini	Cosmic Rays
K^\pm	1949	Powell (1950)	Cosmic Rays
π^0	1949	Bjorklund	Accelerator
K^0	1951	Armenteros	Cosmic Rays
Λ^0	1951	Armenteros	Cosmic Rays
Δ	1932	Anderson	Cosmic Rays
Ξ^-	1932	Armenteros	Cosmic Rays
Σ^\pm	1953	Bonetti	Cosmic Rays
p^-	1955	Chamberlain, Segre' (1959)	Accelerators
anything else	1955 \implies today	various groups	Accelerators
$m_\nu \neq 0$	2000	KAMIOKANDE	Cosmic rays

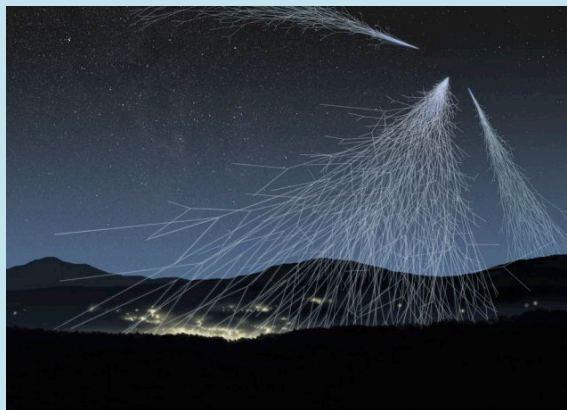
FISICA ASTROPARTICELLARE

- I RC sono oggi in primo piano nella ricerca, grazie al nuovo campo d'indagine interdisciplinare tra astrofisica, cosmologia, fisica delle particelle; sono in corso molti grandi progetti (per es. per la ricerca della materia oscura dell'Universo).
- Circa 100 (!!) esperimenti sui RC sono attualmente operativi.
- La fisica dei RC è più economica della fisica agli acceleratori: più "dispersa" e interessa anche piccole nazioni.
- DOVE?
Su montagne sperdute, in gallerie nelle montagne (per schermare i rivelatori dai raggi cosmici meno penetranti, registrando i più penetranti: muoni, neutrini...), negli osservatori astrofisici, su palloni sonda, in regioni desertiche, sotto il ghiaccio, sott'acqua.

I raggi cosmici sono un laboratorio naturale dove studiare astrofisica e fisica delle particelle.

RAGGI COSMICI DI ALTISSIMA ENERGIA

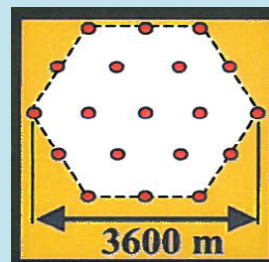
- Dopo 70 anni dalla scoperta di sciame atmosferici di particelle (Rossi e Auger), lo studio degli sciame indotti nell'atmosfera dai RC di più alta energia continua ad esser fonte di nuove conoscenze.
- Come studiarne l'origine? Un modo DIRETTO potrebbe essere una "osservazione astronomica", mappando il cielo con i RC stessi, MA...ci sono i campi magnetici! Non posso tracciarne l'origine, a meno che non si arrivi a energie di qualche Joule ($> 6 \text{ EeV}$).
- A queste energie si ha meno di una particella per Km^2/sr ogni secolo: ci viene in aiuto la *fisica degli sciame*.
- Uno sciame è composto da molte particelle: è sufficiente campionare la superficie che si vuole usare per la rivelazione.



Volcano Ranch, la “Regina del deserto”

1957 - 1963

Nel deserto di Volcano Ranch, New Mexico, Jonh Linsley e Livio Scarsi installano 19 contatori scintillatori plastici (area 3.3 m^2 ciascuno) disposti in un array a forma di esagono regolare ($\varnothing_{\text{max}} = 1800 \text{ m}$). Gli scintillatori vengono accoppiati a fotomoltiplicatori e ad oscillografi corredati da un sistema di registrazione fotografica.



Volcano Ranch, MIT
“Desert Queen”



Livio Scarsi e John Linsley



Il capannone della
cabina di comando

Fra i tanti sciami registrati, ne viene osservato uno contenente 30 miliardi di particelle originato da un cosmico primario di energia

$$\underline{E_0 = 6 \cdot 10^{19} \text{ eV}}$$

1962: Il diametro dell'array di Volcano Ranch viene portato a 3.6 km e John Linsley registra uno sciame di 50 miliardi di particelle!

E' questa la prima osservazione indiretta di un CR primario di energia $E_0 = 10^{20}$ eV ed ha mantenuto il primato per diversi anni.

1964: Arno Penzias e Robert Wilson misurano la radiazione cosmica di fondo (CMB, Cosmic Microwave Background) che, riconosciuta come l'eco del Big Bang, permea l'intero Universo.

... A. Penzias and R. W. Wilson, Astrophys. J. 142, 419 (1965).

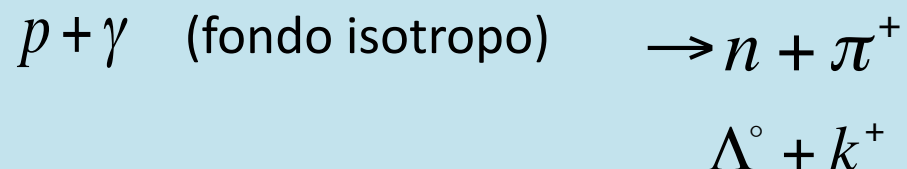
1966: **Cutoff GZK:**

Kenneth Greisen e, indipendentemente, Georgi Zatsepin e Vadim Kuzmin dimostrano che l'energia dei raggi cosmici viene ridotta a causa della loro interazione con la radiazione CMB e che non è possibile osservare raggi cosmici, assumendo essi siano protoni provenienti da distanze cosmologiche, di energia superiore a $5 \cdot 10^{19}$ eV (il "limite GZK" dai nomi degli scopritori).

Cutoff GZK

Greisen–Zatsepin–Kuzmin

Limite superiore teorico all'energia dei RC che arrivano da sorgenti lontane



VOLUME 16, NUMBER 17

PHYSICAL REVIEW LETTERS

25 APRIL 1966

END TO THE COSMIC-RAY SPECTRUM?

Kenneth Greisen

Cornell University, Ithaca, New York
(Received 1 April 1966)

The primary cosmic-ray spectrum has been measured up to an energy of 10^{20} eV,¹ and several groups have described projects under development or in mind² to investigate the spectrum further, into the energy range 10^{21} - 10^{22} eV. This note predicts that above 10^{20} eV the primary spectrum will steepen abruptly, and the experiments in preparation will at last observe it to have a cosmologically meaningful termination.

The cause of the catastrophic cutoff is the intense isotropic radiation first detected by

Penzias and Wilson³ at 4080 Mc/sec (7.35 cm) and now confirmed as thermal in character by measurements of Roll and Wilkinson⁴ at 3.2 cm wavelength. It is not essential to the present argument that the origin of this radiation conform exactly to the primeval-fireball model outlined by Dicke, Peebles, Roll, and Wilkinson⁵; what matters is only that the radiation exists and pervades the observable universe. The transparency of space at the pertinent wavelengths, and the consistency of intensity observations in numerous directions,

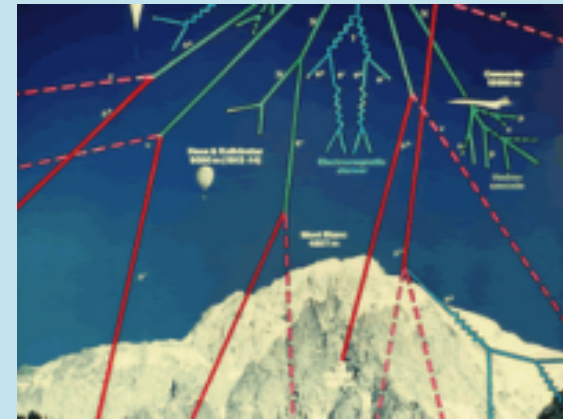
Soglia di 5×10^{19} eV

- Come spiegare allora l'evento da 10^{20} eV di Volcano Ranch ? evento particolare ? irripetibile ?
- ... il mistero si fa sempre più profondo ...
- ... per certificare l'esistenza di raggi cosmici di energia superiore al limite GZK, occorrono arrays di rivelatori sempre più grandi ...
- ... oppure bisogna pensare a tecniche diverse di osservazione e rivelazione

Lo sciame esteso (EAS, Extensive Air Shower)

Quando attraversa l'atmosfera terrestre il raggio cosmico (particella primaria) collide con i nuclei dell'aria provocando una cascata di particelle secondarie di energia più bassa, che a loro volta subiscono ulteriori collisioni producendo così uno sciame di miliardi e più di particelle che raggiungono il suolo terrestre in un'area la cui estensione può essere anche di diversi chilometri quadrati.

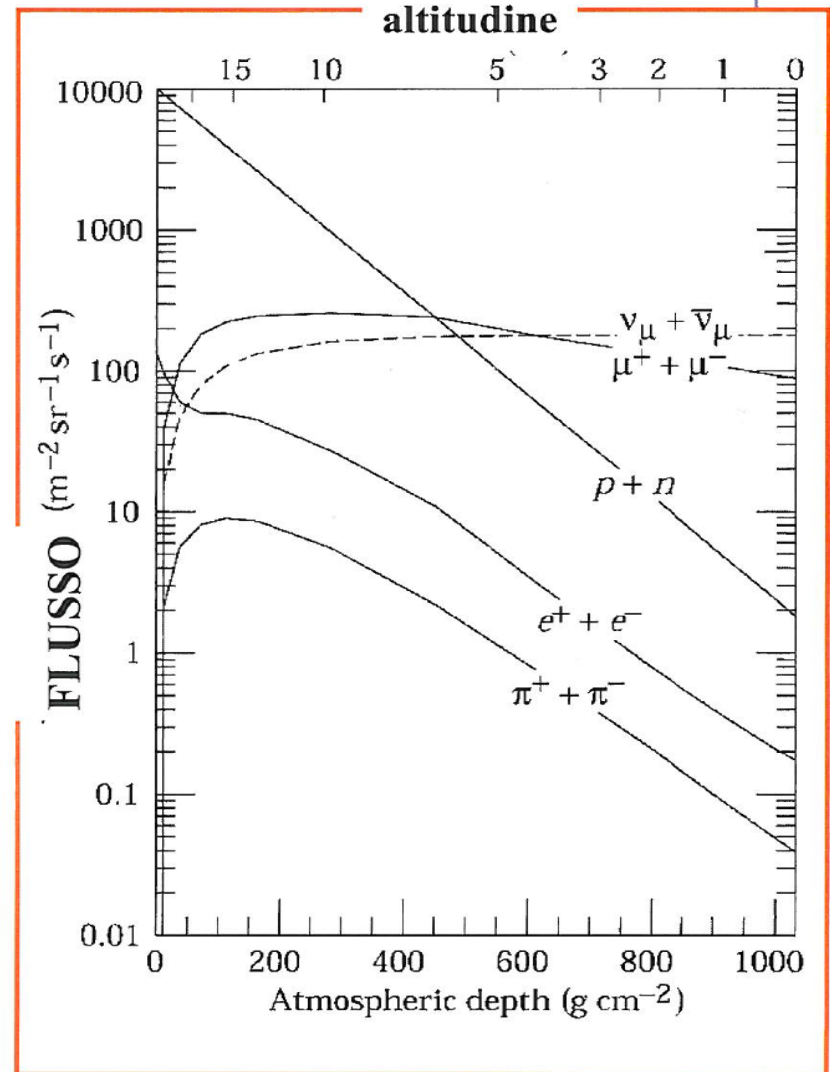
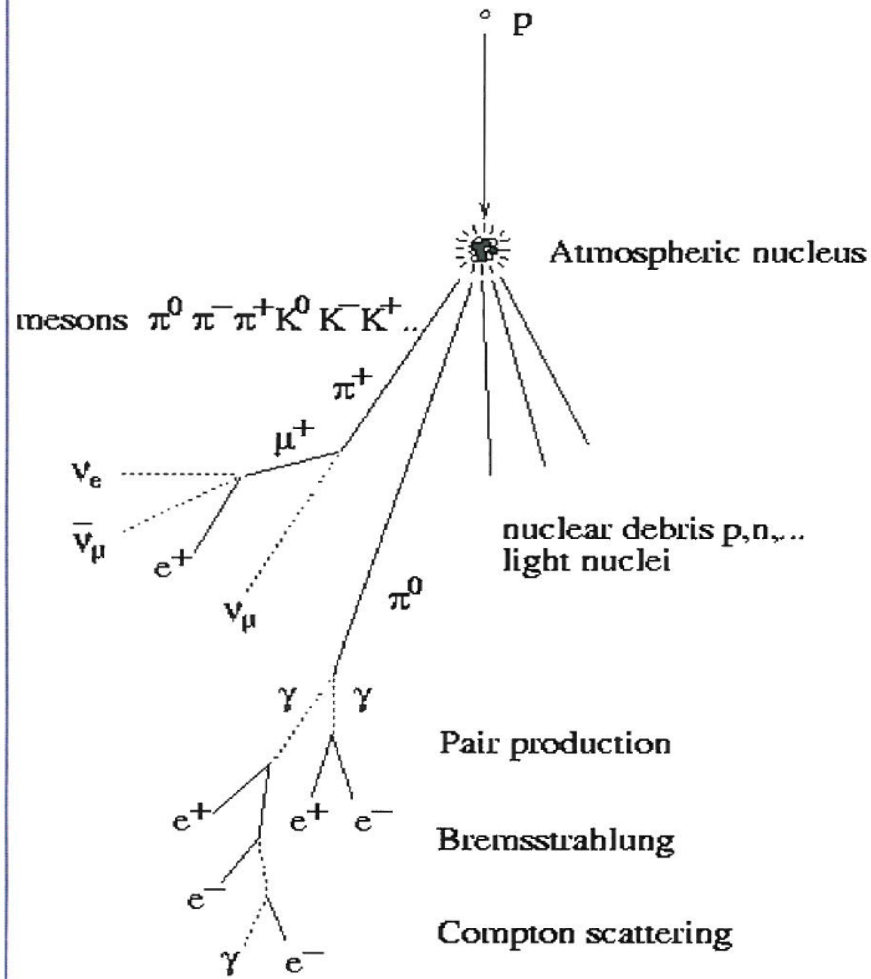
Il numero di particelle cariche prodotte da un tipico sciame e.m. generato da γ di altissima energia ha un max. a 5-10 km di quota, trascurabile al livello del mare



Gli sciame EAS contengono di tutto:

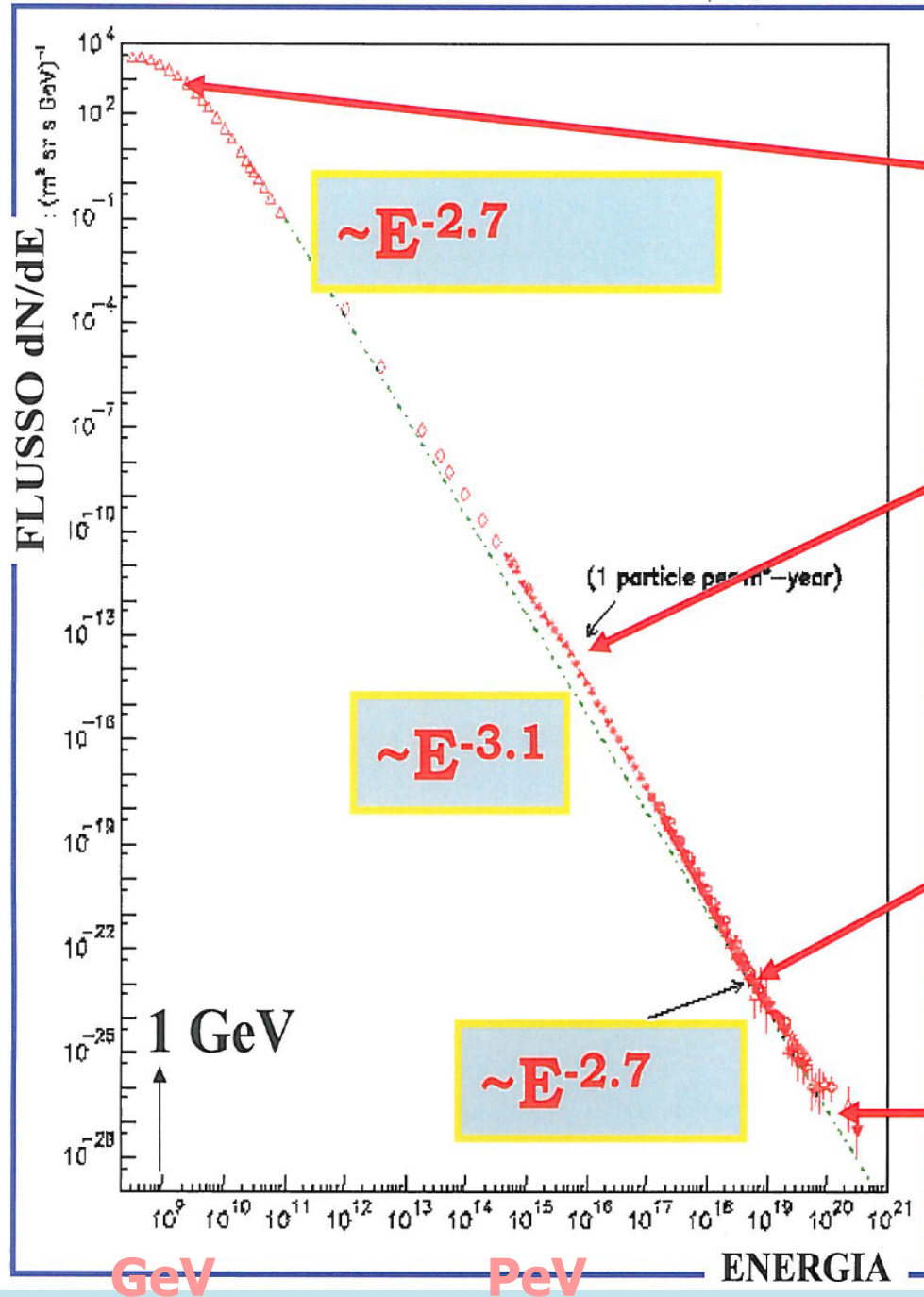
- nucleoni, nuclei,
- gamma duri,
- mesoni ($\pi^\pm, \pi^0, K^\pm, \dots$),
- leptoni carichi (e^\pm, μ^\pm, τ^\pm),
- neutrini (ν_e, ν_μ, ν_τ).

Particelle in atmosfera



ENERGIA : LO SPETTRO dN/dE

legge di potenza : $dN/dE = kE^{-\gamma}$
 su 12 ordini di grandezza !!!



$\sim 10^2 / \text{m}^2 / \text{secondo}$

Ginocchio
 10^{15} eV

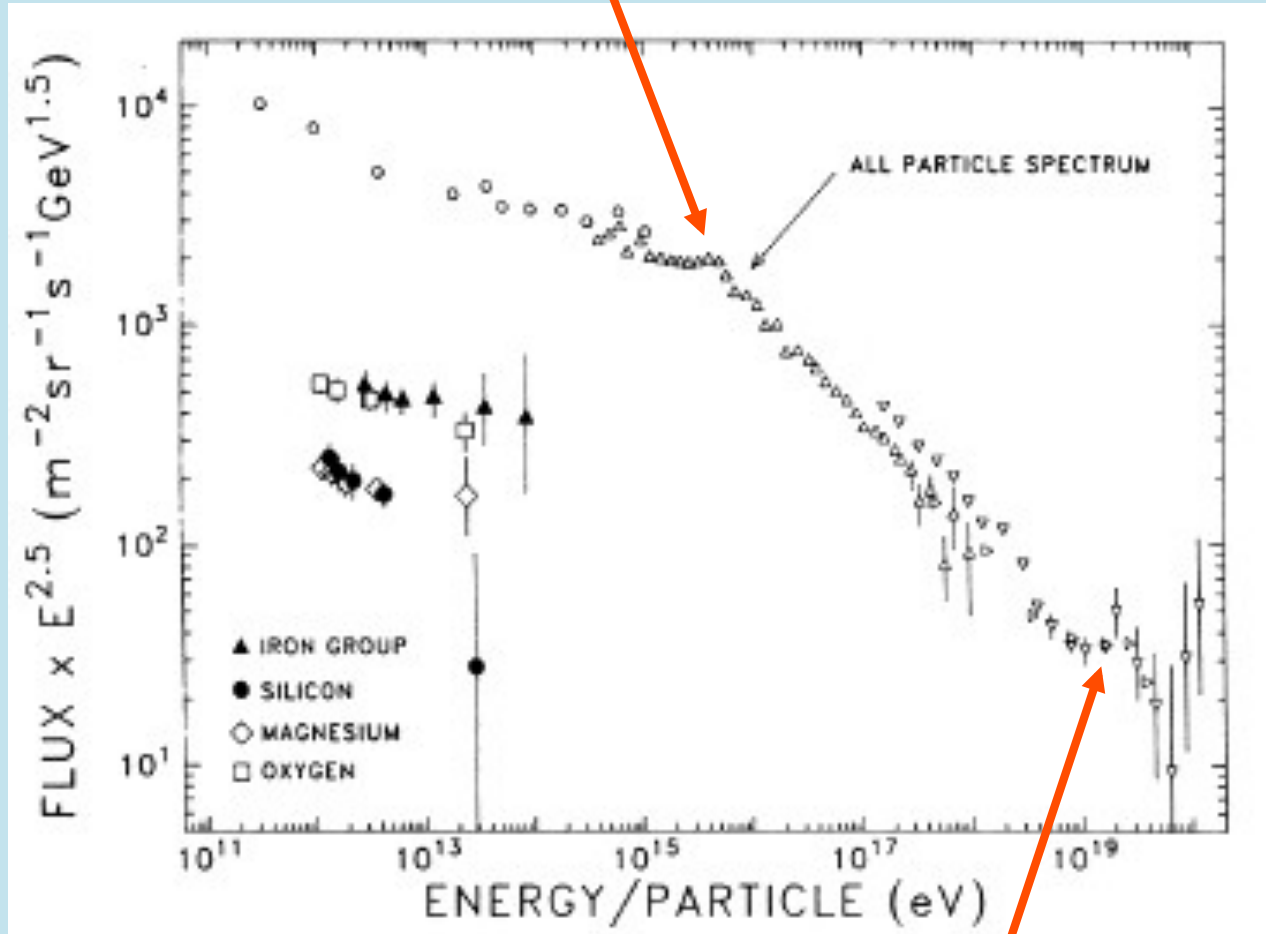
$\sim 1 / \text{m}^2 / \text{anno}$

Caviglia
 10^{19} eV

$\sim 1 / \text{km}^2 / \text{anno}$

$\sim 1 / \text{km}^2 / \text{secolo}$

ginocchio



caviglia

ORIGINE DEI PRIMARI

- Non provengono solo dal Sole: un p da 10^{15} eV ha un R di 10^{17} cm nel CM interplanetario e un R di $6 \cdot 10^{12}$ cm nel CM terrestre
- Non provengono solo dalla Galassia, perché un p da $6 \cdot 10^{19}$ eV nel CM galattico ha un R di $4 \cdot 10^{22}$ cm, pari al raggio galattico
- Non da tutte le stelle messe insieme e considerate (in media) come il Sole ($6 \cdot 10^{26}$ Watt)il Sole sarebbe ancora prevalente (10^6 volte!)
 - *Da dove provengono ?*
 - *Quali sono i meccanismi di accelerazione?*

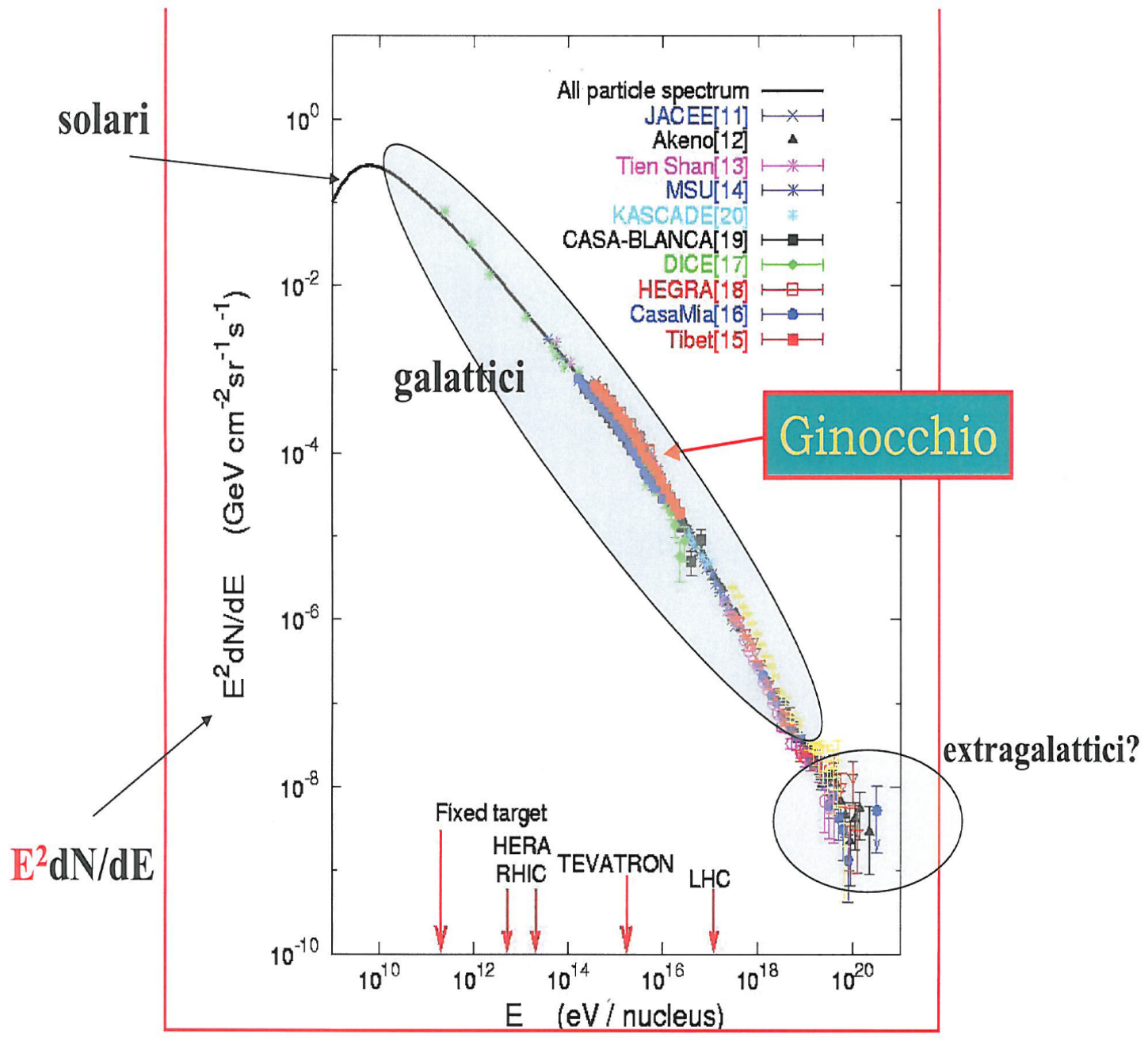
RAGGI COSMICI: ORIGINE

- I raggi cosmici carichi non puntano alla sorgente in quanto isotropizzati dalla interazione con i campi magnetici
- VENGONO DA LONTANO O DA VICINO ?

$E < \text{GeV}$ - origine solare (evidenza diretta)

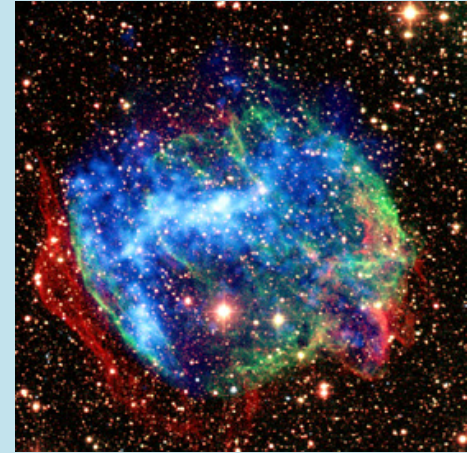
$E < 10^{18} - 10^{19} \text{ eV}$ – origine extra solare ma galattica

$E > 10^{19} \text{ eV}$ origine extragalattica ??

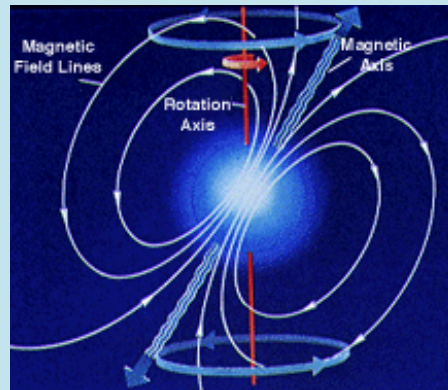


Allora: oggetti speciali

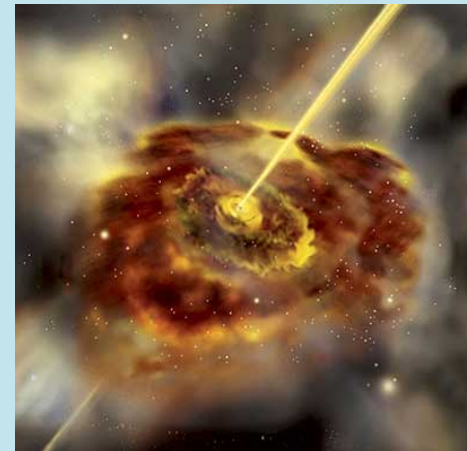
Supernovae Remnants



Pulsars con intensi campi magnetici



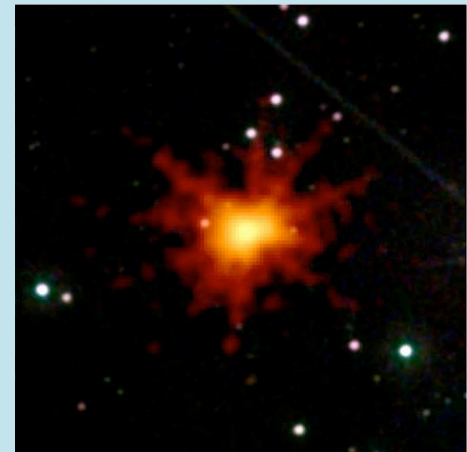
AGN



Buchi Neri



GRBs

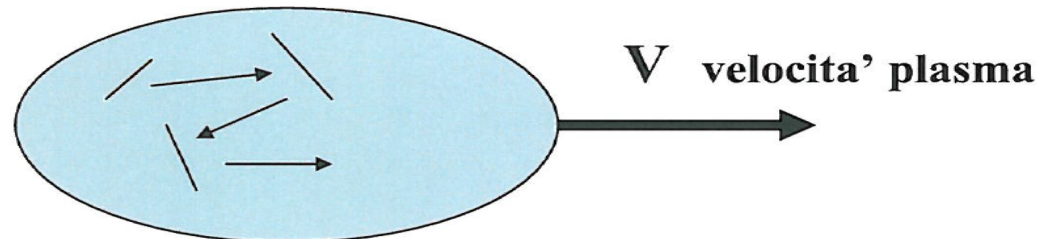


COME SONO ACCELERATI ?

Il meccanismo di Fermi

Nel 1949 E. Fermi propose un meccanismo di accelerazione naturale delle particelle nel cosmo che ancora oggi e' considerato il meccanismo piu' accreditato di accelerazione.

In un plasma magnetizzato le 'irregolarita' del campo magnetico possono fungere da 'specchi magnetici' per le particelle (vedi bottiglia magnetica e fasce di Van Allen). Le particelle devono rimanere confinate dai campi magnetici



Lo 'specchio' ha massa molto grande rispetto alla particella ed in ogni urto essa trasferisce una quantita' di energia proporzionale all'energia della particella stessa e alla velocita' del plasma $\Delta E \propto E \cdot V$

produce spettri di potenza $dN/dE \propto E^{-\gamma}$ (supernovae ?)

ACCELERAZIONE DEI RAGGI COSMICI

La Potenza necessaria

- Densità di energia locale dei raggi cosmici $\rho_E \approx 1 \text{ eV/cm}^3$
- Estrapolando alla galassia, la potenza assorbita dai R.C. della galassia è:

$$W_{CR} = \frac{V_D \cdot \rho_E}{\tau_R} \approx 5 \times 10^{40} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$$

Dove V_D è il volume del disco galattico ($4 \times 10^{66} \text{ cm}^3$), e τ_R il tempo di residenza nella galassia (6×10^6 anni) (Berillio).

1964:

E' stato ipotizzato da Ginzburg e Syrovatskii che l'ordine di grandezza di questa potenza suggerisce l'implicazione delle supernove nel meccanismo di accelerazione dei RC.

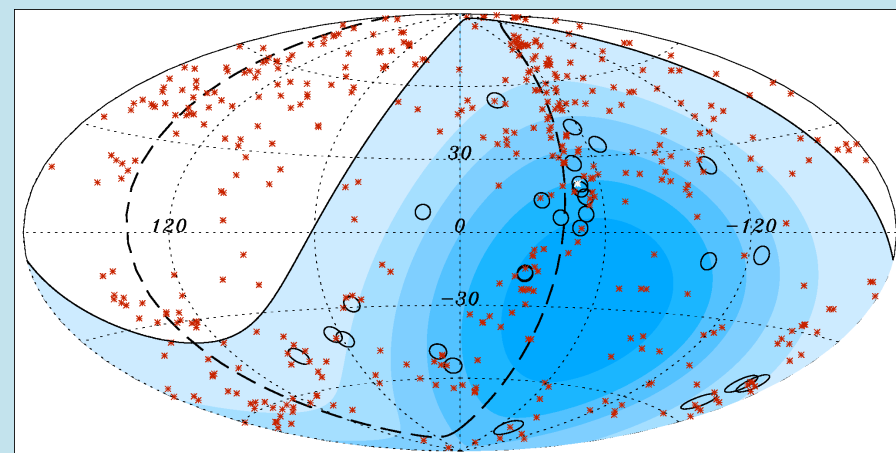
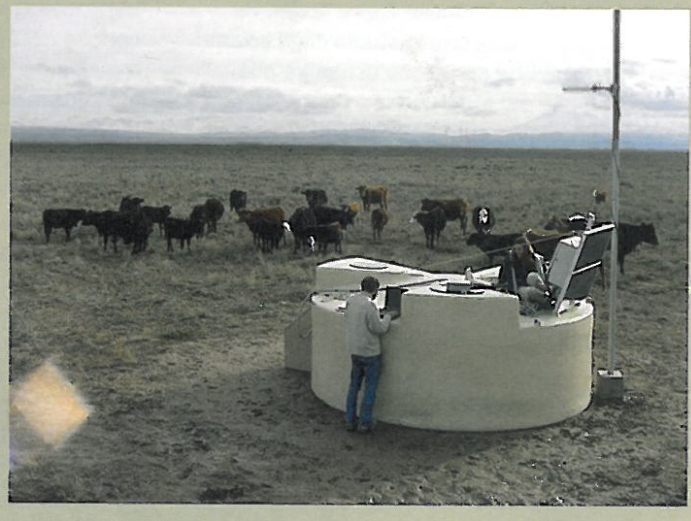
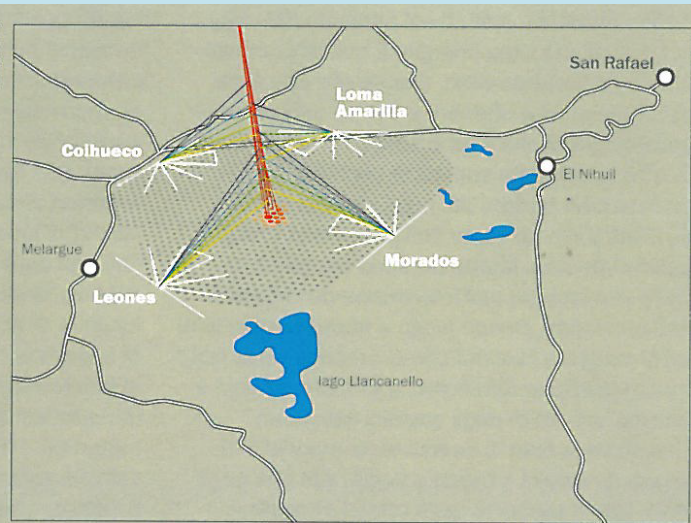
L'OSSERVATORIO PIERRE AUGER

- Nel 1992 Cronin (Nobel 1980 per studio su mesoni K) e Watson proposero la costruzione di un osservatorio per RC così grande da poter raccogliere una statistica consistente sui RC di altissime energie: Argentina.



P. Auger (1899-1993)

- Nel 1999 ha inizio la costruzione del “sito sud” del gigantesco AUGER. (Osservatorio Pierre Auger). Nel 2004 ha cominciato a raccogliere dati.
- Campiona attualmente una superficie di oltre 3000 Km² nella pampa vicino a Malargue, con 1600 rivelatori Čerenkov ad acqua (da 11 000 litri ciascuno) a distanza di 1.5 km l'uno dall'altro, e 4 stazioni con 24 telescopi di fluorescenza ciascuna, distribuite all'interno dell'array.
- La stima osservativa prevista è di 30 eventi di raggi cosmici all'anno con energie $E_0 > 10^{20}$ eV, oltre ad un gran numero di raggi cosmici ad energie più basse.
- Ha scoperto che le sorgenti dei raggi cosmici di altissima energia non sono distribuite uniformemente nel cielo. Al contrario, i risultati di Auger trovano il legame tra queste particelle e la posizione delle galassie più vicine con un nucleo attivo al loro centro.



Novembre 2007: annuncio che i nuclei galattici attivi sono molto probabilmente le sorgenti dei raggi cosmici più energetici che colpiscono la superficie terrestre.

Sembrerebbe provato che l'origine dei UHE RC sia legata ai collassi gravitazionali in prossimità dei buchi neri supermassicci.

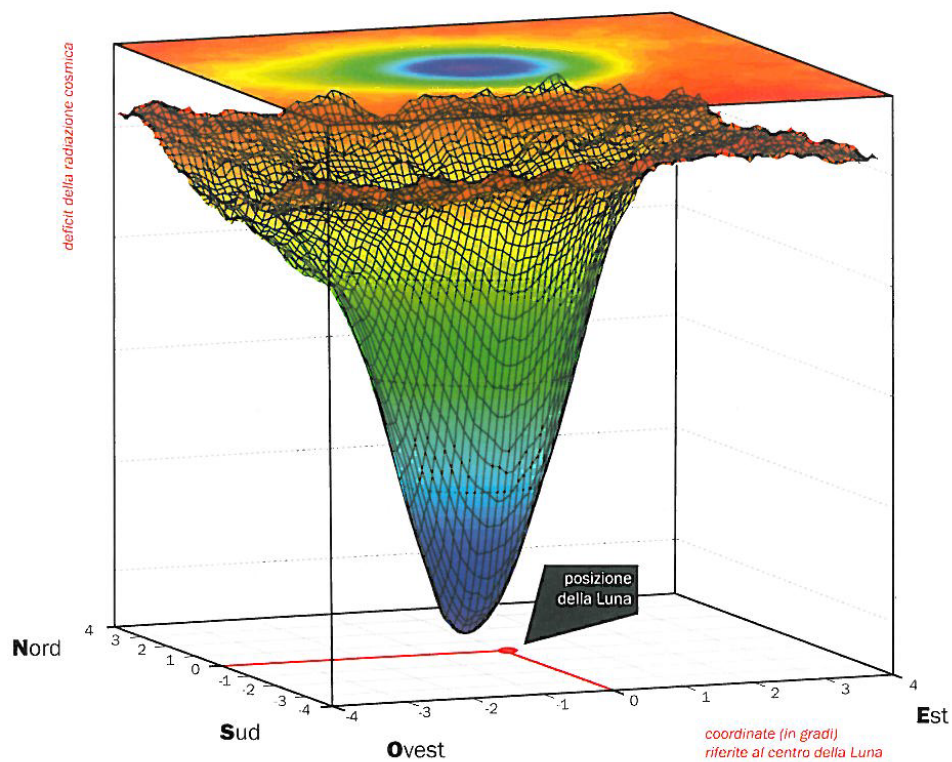
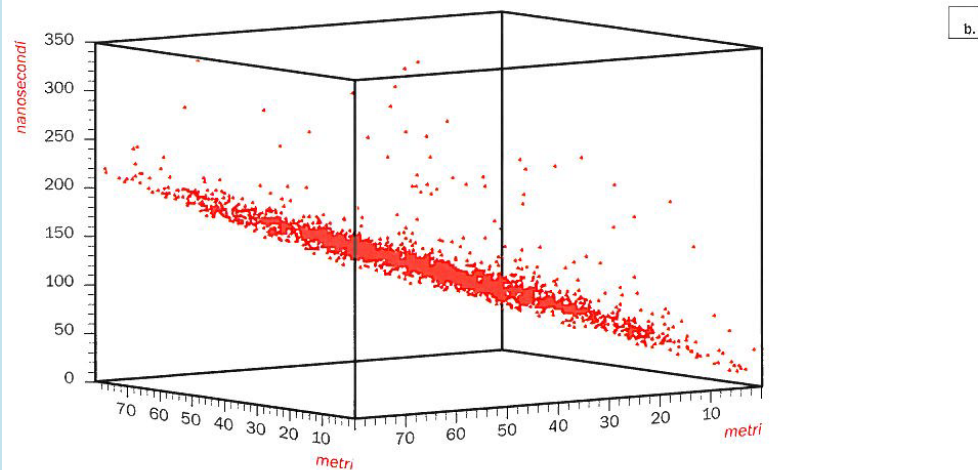
Esperimento ARGO-YBJ

ARGO-YBJ (Astrophysical Radiation with Ground-based Observatory at YangBaJing) ha i seguenti obiettivi scientifici, tra gli altri: ricerca di sorgenti dei Raggi Cosmici mediante i gamma di energia 100 GeV - 10 TeV; misura dei Raggi Cosmici tra (1 - 10000) TeV.

Questo programma scientifico è stato portato avanti mediante un apparato "full-coverage" realizzato da un tappeto di rivelatori RPC di circa 5600 m².

L'apparato era installato presso il Laboratorio Internazionale per i Raggi Cosmici situato a Yangbajing (Tibet, P.R. China), 4300 m sul livello del mare.





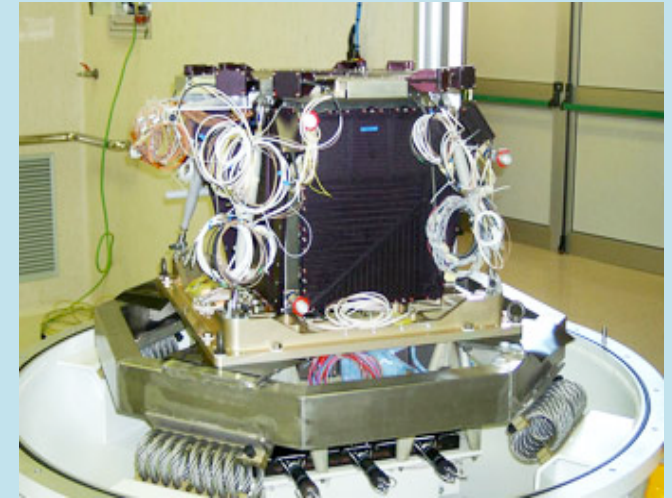
Ricostruzione di uno sciame di Raggi cosmici di alta energia così come visto da Argo: la struttura dello sciame mette in evidenza i diversi tempi di arrivo delle particelle sulla superficie del rivelatore.

L'ombra della Luna. Nell'immagine è rappresentato il deficit di raggi cosmici in corrispondenza del nostro satellite, che scherma la superficie terrestre dalle particelle in arrivo.

PAMELA

Studiare i raggi cosmici per cercare materia oscura e antimateria

Con gli strumenti attuali la distinzione tra materia e antimateria è possibile solo fino a energie non altissime: ricerche riguardanti il “fondo isotropo” nell’Universo.

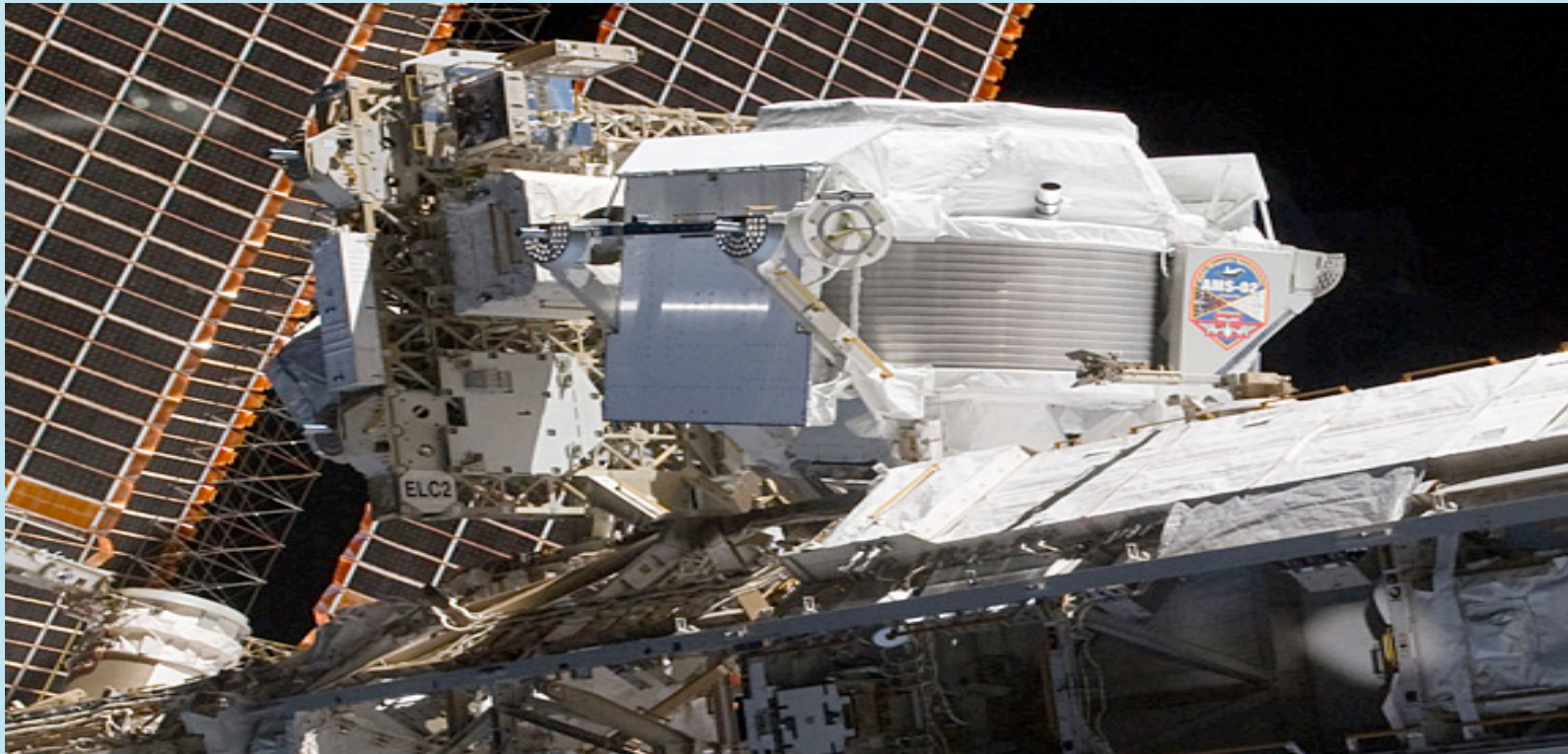


- PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light – nuclei Astrophysics); spettrometro magnetico, satellite principalmente russo e italiano: può misurare le cariche e le masse delle particelle (quindi distinguere materia antimateria).
- Lanciato nel 2006.
- Recentemente: quantità di antielettroni molto più alta di quella che ci si attendeva; inoltre il rapporto anti e^- / e^- cresce all’aumentare dell’energia.
-> arXiv:1103.2880 (2011)

AMS

AMS (Alpha Magnetic Spectrometer)

La fisica delle particelle va nello Spazio



AMS-02 consiste in una serie di sotto-rivelatori che permettono di misurare l'identità e l'energia di ogni particella che li attraversa

Forte partecipazione italiana, in orbita dal 16 maggio 2011 a bordo della ISS

AMS è stato ribattezzato l'Hubble Space Telescope dei raggi cosmici.

RAGGI GAMMA

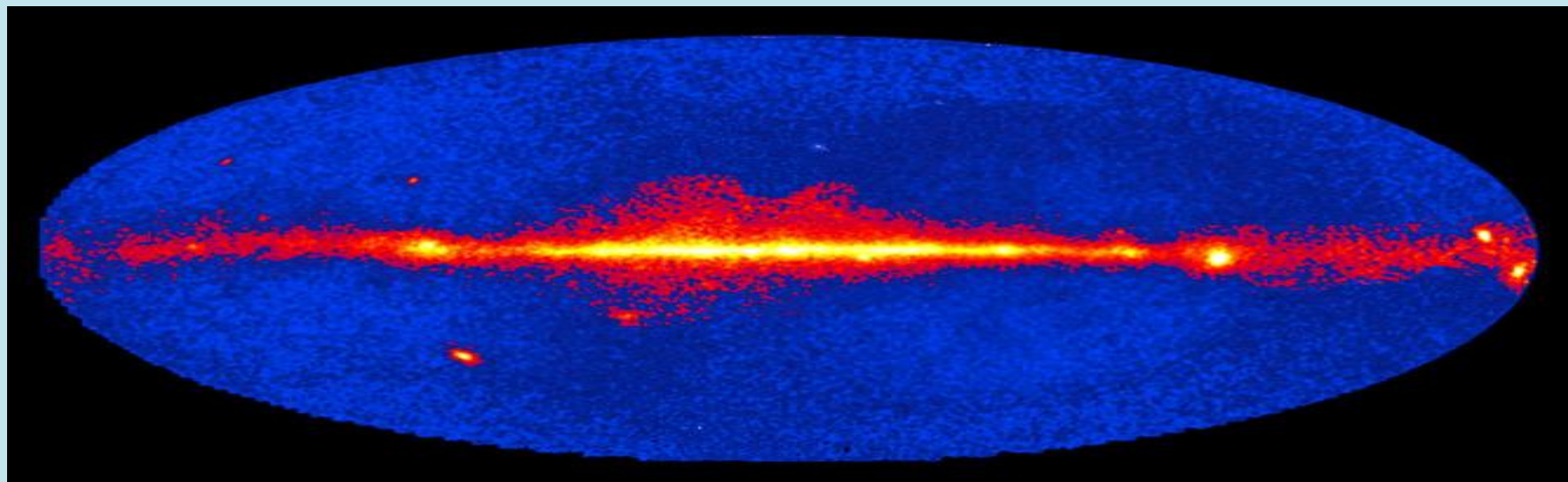
- Per fare astrofisica con i raggi cosmici in modo adeguato: linea che ha dato molti frutti negli ultimi anni è la rivelazione dei **raggi cosmici NEUTRI**. I raggi gamma sono circa 1/1000 del flusso totale dei raggi cosmici.
- Sono la “firma” di raggi cosmici decine di volte più energetici.
- Possono venire osservati in modo diretto (con rivelatori su satelliti) o indiretto (rivelando a terra gli sciame di particelle generati da essi nell’interazione con l’atmosfera: solo γ di altissima energia).
- Lo studio dei γ da satellite, preceduto da pioneristico studio dell’emissione di sorgenti astrofisiche in banda X (per es. R. Giacconi, Nobel fisica 2002).

AGILE

AGILE (Astrorivelatore Gamma ad Immagini ultra **LEggero**) è un satellite astronomico a raggi Gamma e a raggi X dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI).

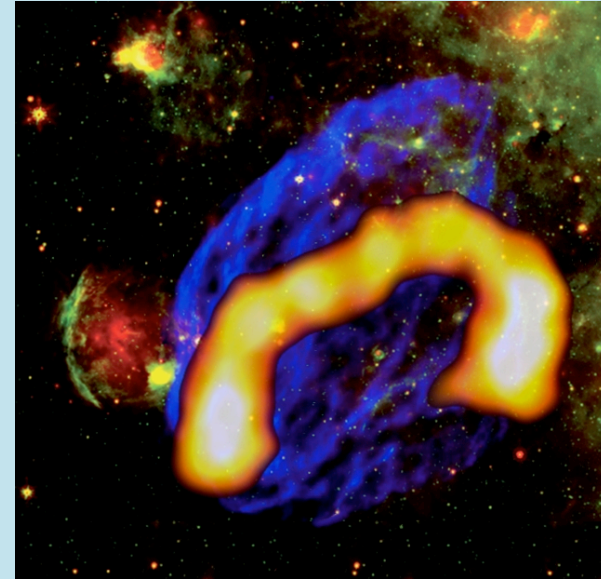
Lanciato il 23 aprile del 2007.

Produce immagini del cielo nell'intervallo di energia tra 30 MeV e 50 GeV (raggi gamma di alta energia) e in quello compreso tra 18 e 60 keV (raggi X di alta energia).



AGILE risolve il mistero dell'origine dei raggi cosmici

AGILE has discovered a pattern of **gamma-ray emission from the Supernova Remnant W44** that can be unambiguously attributed to **accelerate protons smashing against surrounding gas**. For many decades, a direct identification of sites in our galaxy where proton acceleration takes place has been elusive. The AGILE data resolves the problem of **clearly identifying a source of energetic cosmic rays in our galaxy**.



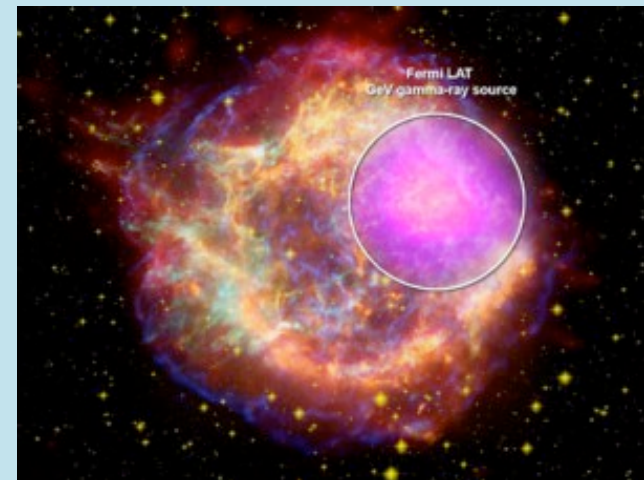
Astrophysical Journal Letters, Volume 742, Issue 2, article id. L30 (2011)

On December 11, 2011 at 22:17:33 UT the SuperAGILE hard X-ray monitor aboard the Italian AGILE satellite localized a Gamma Ray Burst, GRB 111211A (GCN #12666 F. Lazzarotto et al.). The GRB 111211A is the first event detected by SuperAGILE associated with a Supernova (GCN #12802 A. de Ugarte Postigo et al.). While an average number of about 200 - 300 GRBs are localised each year in the X-ray band, less than twenty firm associations with Supernovae are established up to now. The SuperAGILE GRB 111211A is a rare occurrence of a burst which appears to be accompanied by a Supernova explosion, and gives the opportunity to further investigate the GRB-Supernova connection.

FERMI

- Il **Gamma-ray Large Area Space Telescope (GLAST)** è un esperimento approvato nel 2001 dalla NASA, a cui collaborano agenzie Francesi, Svedesi, Giapponesi e Italiane. Concepito per lo studio della radiazione elettromagnetica emessa da corpi celesti nell'intervallo di energie tra 8 keV e 300 GeV (raggi gamma), l'osservatorio comprende due strumenti scientifici:
- il *Large Area Telescope (LAT)* sensibile alla radiazione gamma tra 20 MeV e 300 GeV;
- il *Gamma-Ray Burst Monitor (GBM)*, per lo studio dei fenomeni transienti ad energie relativamente più basse (tra 8 keV e 40 MeV).
- Il lancio del telescopio è avvenuto l'11 giugno 2008. La NASA l'ha ribattezzato **Fermi Gamma-ray Space Telescope**, in onore di Enrico Fermi.

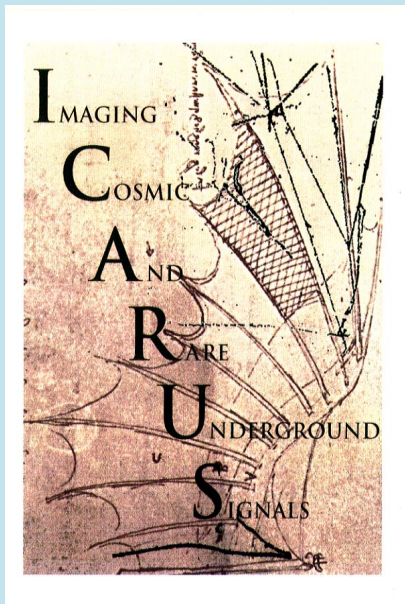
Ha trovato la prova conclusiva che le cose stanno effettivamente come era stato ipotizzato dal grande fisico.... FERMI dà ragione a FERMI.



Astroparticle Physics (2011)

RAGGI COSMICI CON ν

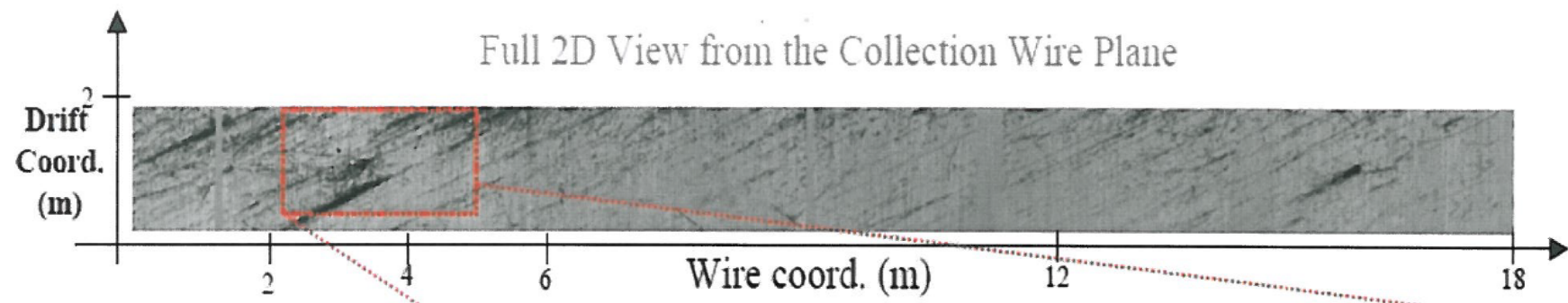
ICARUS



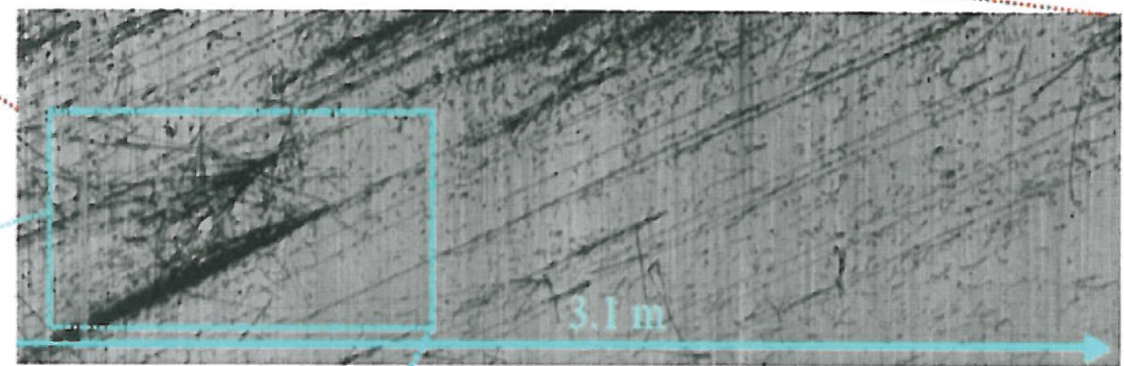
ICARUS è una camera a proiezione temporale ad Argon liquido con massa attiva di alcune migliaia di tonnellate, che fornisce immagini ad alta risoluzione degli eventi e misure calorimetriche della ionizzazione.



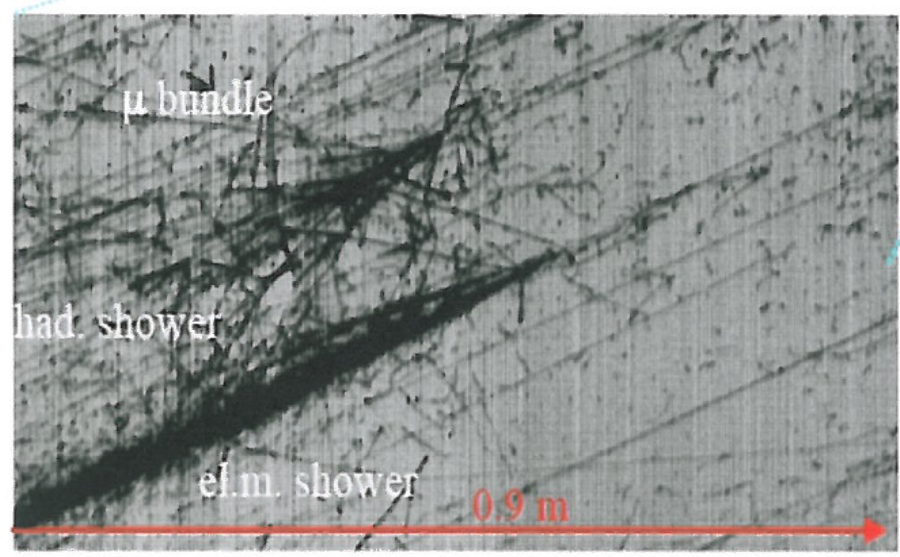
In presa dati ai LNGS dal 2010



Zoom View

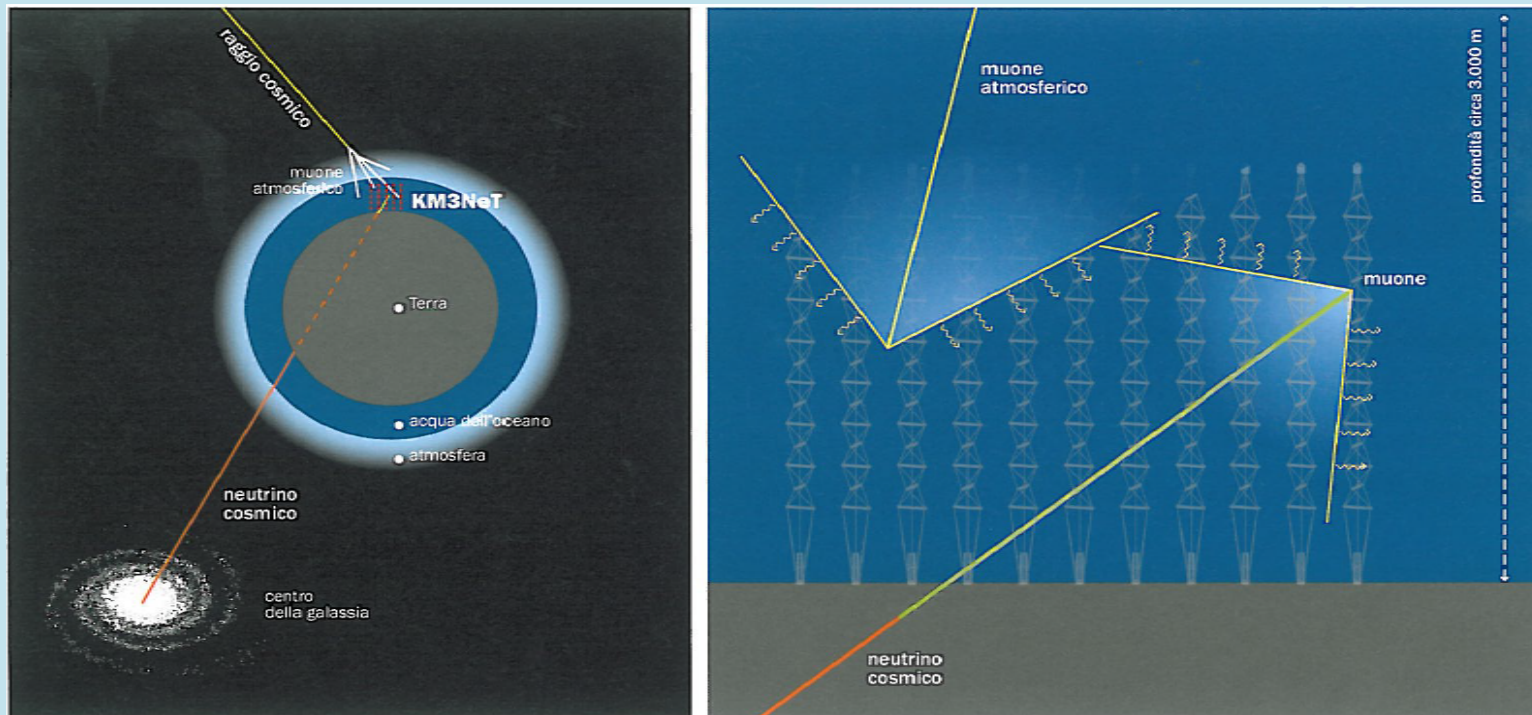


Zoom View

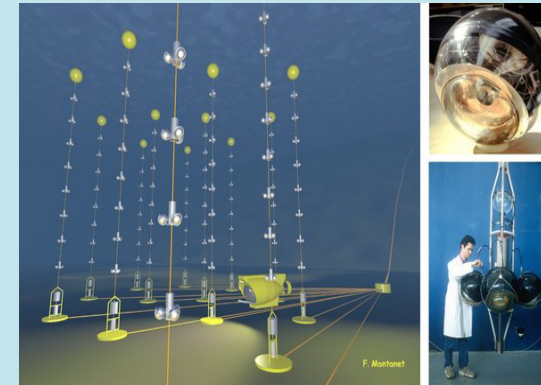
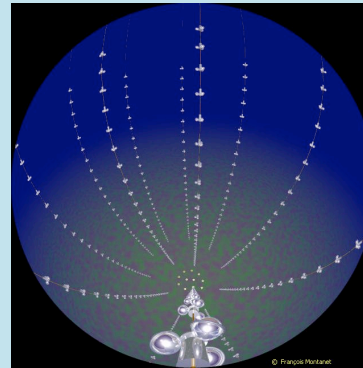


A spectacular event showing a dense Air Shower formed by hundreds of parallel tracks (muons and pions) and low energy γ 's converting into electrons. Also visible in the zoom views a hadr. shower, an el.m. shower and a highly collimated muon bundle.

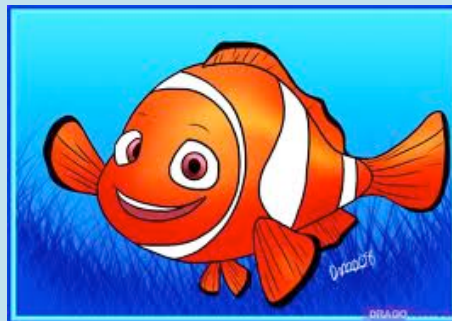
- Il 23 febbraio 1987 i rivelatori di neutrini Kamiokande, Imb e Baksan registrarono una ventina di eventi in coincidenza temporale con l'esplosione della supernova SN1987A che seguì al collasso gravitazionale di una supergigante blu nella Nube di Magellano, distante circa 168 mila anni luce.
- La prossima frontiera è la rivelazione dei ν con energia > 1 TeV. In oggetti come BH, AGN, GRB si verificano le condizioni per accelerare particelle ad energie elevatissime; rivelare i ν vuol dire individuare i più potenti acceleratori cosmici e svelare il mistero dell'origine dei raggi cosmici.
- Necessari volumi di rivelatore dell'ordine del chilometro cubo...



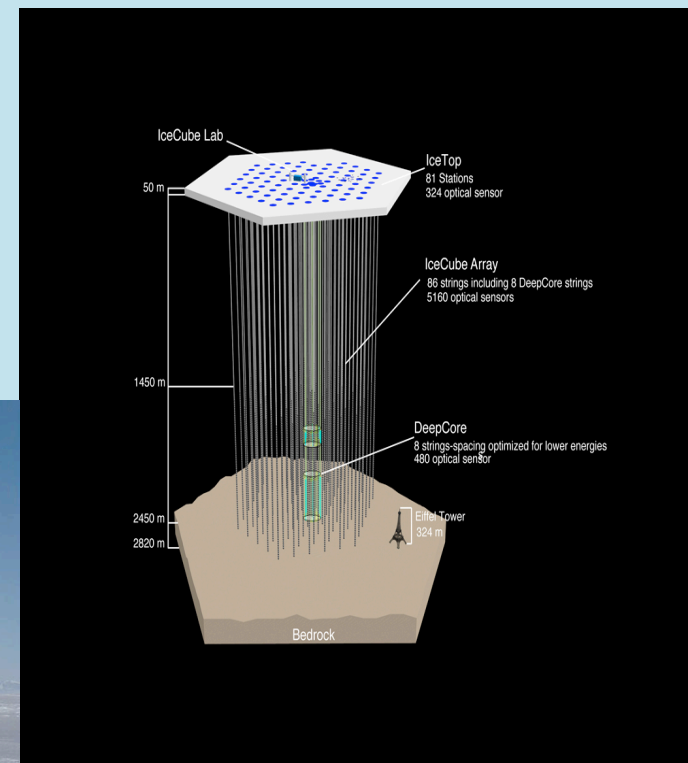
ANTARES (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental REsearch)



NEMO (Neutrino Mediterranean Observatory)



ICECUBE Neutrino Detector



Perché studiare i raggi cosmici?

I raggi cosmici primari costituiscono l'unico campione diretto della materia esistente al di fuori del sistema solare

Perché studiare i raggi cosmici di energia estrema ?

Perché ...

... sono un mistero (origine, composizione, accelerazione, propagazione, energia)

... potrebbero rivoluzionare l'astrofisica, e non solo (modelli teorici non definitivi)

... forniscono un potente strumento scientifico (energie in gioco difficilmente raggiungibili con acceleratori).

Nemmeno il grande acceleratore superconduttore LHC al CERN, con il suo limite di ~14 TeV, potrà competere con i Raggi Cosmici più energetici conosciuti

Tante domande sugli EECR (Extremely high Energy Cosmic Ray) $E_0 > 10^{19}$ eV non hanno avuto ancora risposta:

- Da dove vengono ?
- Quale è la loro massima energia, se ne esiste una ?
- Cosa sono gli EECR ? protoni, nuclei, neutrini, ...?
- Quali processi e quali oggetti astronomici possono generare radiazione alle energie estreme finora osservate?
- Esiste qualche anisotropia che indichi delle regioni sorgente ?
- Quale è il flusso dei neutrini alle energie estreme ?
- Sono gli EECR legati al Big Bang ? e alla “materia oscura” ?

