

Raggi Cosmici ad alta energia

Raggi Cosmici e Astronomia Gamma

programma

- Raggi Cosmici, origine ed accelerazione
- Astronomia gamma
- Tecniche sperimentali (satellite - Cerenkov - Array)
- Dati Sperimentali
- Prospettive Future

Termini e Nomenclatura della fisica delle astroparticelle (Astroparticle Physics)

Astroparticelle : si occupa di problematiche scientifiche tipicamente astrofisiche utilizzando concetti e tecniche mutuati dalla fisica delle particelle elementari.

Campo interdisciplinar

Ricerca di nuove particelle “esotiche” (monopolo, neutralino ...)
determinazione di proprietà di particelle note (oscill. Neut.)
Effetti astrofisici legati a proprietà di particelle (dark matter)

I Raggi cosmici

La terra viene investita da un flusso di particelle cariche e neutre di alta energia di origine extraterrestre

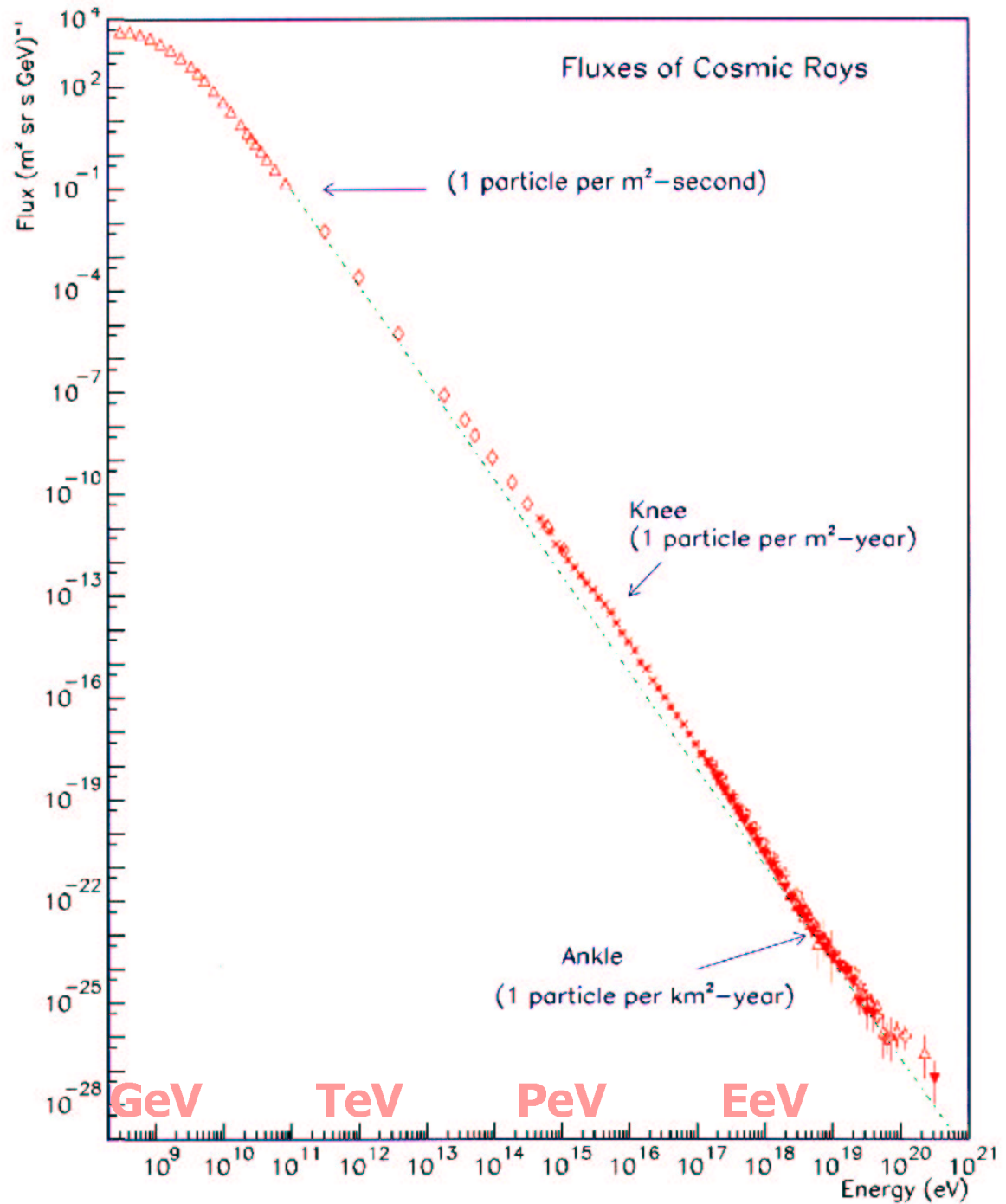
Il flusso di tali particelle è pari a circa 1000 per metro quadro per secondo (90% protoni, 9% elio ed il resto nuclei pesanti).

I raggi cosmici hanno avuto un ruolo storico nello sviluppo della fisica subnucleare, ma le domande fondamentali :

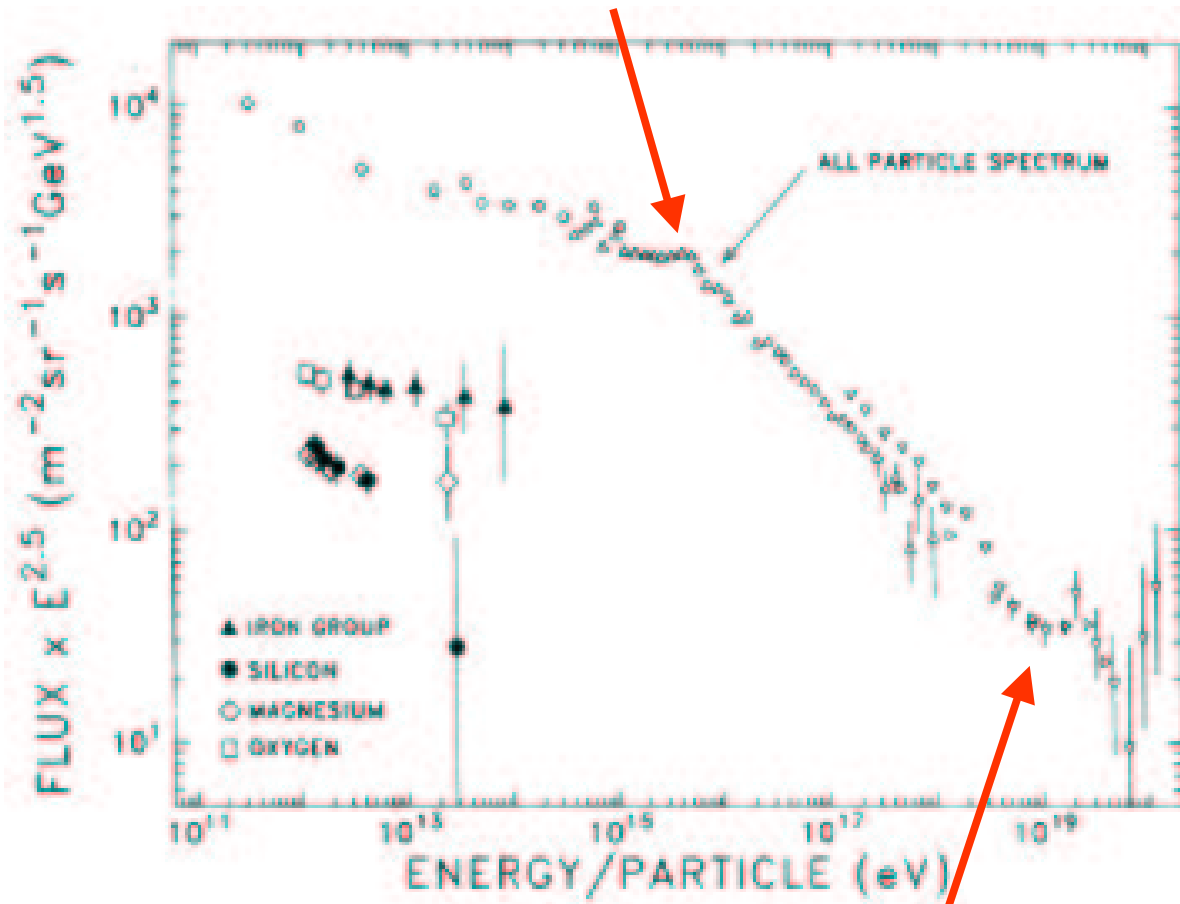
- da dove provengono ?
- quali sono i meccanismi di accelerazione?

aspettano ancora risposte completamente esaurienti

All particles spectrum



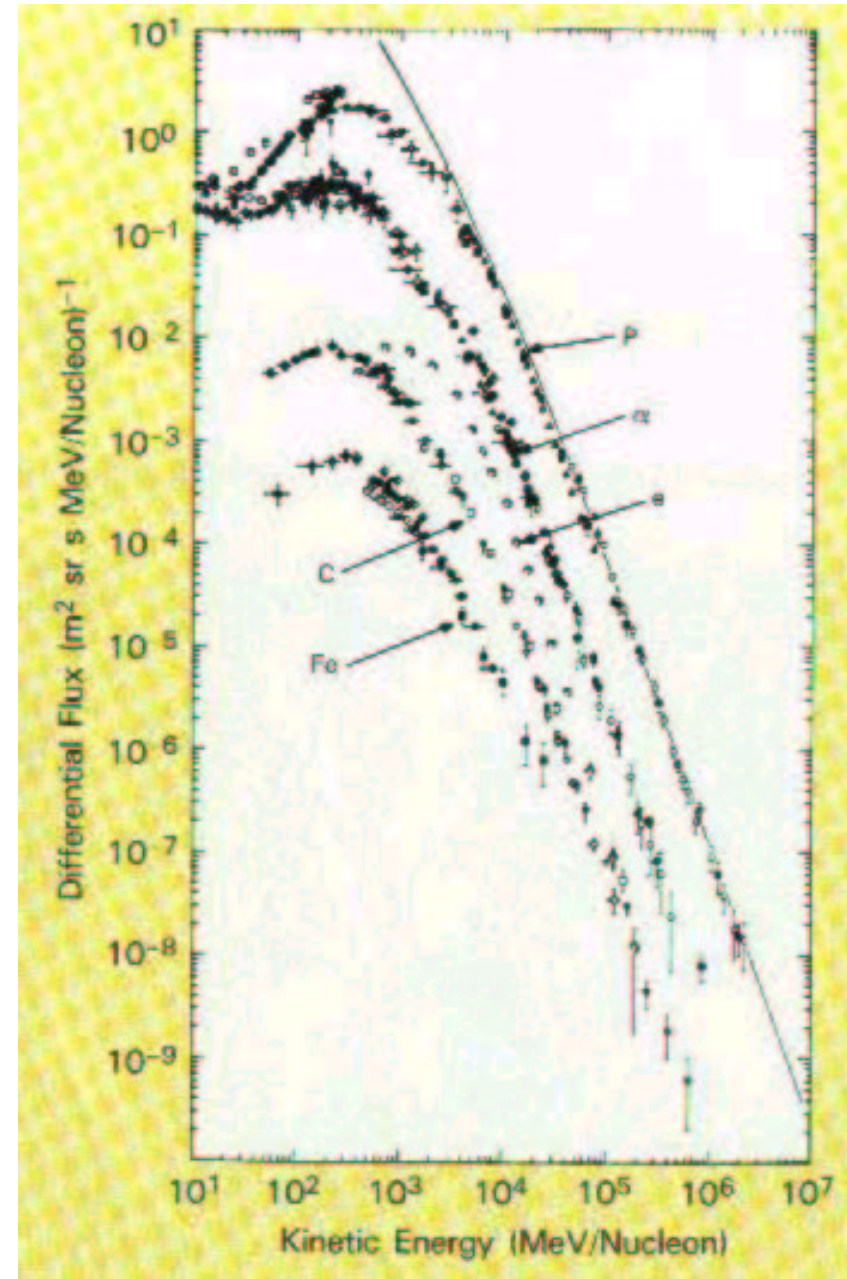
ginocchio



caviglia

The elemental composition

The compilation of cosmic ray spectral measurements in the Figure shows that all energy distributions have power-law shapes at high energies, with very similar slopes for the different species. The form of these spectra provides important clues to the mechanism of acceleration. Subtle differences among these spectra provide information transport processes by which cosmic rays propagate through the Milky Way to arrive at the Earth.



Fisica dei raggi cosmici

Domande fondamentali:

- 1) Da dove vengono?
- 2) Quali sono i meccanismi di accelerazione?

Risposte di prima approssimazione :

- 1) Essenzialmente di provenienza galattica- (giroraggio)
- 2) Meccanismo di Fermi

Il campo magnetico galattico è circa $3\mu\text{G}$ ed mediamente parallelo al braccio della spirale della galassia, con grandi fluttuazioni

Knee region 10^{15} 10^{16} eV

$1\text{pc}=3.1 \times 10^{13}$ km

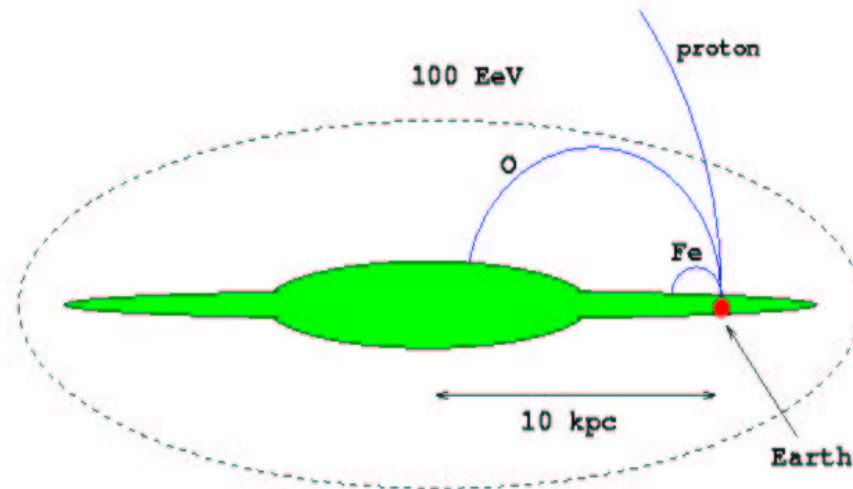
$1\text{anno-luce}=9.5 \times 10^{12}$ km

Containment of the UHE Cosmic Rays

$$\text{Larmor radius: } R = \frac{E}{ZB}$$

kpc \longleftarrow \uparrow \longleftarrow EeV
 \downarrow μG

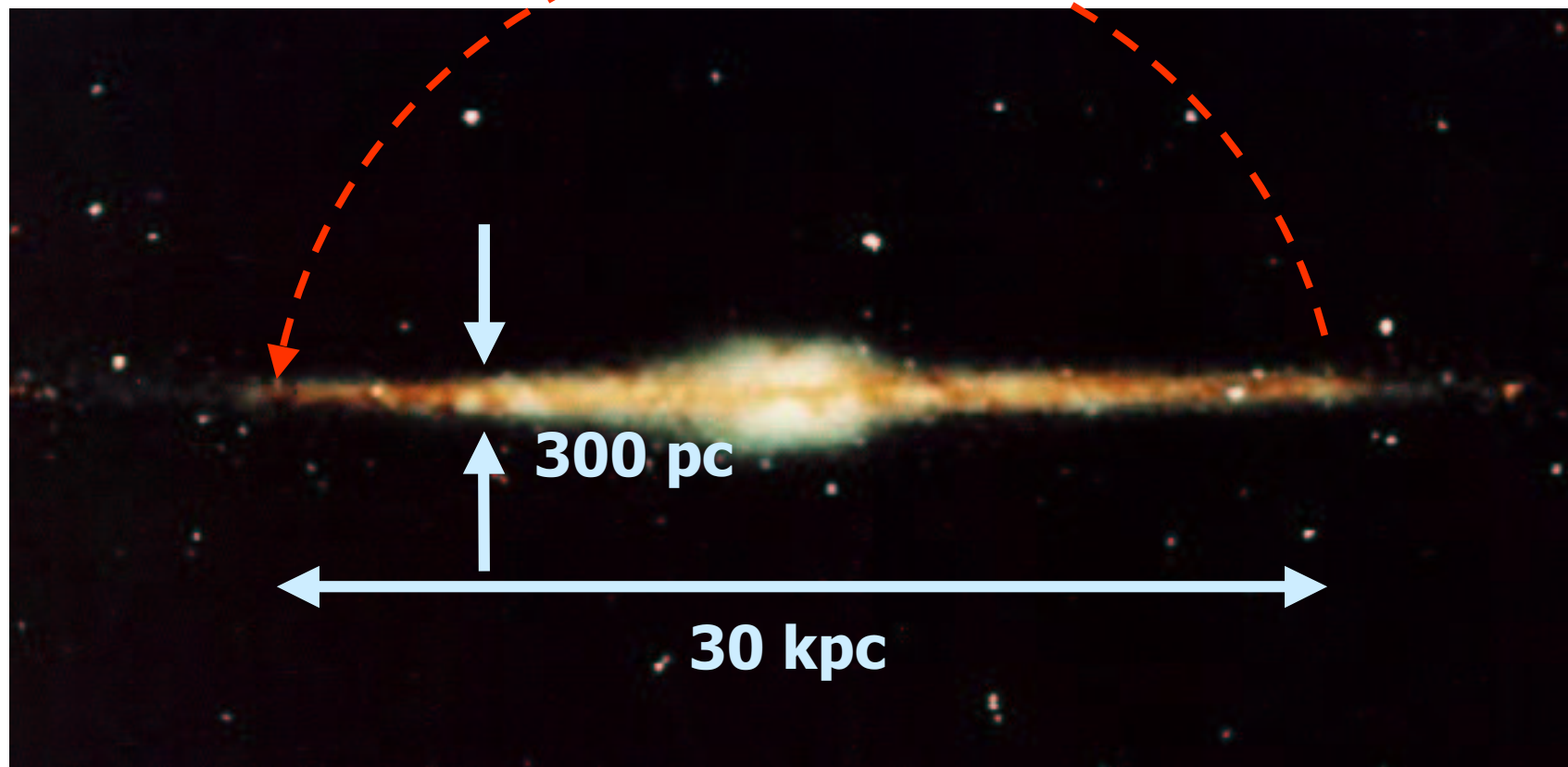
Assuming 3 micro-gauss magnetic field



100 EeV galactic heavy nuclei possible

Unknown: field in halo

Protone da $5 \cdot 10^{19}$ eV in un campo di $3 \mu\text{G}$



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 $\approx 4 \times 10^{66} \text{ cm}^3$, e

τ_R il tempo di residenza nella galassia $\approx 6 \times 10^6$ anni (Berillio)

- E' stato ipotizzato da Ginzburg e Syrovatskii (1964) che l'ordine di grandezza di questa potenza suggerisce l'implicazione delle supernove nel meccanismo di accelerazione dei R.C.:

Alcuni fatti rilevanti sui Raggi Cosmici

Nuclei primari carbone ossigeno ferro (prodotti dalla nucleosintesi stellare). Nella radiazione cosmica si trovano

Litio, Berillio e Boro facilmente prodotti da reazioni di spallazione.

Il rapporto primari a secondari porta alle seguenti conclusioni:

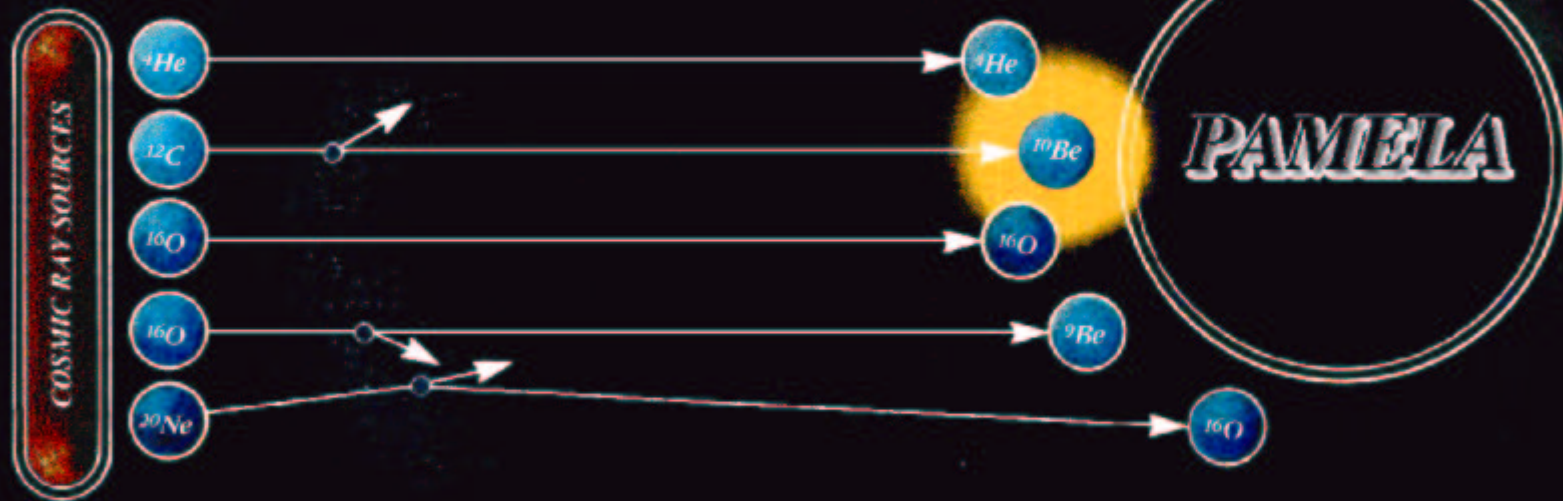
- I raggi cosmici nella loro vita attraversano circa 5-10 g/cm²
- Lo spessore attraversato diminuisce al crescere dell'energia

Lo spessore trasversale della galassia è circa 10⁻³ g/cm²

- R.C. attraversano migliaia di volte la galassia
- R.C. alta energia passano minore tempo nella galassia
- Prima accelerazione poi propagazione

La misura del rapporto degli isotopi instabili con quelli stabili di nuclei “secondari” permette di valutare il *tempo di residenza τ_r dei R.C: nella galassia*. In particolare l’isotopo più usato come orologio cosmico, è il ^{10}Be che ha una vita media di $3.9 \cdot 10^6$ anni

RADIOACTIVE CLOCKS MEASURE THE LIFETIME OF COSMIC RAYS IN THE GALAXY



Cosmic ray sources accelerate a wide range of 'primary' nuclei.

Interactions with interstellar matter produce 'secondaries', some of which are radioactive.

The observed abundance of radioactive nuclei (such as beryllium-10) is a measure of the cosmic ray lifetime.

I meccanismi di Accelerazione dei Raggi Cosmici

- Accelerazione di Fermi del secondo ordine
- Accelerazione di Fermi del primo ordine
- Meccanismi elettromagnetici

Il meccanismo di Fermi

da T.K. Gaisser: *Cosmic Rays and Particle Physics* - Cambridge (1990)

- Consideriamo un processo per cui una particella carica che "incontri" un plasma magnetizzato guadagni energia secondo la relazione:

$$\Delta E = \xi E$$

- Dopo n "incontri" :

$$E_n = E_o (1 + \xi)^n$$

- Probabilità di fuga dalla zona di accelerazione: P_{esc}

Meccanismo di Fermi (continuazione)

- La probabilità di restare nella regione di accelerazione dopo n processi di incontro è

$$(1 + P_{osc})^n$$

- Il numero di "incontri" necessari per raggiungere l'energia E è :

$$n_0 = \frac{\ln(E / E_o)}{\ln(1 + \xi)}$$

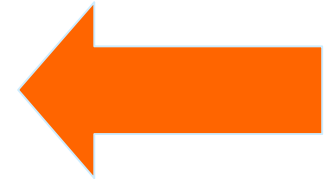
Meccanismo di Fermi (continuazione)

- Quindi la frazione di particelle accelerate ad un'energia maggiore di E sarà

$$N (\geq E) \propto \sum_{m=n_0}^{\infty} (1 - P_{esc})^m = \frac{(1 - P_{esc})^{n_0}}{P_{esc}}$$

- Sostituendo il valore di n_0 si ha :

$$N (\geq E) \propto \frac{1}{P_{esc}} \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma}$$



- Dove

$$\gamma = \ln \left(\frac{1}{1 - P_{esc}} \right) / \ln(1 + \xi) \approx \frac{P_{esc}}{\xi} = \frac{1}{\xi} \cdot \frac{T_{cycle}}{T_{esc}}$$

Dove T_{cycle} è il tempo caratteristico per il ciclo di accelerazione
e T_{esc} è il tempo caratteristico di fuga dalla regione di accelerazione

Una particella carica di energia E_1 entra nella nube di plasma e viene diffusa elasticamente dal campo magnetico irregolare ivi presente.

Dopo alcune interazioni il moto medio della particella coincide con quello della nube. Nel sistema di riferimento del gas l'energia della particella ($m=0$) è:

$$E_1^* = \gamma E_1 (1 - \beta \cos \theta_1)$$

Il γ e β si riferiscono al moto della nube di gas rispetto al laboratorio.

Essendo tutti gli urti elastici, per l'energia finale della particella nel S.R. della nube varrà $E_2^* = E_1^*$

Trasformando dal S.R. della nube a quello del laboratorio

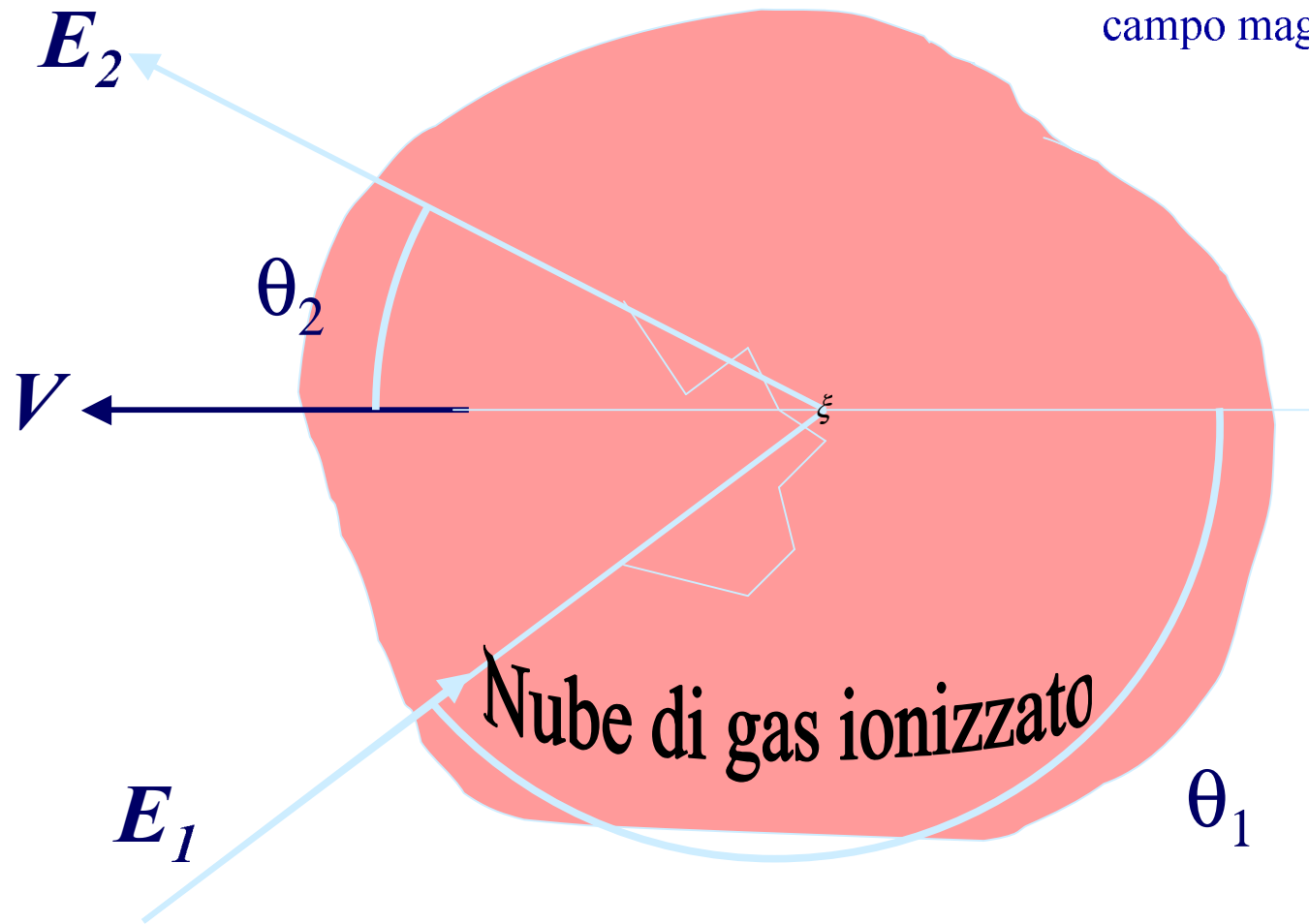
$$E_2 = \gamma E_2^* (1 + \beta \cos \theta_2)$$

Sostituendo otteniamo la variazione percentuale di energia

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{1 - \beta \cos \theta_1 + \beta \cos \theta_2 - \beta^2 \cos \theta_1 \cos \theta_2}{(1 - \beta^2)} - 1$$

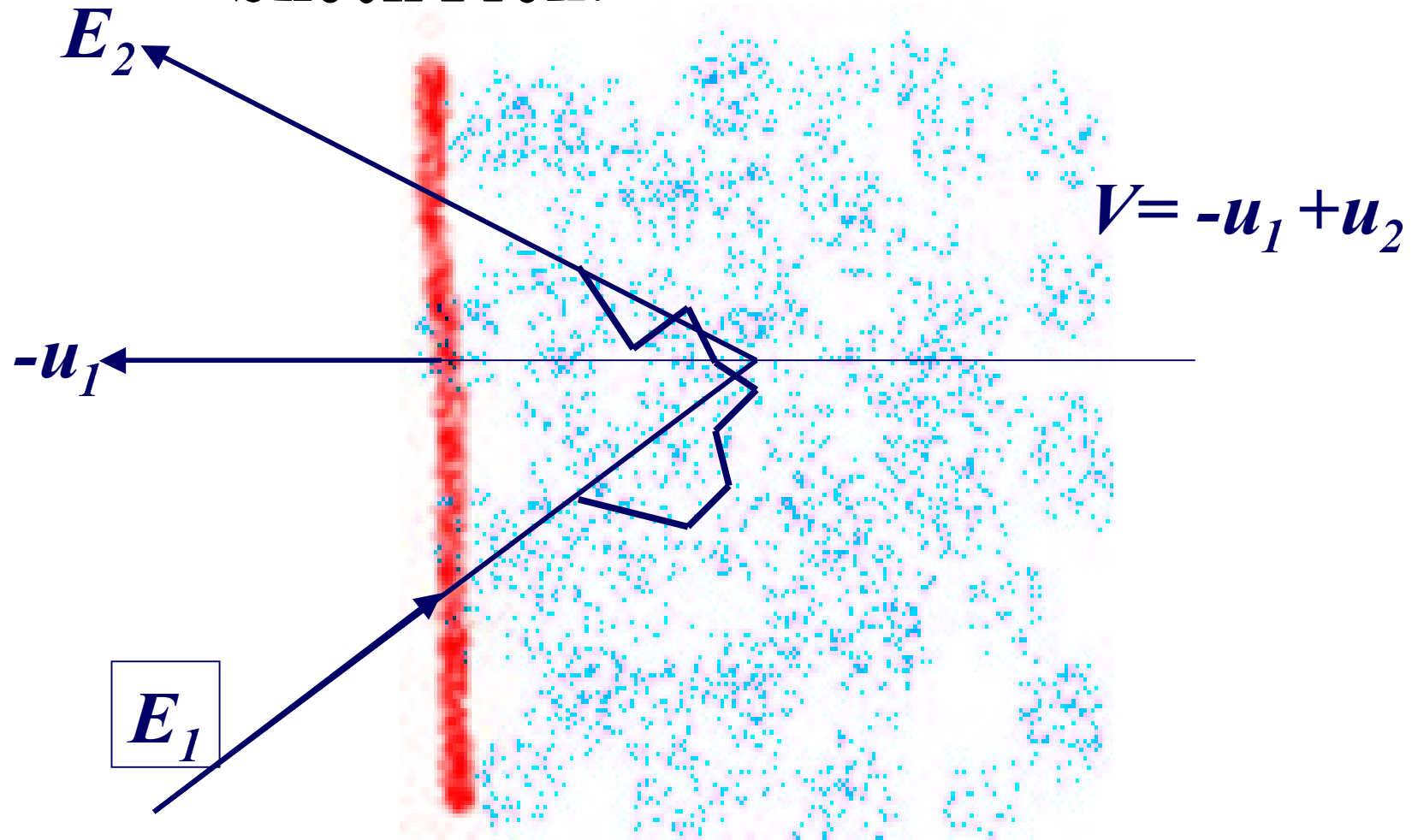
Accelerazione di Fermi del secondo ordine

Diffusioni elastiche con il campo magnetico

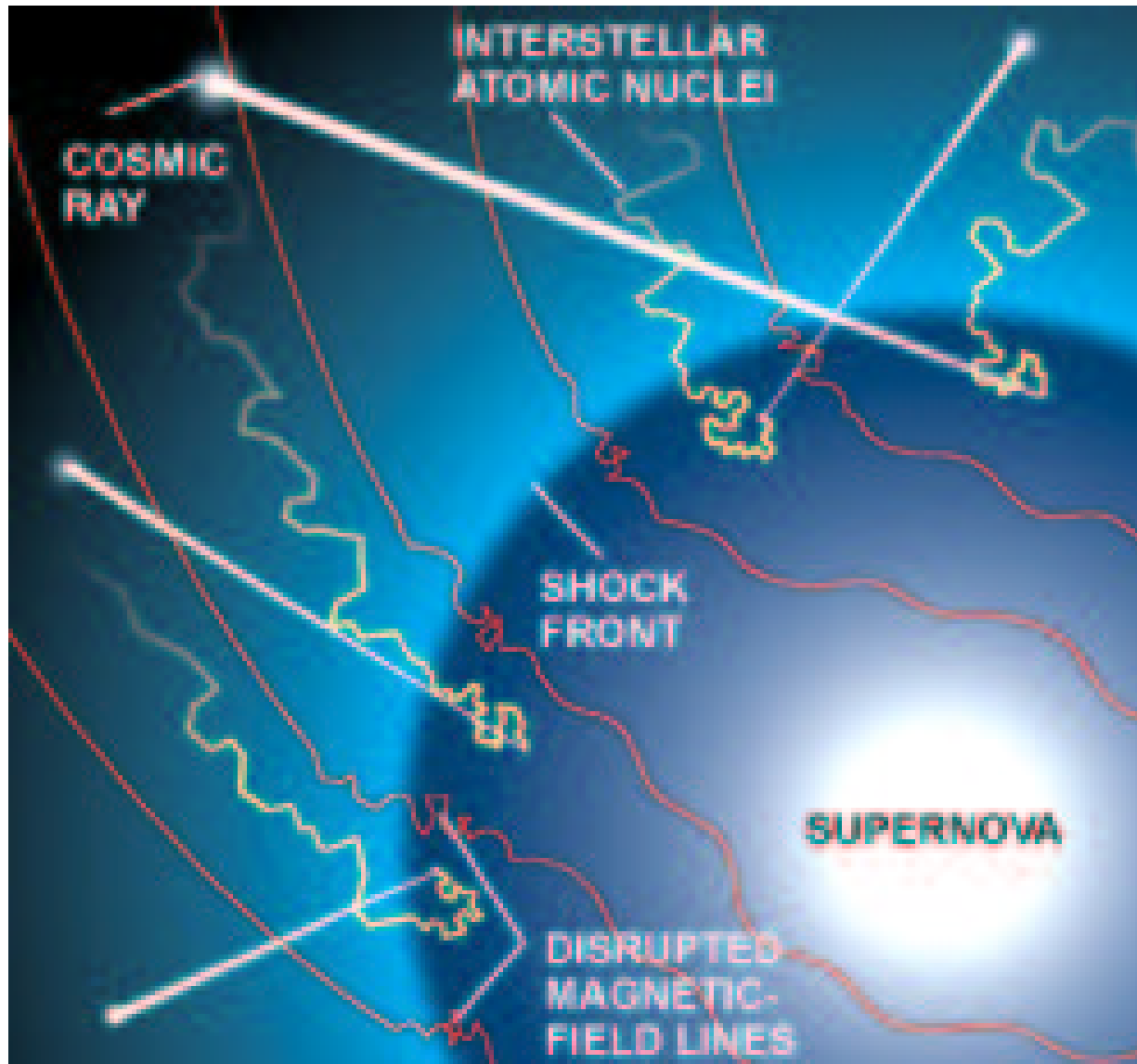


Accelerazione di Fermi del primo ordine

Shock Front



Meccanismo di accelerazione del primo ordine di Fermi



Distribuzioni angolare dei secondari

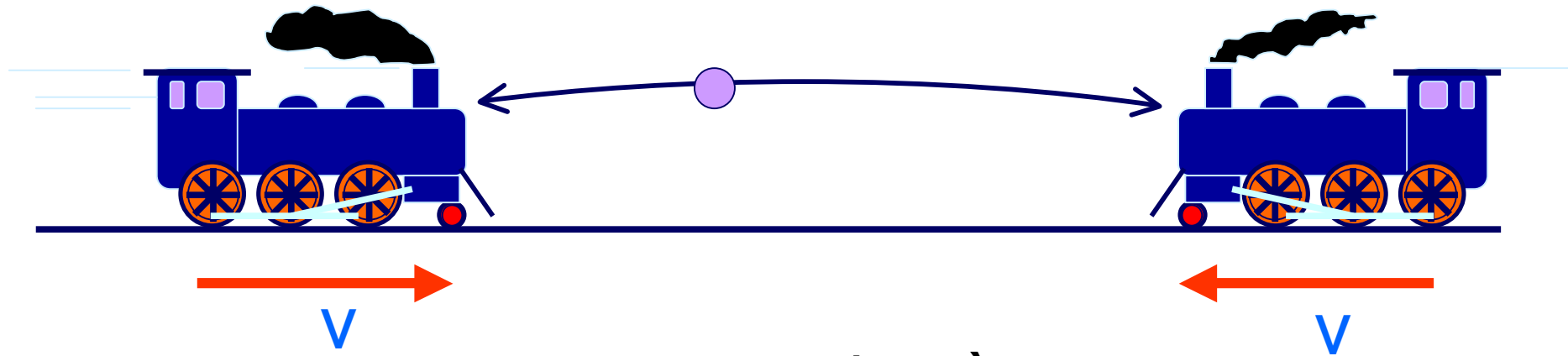
$$a) \frac{dn}{d \cos \theta_2} = \text{const.} \quad \text{secondo ordine}$$

$$b) \frac{dn}{d \cos \theta_2} = 2 \cos \theta_2 \quad \text{primo ordine}$$

$$a) \frac{\Delta E}{E} \approx \frac{4}{3} \beta^2 \quad \text{secondo ordine}$$

$$b) \frac{\Delta E}{E} \approx \frac{4}{3} \beta \quad \text{primo ordine}$$

Un modello giocattolo per il meccanismo di Fermi



Urto n.	Velocità nel lab.
0	0
1	+2V
2	-6v
3	+14v
....	

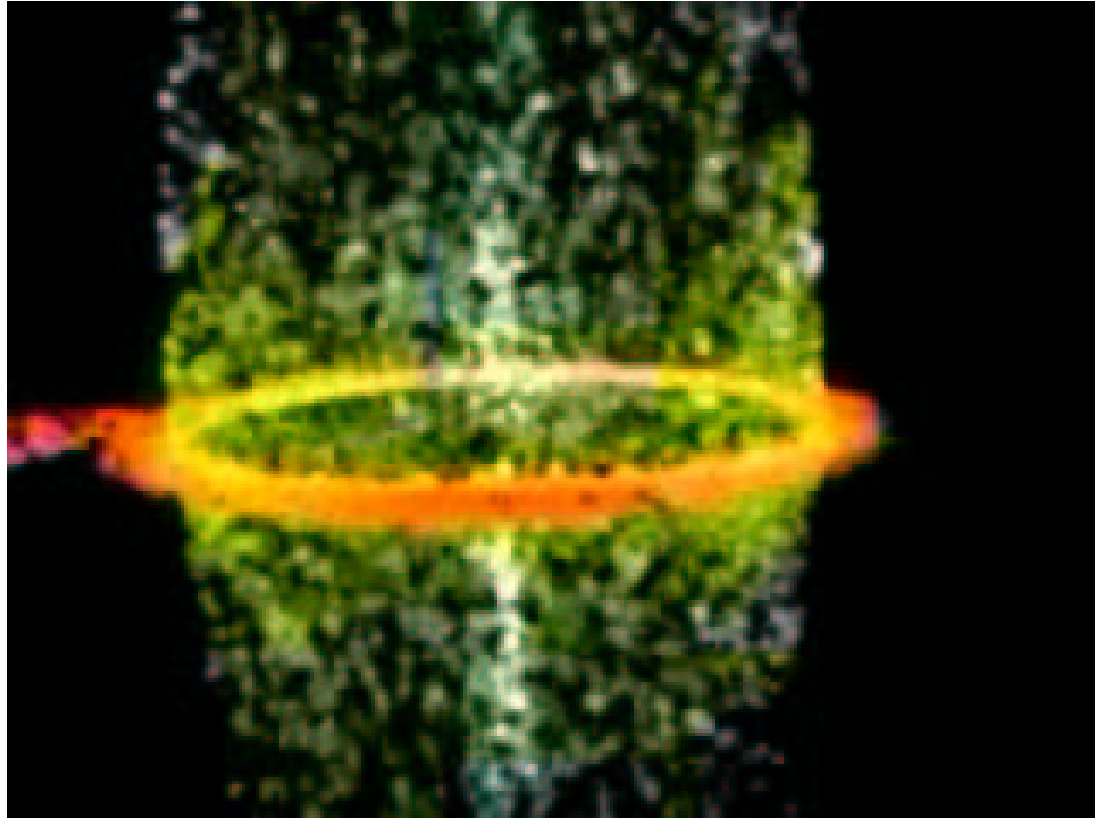
Accelerazione > 100 TeV

Anche sorgenti puntiformi

- ⬇ alti campi magnetici
- ⬇ Stelle di Neutroni

Es.: Stella $1M_{\text{solare}}$, Periodo di rotazione $P=P_{10} \times 10$ ms, Raggio di 10^6 cm ha una energia di rotazione $\approx 2 \times 10^{50} \text{ erg}/P_{10}^2$

Altra sorgente di potenza per l'accelerazione dei R.C. è il rilascio dell'energia gravitazionale legata ad un sistema binario con una stella di neutroni

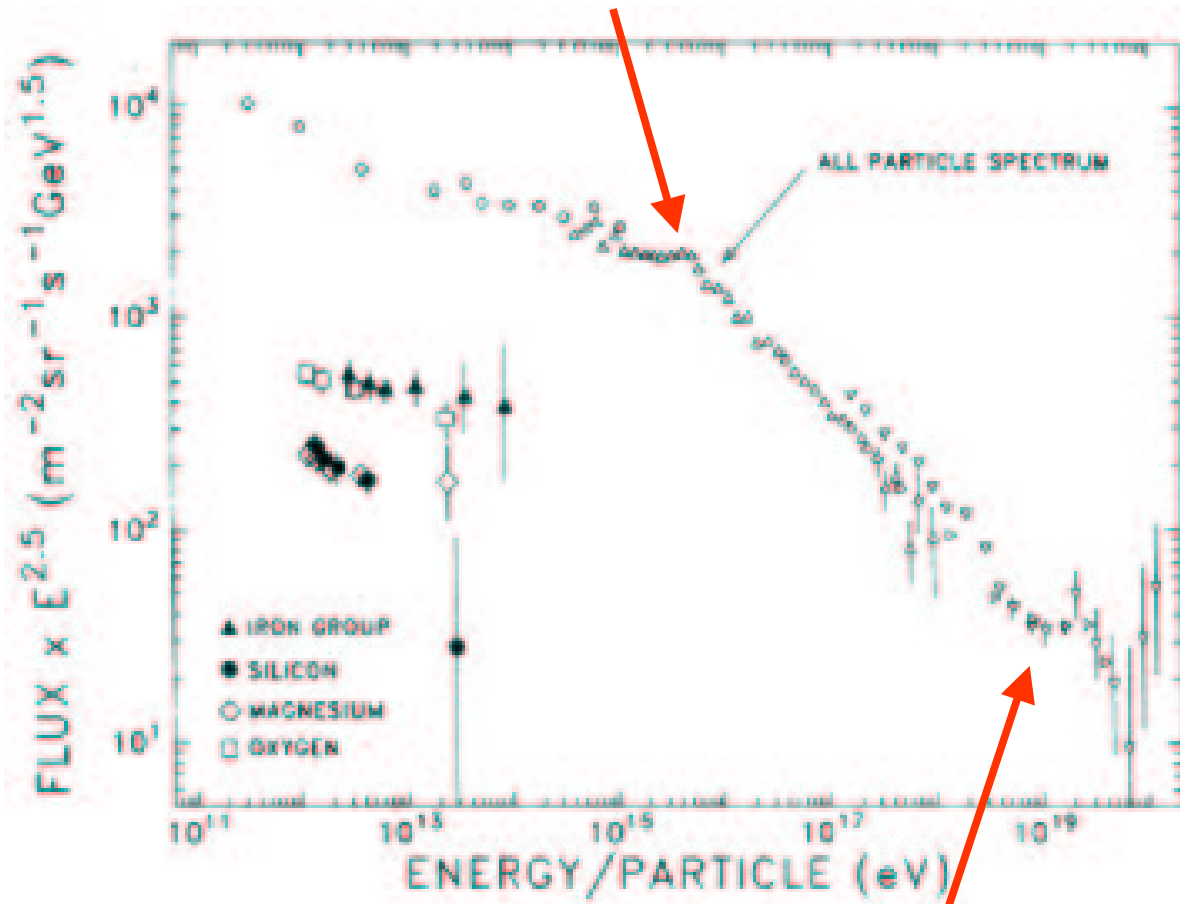


Stato della ricerca attuale sui raggi cosmici

- Ricerca sui RC di energia estremamente elevata $>10^{20}$ eV (oltre la caviglia) tagli GZK (?)
 - AGASA
 - HIRES
 - Haverá Park

- Spettro e composizione dei RC nella regione del ginocchio $10^{15}10^{16}$ eV
 - Cascade
 - Eastop
 - Tibet (As- γ)
 - Dice (Cerenkov)

ginocchio



caviglia

AGASA



AGASA copre un'area di circa 100 km^2 e consiste di 111 rivelatori a scintillazione posti a terra (surface detectors) e 27 rivelatori sotto un assorbitore (muon detectors).

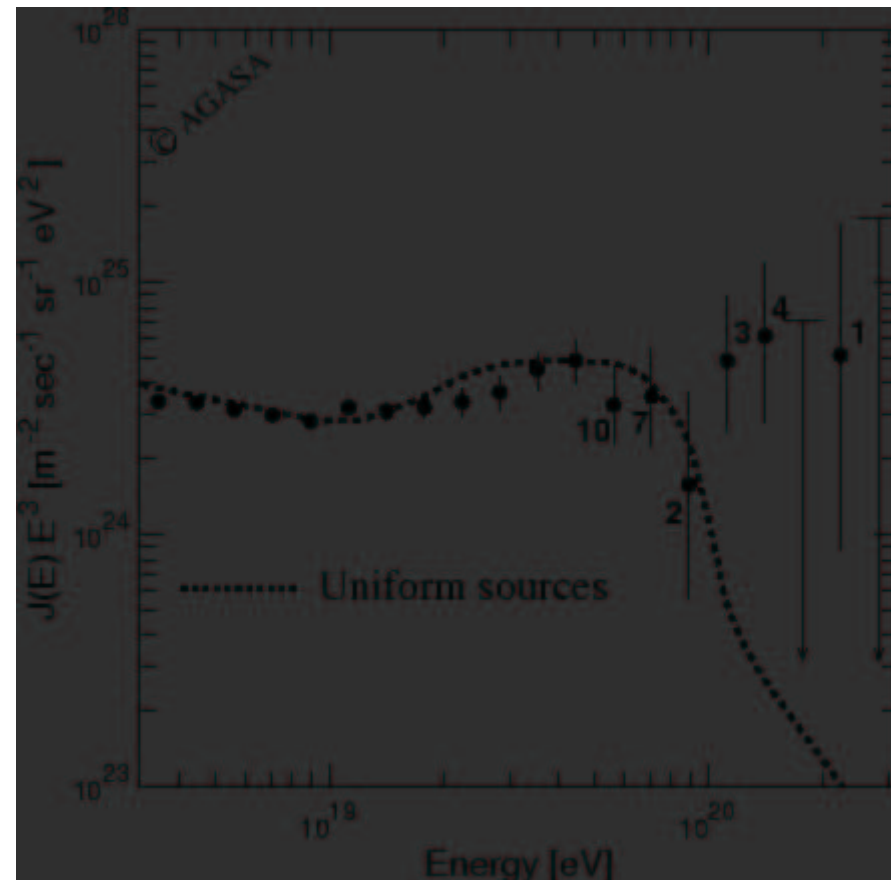
Ogni rivelatore di superficie è posto a circa 1 km dal primo vicino e i rivelatori sono connessi tramite fibre ottiche.

AGASA Results

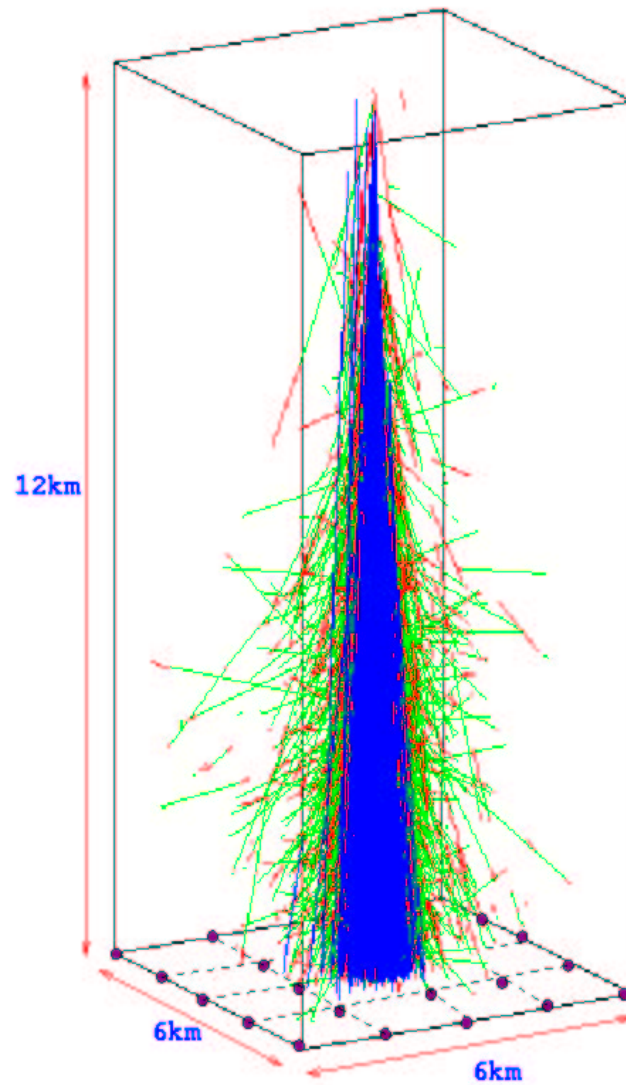
The dashed curve represents the spectrum expected for extragalactic sources distributed uniformly in the Universe, taking account of the energy determination error.

GZK cut ?

Greisen-Zatsepin-K'uzmin (**GZK** cut-off predicted at $\sim 6 \times 10^{19}$ eV, which results from photo-pion production in collisions with the cosmic background microwave photons.



A 10 EeV Extensive Air Shower (EAS)

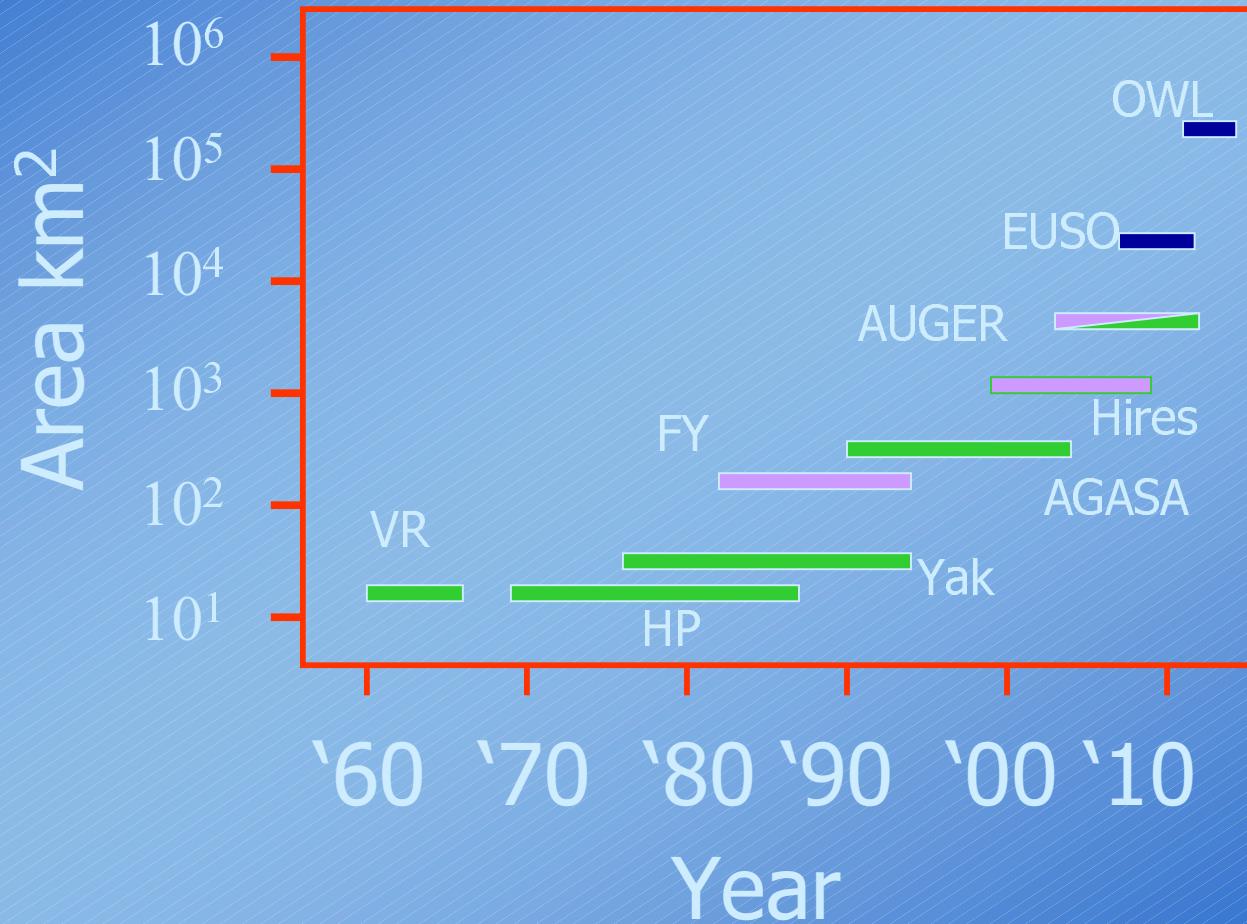


100 billion particles at sea level

photons, electrons (99%), muons (1%)

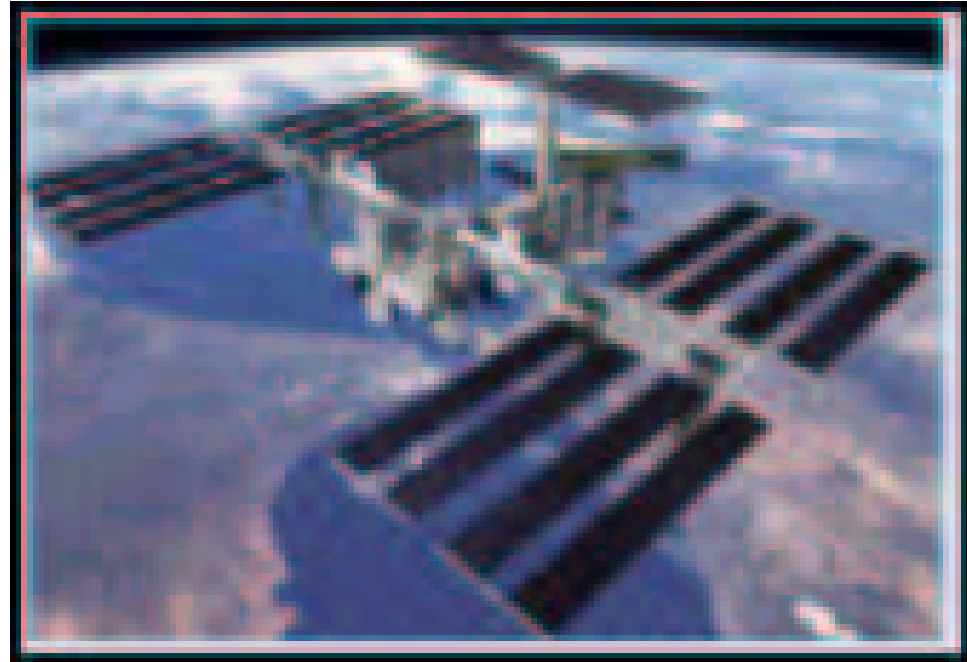
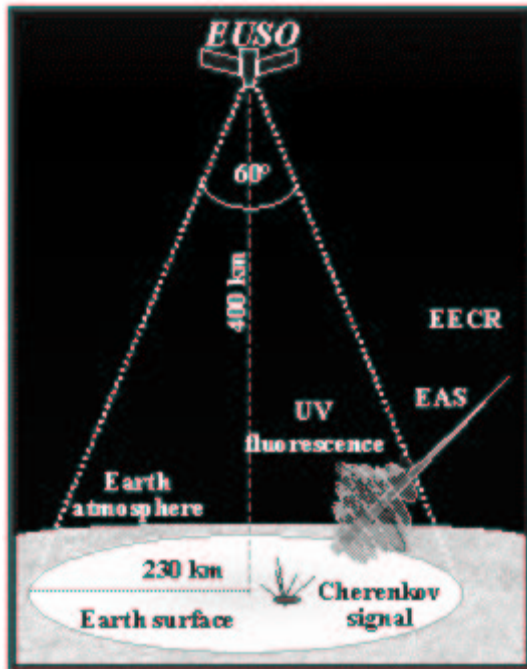
● Ground Array stations

Detectors for UHECR



EUSO

Extreme Universe Space Observatory - "



EUSO , is a space mission devoted to the investigation of cosmic rays and neutrinos of extreme energy ($E > 5 \times 10^{19}$ eV) by looking at the streak of fluorescence light produced when the particles interact with the Earth's atmosphere.

EUSO will observe the fluorescence signal looking downward from Space the dark Earth's atmosphere under a 60° full field-of-view. Fluorescence light will be imaged by a large Fresnel lens optics onto a finely segmented focal plane detector. The segmentation and the time resolution will allow to reconstruct the shower arrival direction and energy with high precision.

The OWL Concept



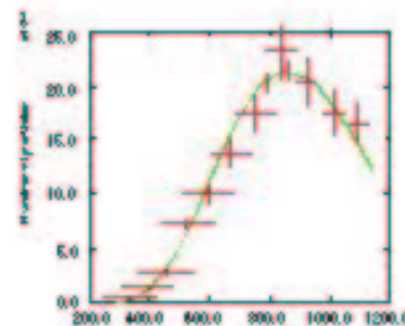
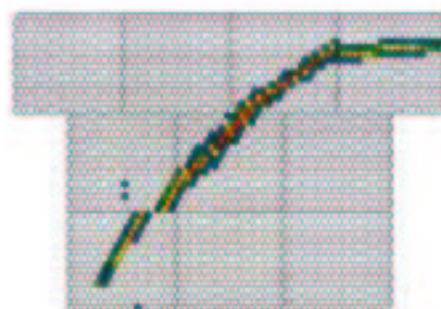
Use air fluorescence technique to image 300 → 400 nm photons in $\sim 0.1^\circ$ pixels (with 10 ns → μ s timing), from low Earth, equatorial orbit, airshowers induced by $E \gtrsim 10^{19}$ eV cosmic rays

Wide angle ($\sim 60^\circ$ full, FOV) optics at a 640 km orbit in a stereo configuration → an asymptotic, *instantaneous* aperture $\sim 3 \times 10^6$ km²-ster

10% duty cycle → *effective* aperture $\sim 3 \times 10^5$ km²-ster

Assuming $\Phi_{CR}(E) \sim E^{-2.75}$, the asymptotic OWL stereo aperture leads to ~ 3000 events/year with $E \gtrsim 10^{20}$ eV

OWL could be a stepping stone to viewing majority of night side atmosphere



OWL

Conclusioni sulla fisica dei raggi cosmici

- Risultati molto interessanti nella regione UHECR (anche se attualmente controversi)
- Si aspettano nuovi e più giganteschi rivelatori (AUGER, EUSO, OWL) per misurare la parte di alta energia dello spettro