



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
SEZIONE DI ROMA TOR VERGATA

La Fisica dei Raggi Cosmici e l'astrofisica multi-messaggera

G. Di Sciascio

INFN - Sezione Roma Tor Vergata

disciascio@roma2.infn.it

Osservare la Natura

La fisica (dal greco φύσις = natura) è la scienza che *'osserva' la Natura* per studiarne i fenomeni, al fine di descriverli misurandone le proprietà (o grandezze) e stabilendo tra queste delle relazioni matematiche (leggi).

Per raggiungere questo scopo, la fisica si avvale di un metodo di indagine detto metodo sperimentale, cioè basato sull'esperimento riproducibile.

Che cosa vuol dire *“guardare”*?

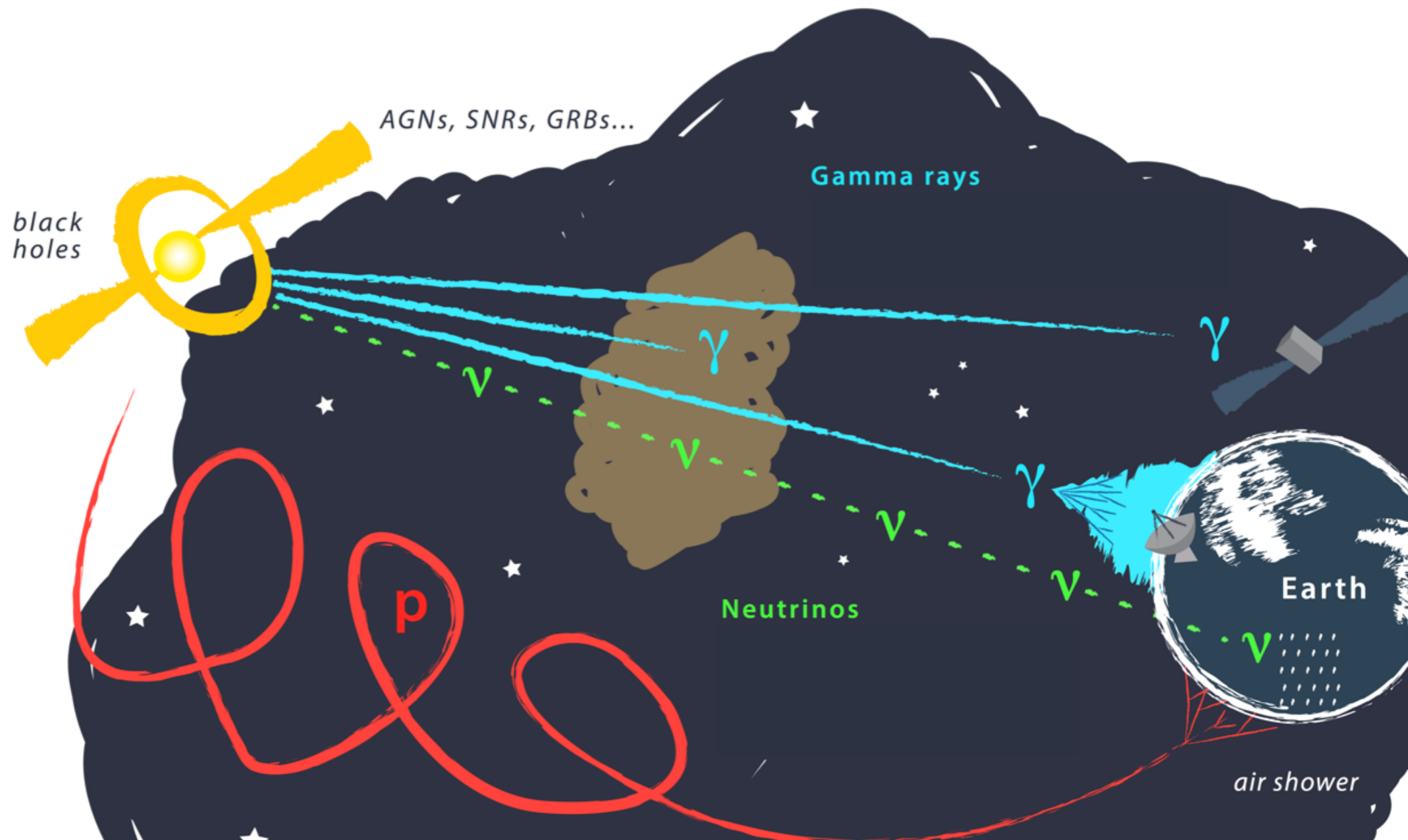
“Guardare” con

- *Fotoni* Sono la base dell'astronomia
- *Raggi Cosmici* Uno dei principali componenti della nostra Galassia
- *Neutrini* Prodotti nelle esplosioni stellari
- *Onde Gravitazionali* Appena osservate!!!

L'astrofisica multi-messaggera

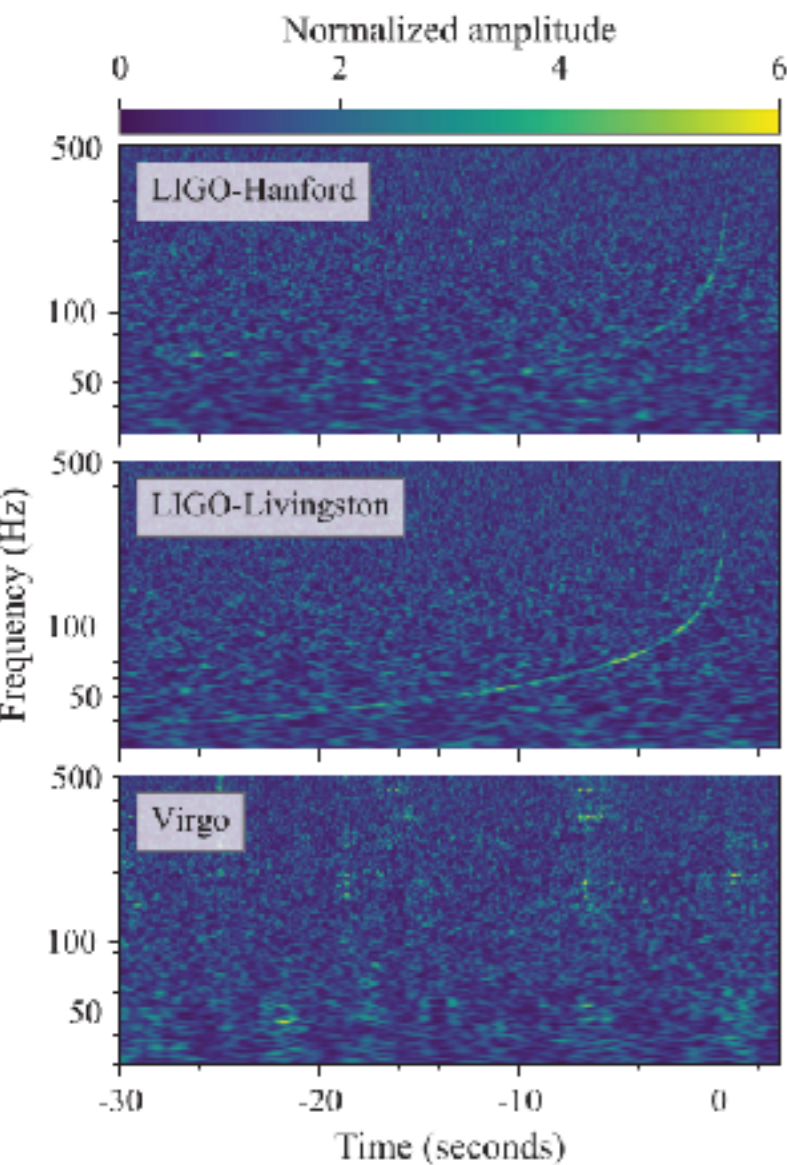
Per comprendere a fondo l'Universo bisogna saper rivelare contemporaneamente i diversi messaggeri!!

... ma ci vogliono anche *"occhi adatti"*



17 Agosto 2017: nasce una nuova astronomia

GW170817: coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni.



Nasce l'Astronomia Multi-Messaggera

Per la prima volta un'onda gravitazionale e' osservata in associazione ad eventi elettromagnetici da oltre 70 diversi rivelatori!!!

Questo evento costituisce la prova più forte a sostegno della tesi che vede la collisione di stelle binarie collegata ai lampi gamma corti (GRBs Short).

Osservare contemporaneamente *onde gravitazionali* ed *onde elettromagnetiche* generate dallo stesso evento e' una prova molto convincente che le onde gravitazionali viaggiano alla velocità della luce.

La nascita dell'astronomia multi-messaggera

12:41:04 UTC

Il 17 agosto 2017 viene rivelata un'onda gravitazionale (**GW170817**) dalla coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni avvenuta a 130 milioni di anni luce da noi, in un'area di 28 gradi quadrati nel cielo australe.

+ 2 secondi

Osservazione di un lampo di raggi gamma - **GRB170817A**

Un lampo gamma (**Gamma Ray Burst**) e' un'intensa emissione di radiazione gamma subito dopo la coalescenza

+ 10 ore e 52 minuti

Una nuova e brillante sorgente di luce visibile viene osservata sempre nell'emisfero australe, in una galassia nota come **NGC 4993** nella costellazione dell'Idra.

Il decadimento di materia ricca di neutroni genera un'emissione elettromagnetica di grande luminosita' (detta **kilonova**) producendo metalli pesanti come oro e platino.

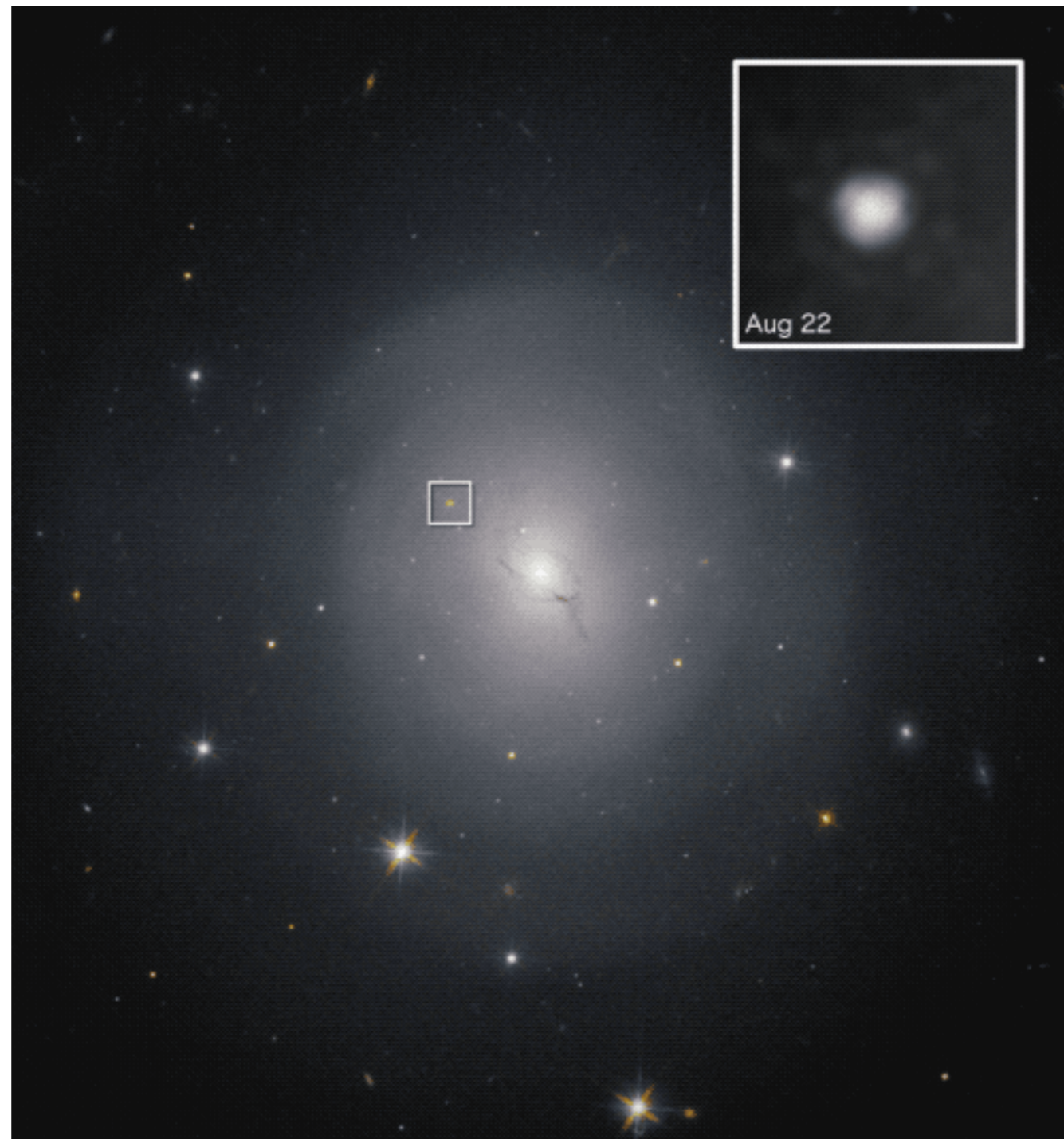
+ 11 ore e 36 minuti

Osservazione di radiazione infrarossa.

+ 9 giorni

Osservazione di raggi X.

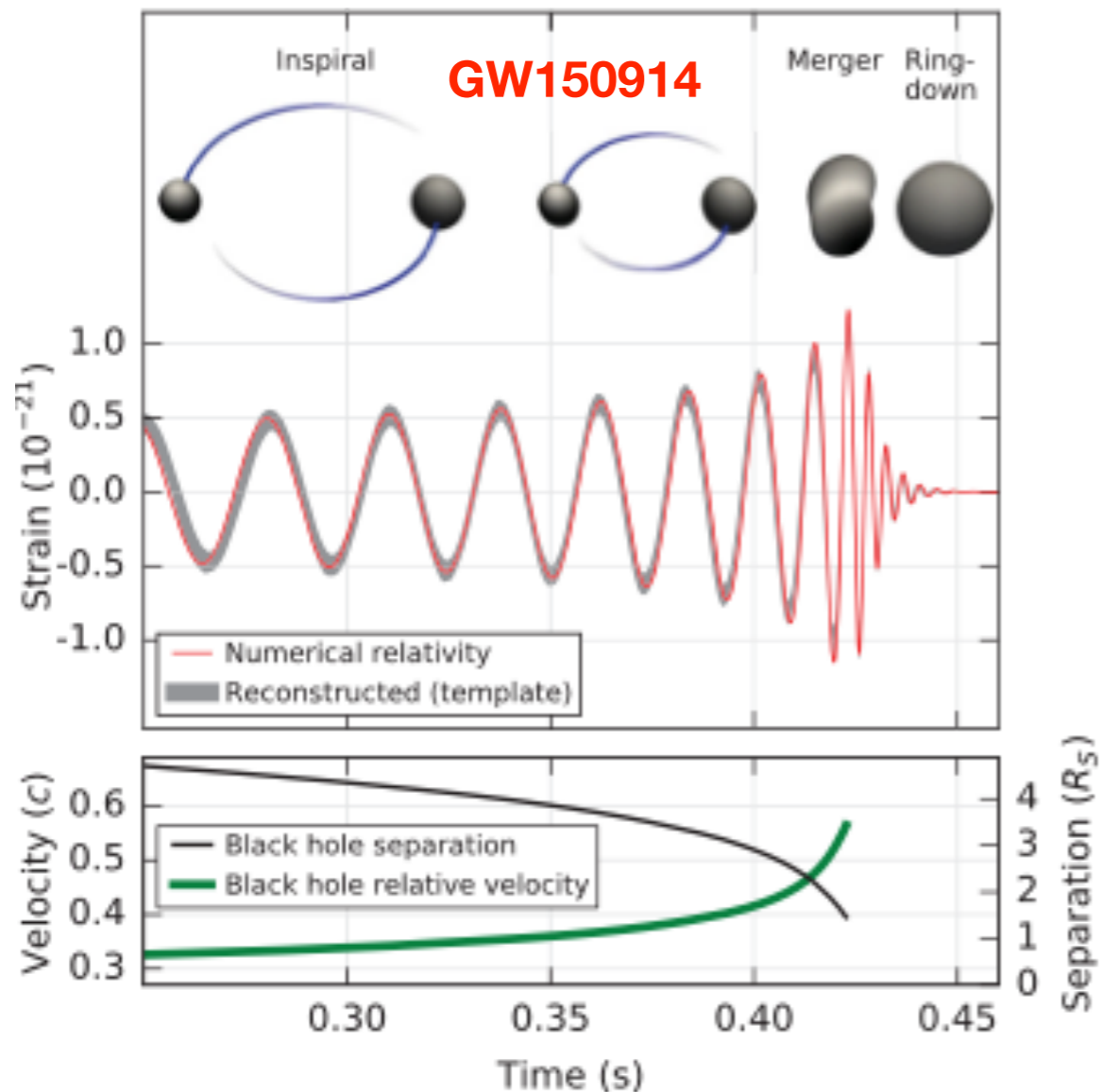
Esplosione nella galassia NGC 4993



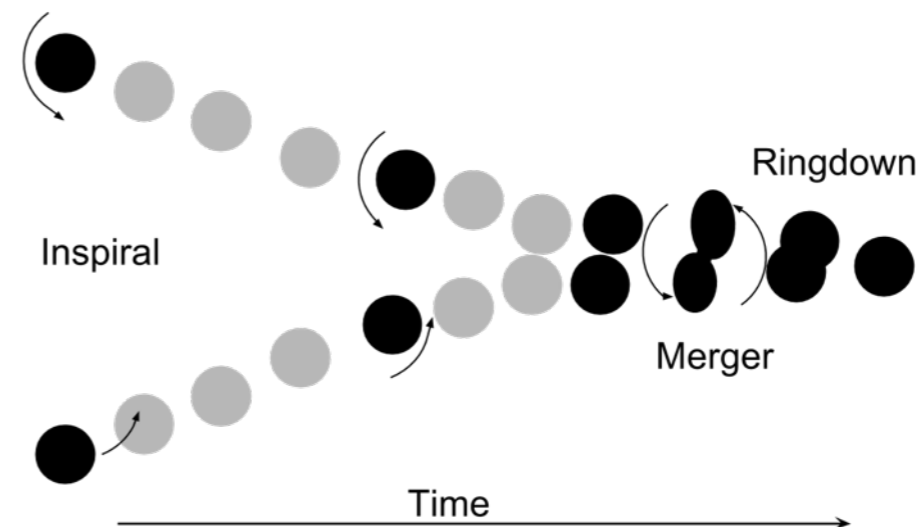
Le onde gravitazionali

L'ultimo messaggero cosmico scoperto!

LIGO-Virgo Scientific Collaboration; Phys. Rev. Lett. 116, 061102



La nascita di una nuova astronomia:
una nuova finestra sull'Universo!

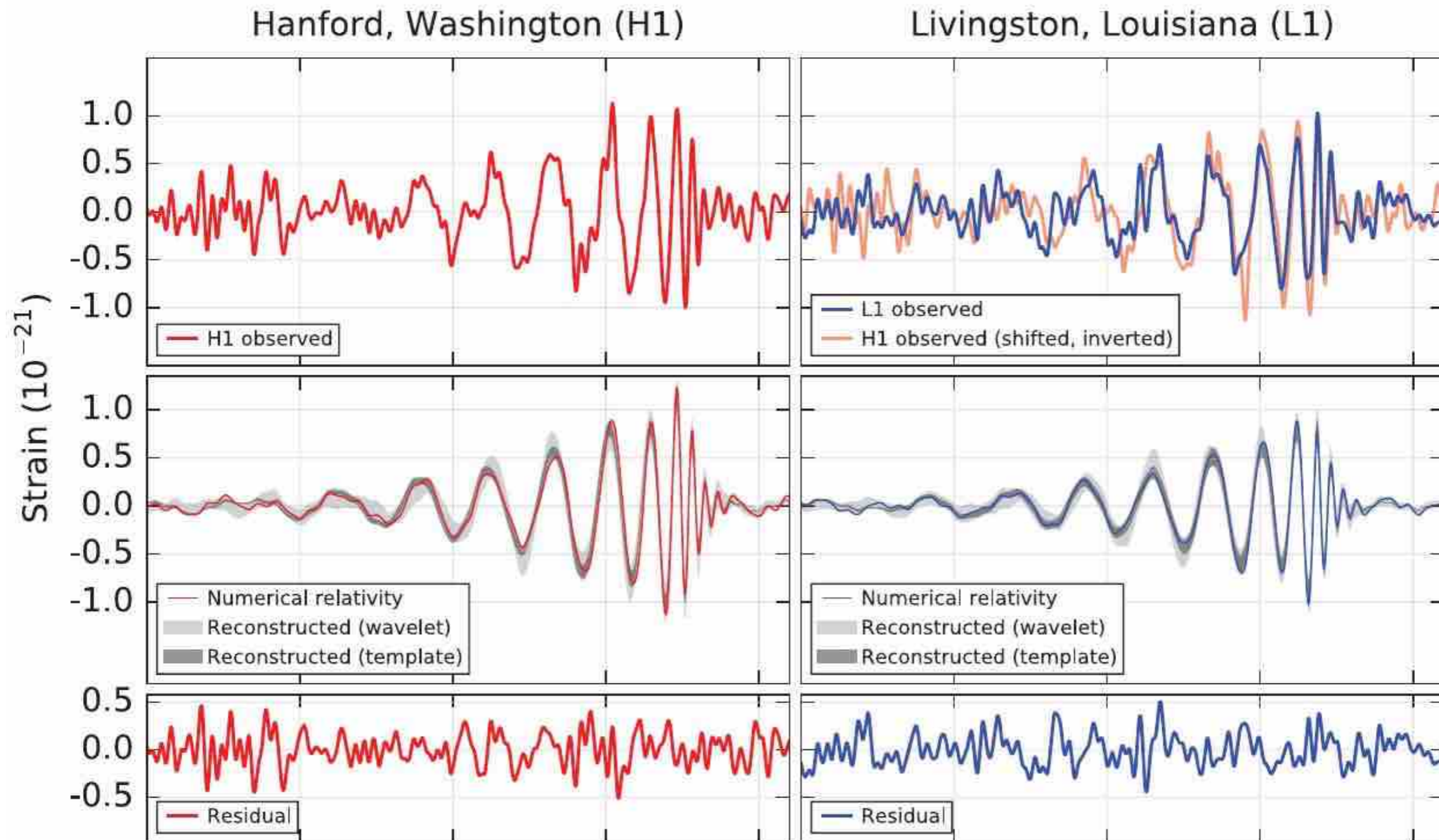


Le 3 fasi della fusione gravitazionale

$$m_T \approx 62M_{\odot} < m_1 + m_2 \approx 65M_{\odot} \Rightarrow \Delta E \approx 3M_{\odot}c^2$$

Il primo evento: GW150914

Interferometro LIGO (USA): 2 siti diversi



Equazione di Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R \cdot g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu}$$

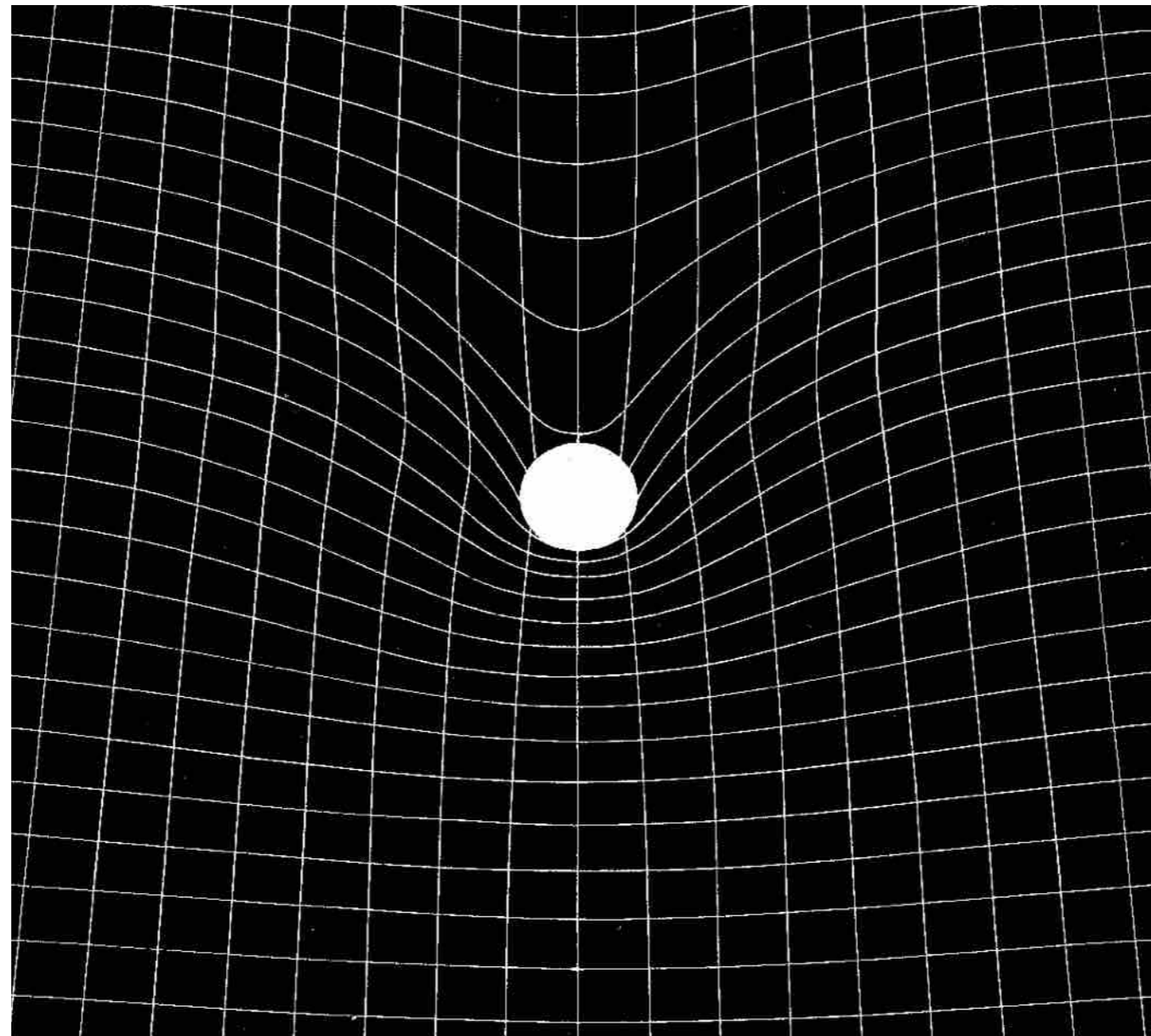
Spazio-tempo Materia

- *La materia definisce la geometria dello spazio-tempo*
 - *La geometria determina il moto della materia*
 - La distribuzione di materia ed il suo moto non possono essere descritti indipendentemente dal campo gravitazionale da essi prodotto
 - *Le onde gravitazionali sono una soluzione dell'equazione di Einstein*
 - Sono deformazioni dello spazio-tempo che *si propagano alla velocità della luce*
 - *Lo scambio d'energia tra onde gravitazionali e materia è debolissimo.*
- L'onda gravitazionale attraversa la materia senza essere significativamente attenuata.
Il Sole, la Terra ed in generale i corpi celesti sono trasparenti alle onde gravitazionali.

Lo spazio-tempo

*Lo spazio-tempo dice alla materia come muoversi;
La materia dice allo spazio-tempo come distorcersi*

J. Wheeler

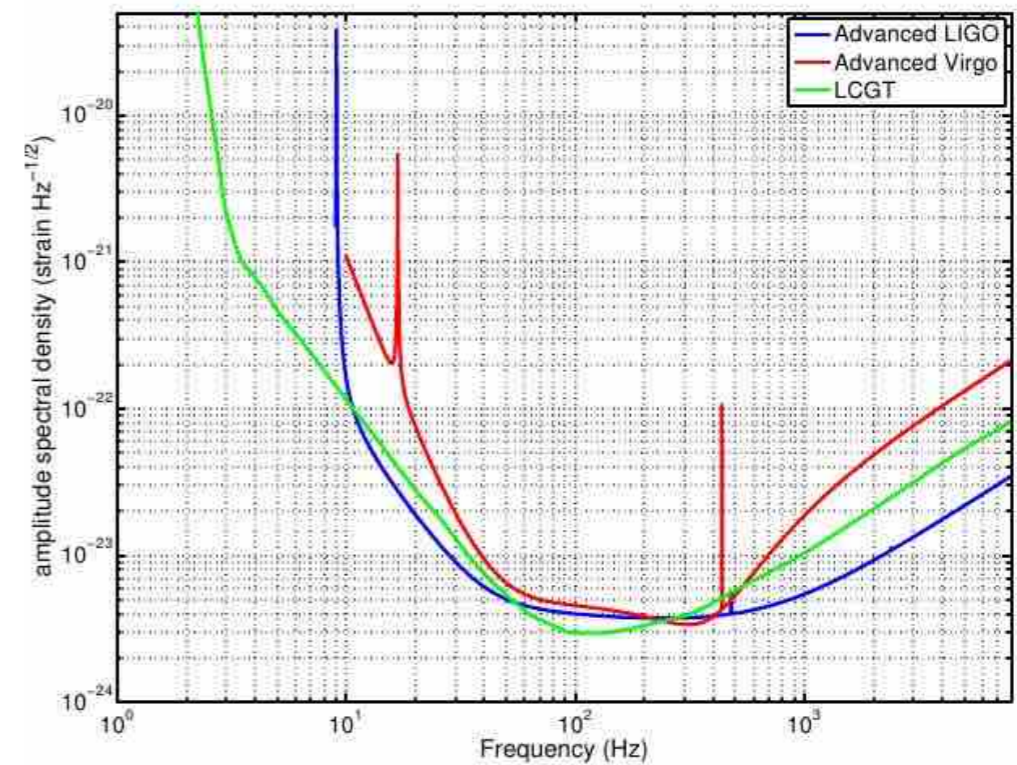


Interferometri Laser Gravitazionali



Virgo @ Cascina (PI)

Sensibilità

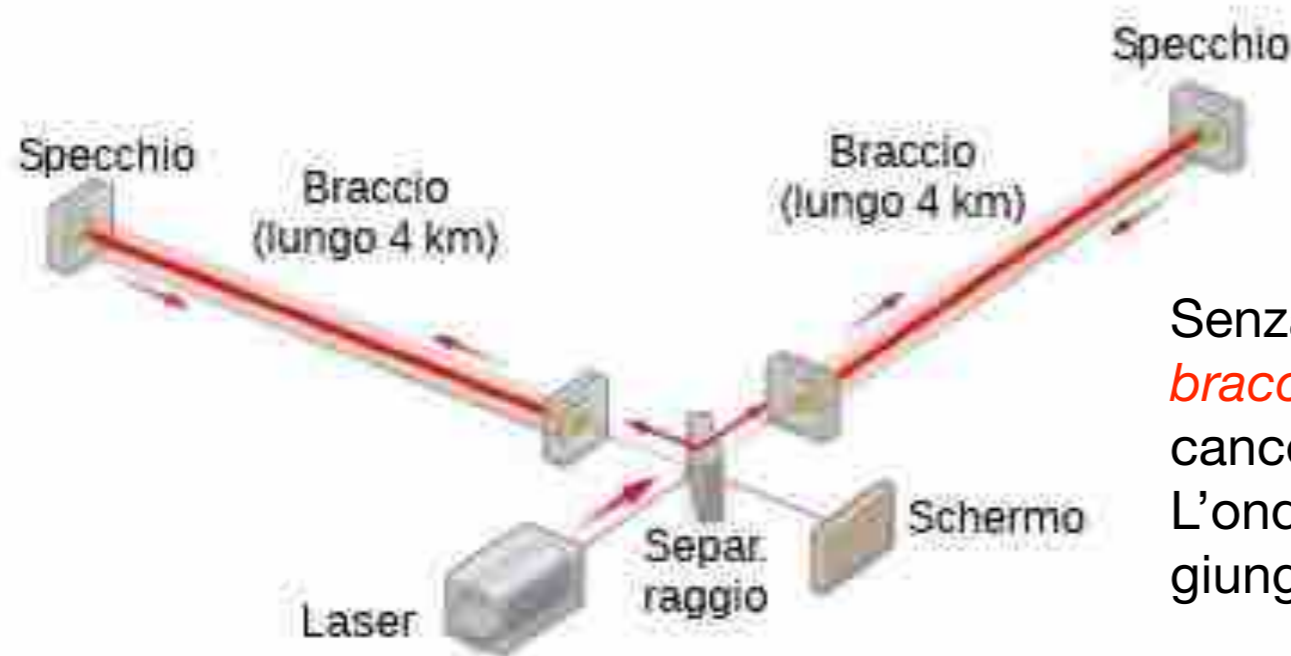


$$\delta L \sim 10^{-3} \frac{h}{10^{-21}} \frac{L}{\text{km}} \text{fm}$$

Sensibili a modifiche del raggio terrestre ~ dimensioni del protone!

Rivelazione di onde gravitazionali

Si usano gli interferometri gravitazionali



Senza onda gravitazionale, che *modifica le lunghezze dei bracci*, i segnali luminosi tornano in fase sullo schermo cancellandosi e nessun segnale luminoso e' visibile. L'onda modifica uno dei 2 bracci quindi i segnali giungono sfasati ed un segnale luminoso appare.

La 'forza' $\Delta L/L$ di una onda gravitazionale intensa e' circa 10^{-21}
Un interferometro con un braccio lungo $L = 1 \text{ km}$ per vedere l'onda
deve essere sensibile a variazioni di lunghezza $\Delta L = 10^{-18} \text{ m}$!

I neutrini

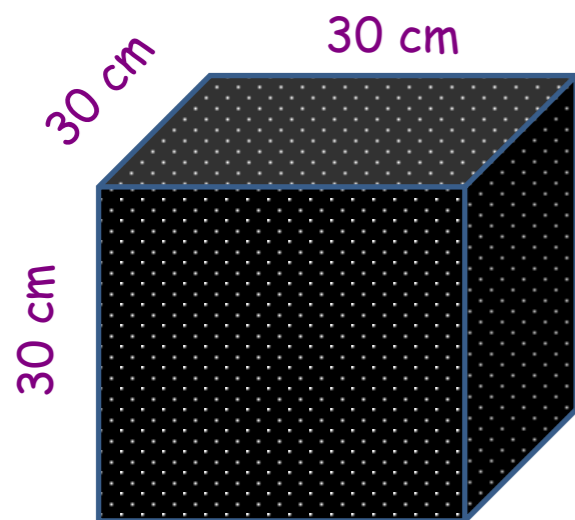
Un altro messaggero di fondamentale importanza e' rappresentato dai *neutrini*

Tutta la materia visibile è fatta da

- Protoni
- Neutroni
- Elettroni

Ma sono molto rari

Per ognuno di loro nell'Universo ci sono circa 1000,000,000 (un miliardo) di neutrini...!



In 0.03 m^3 di spazio ci sono circa 10 milioni di neutrini prodotti dal Big Bang!!!

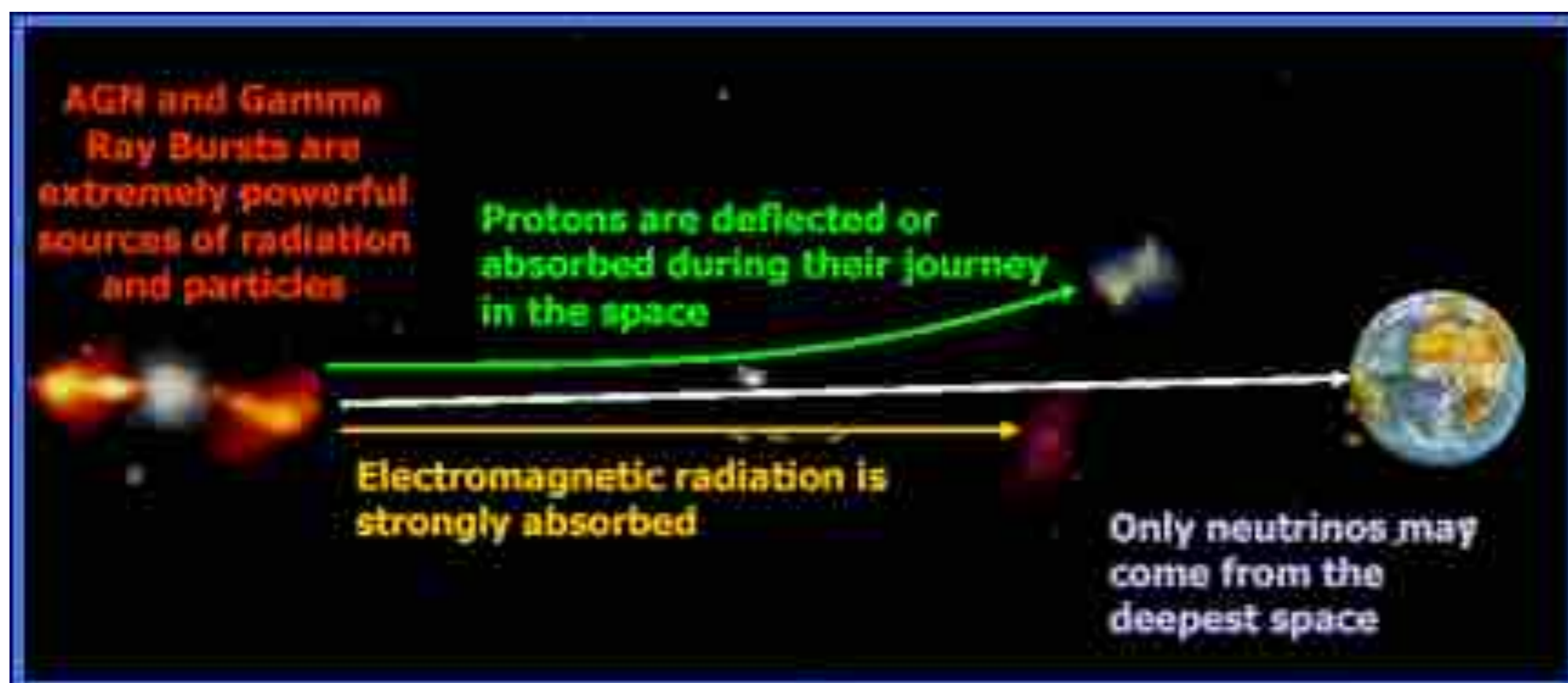
L'interazione dei neutrini

**Per fermare un neutrino sono necessari
circa 4 anni-luce equivalenti a 4×10^{13} km
(40,000,000,000,000 km) di ferro!!!**

I neutrini interagiscono in modo estremamente debole con la materia

- Molto difficili da rivelare → necessarie grandi grandi quantità di materia
- Attraversano enormi distanze perché interagiscono raramente → portano informazioni dalle regioni più profonde dell'Universo!

I neutrini astrofisici



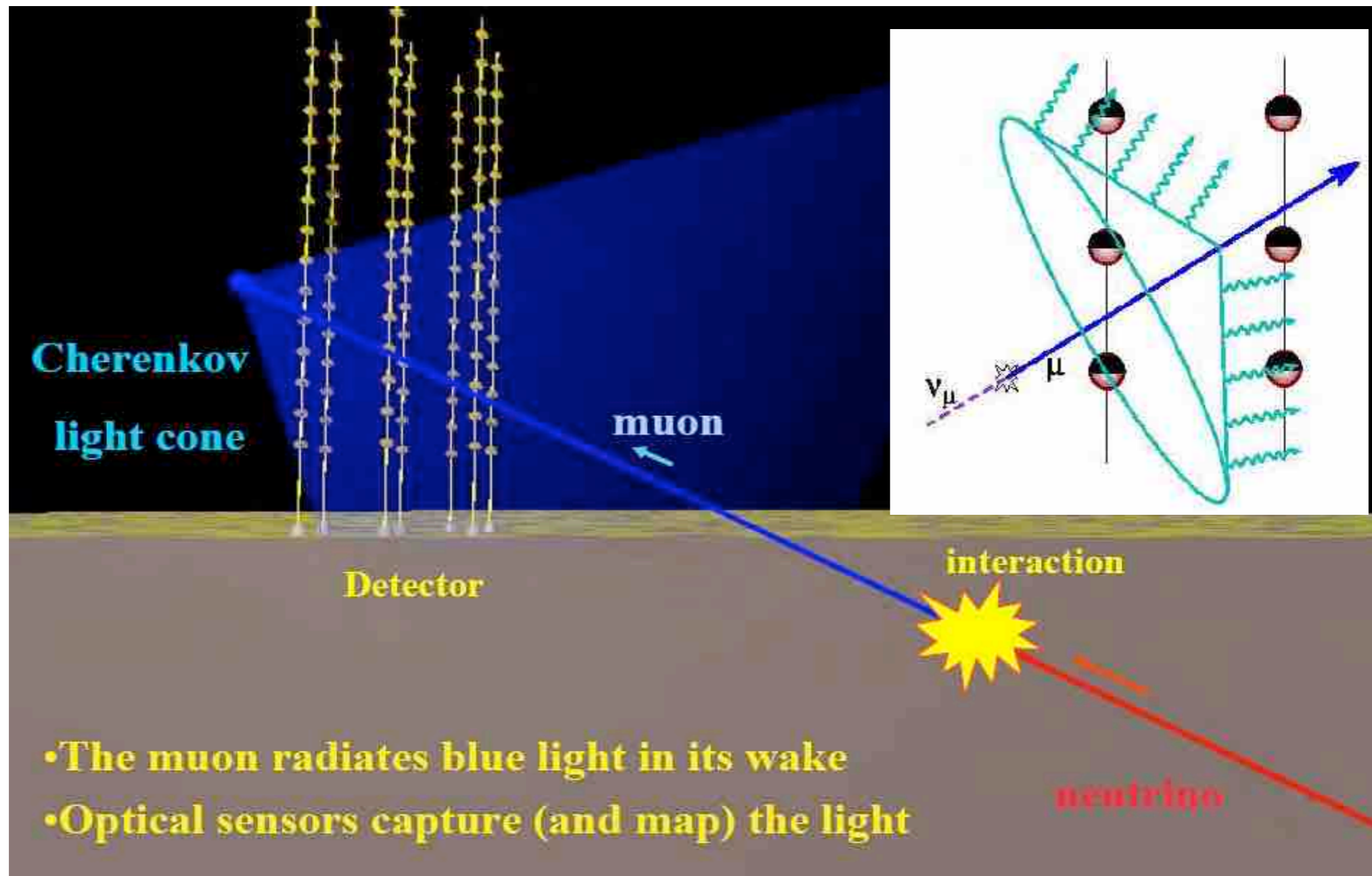
Interagendo pochissimo anche la materia più densa è trasparente ai neutrini che quindi trasportano informazioni dalle regioni più profonde dell'Universo

Perché si rivelano sfruttando acqua e/o ghiaccio ?

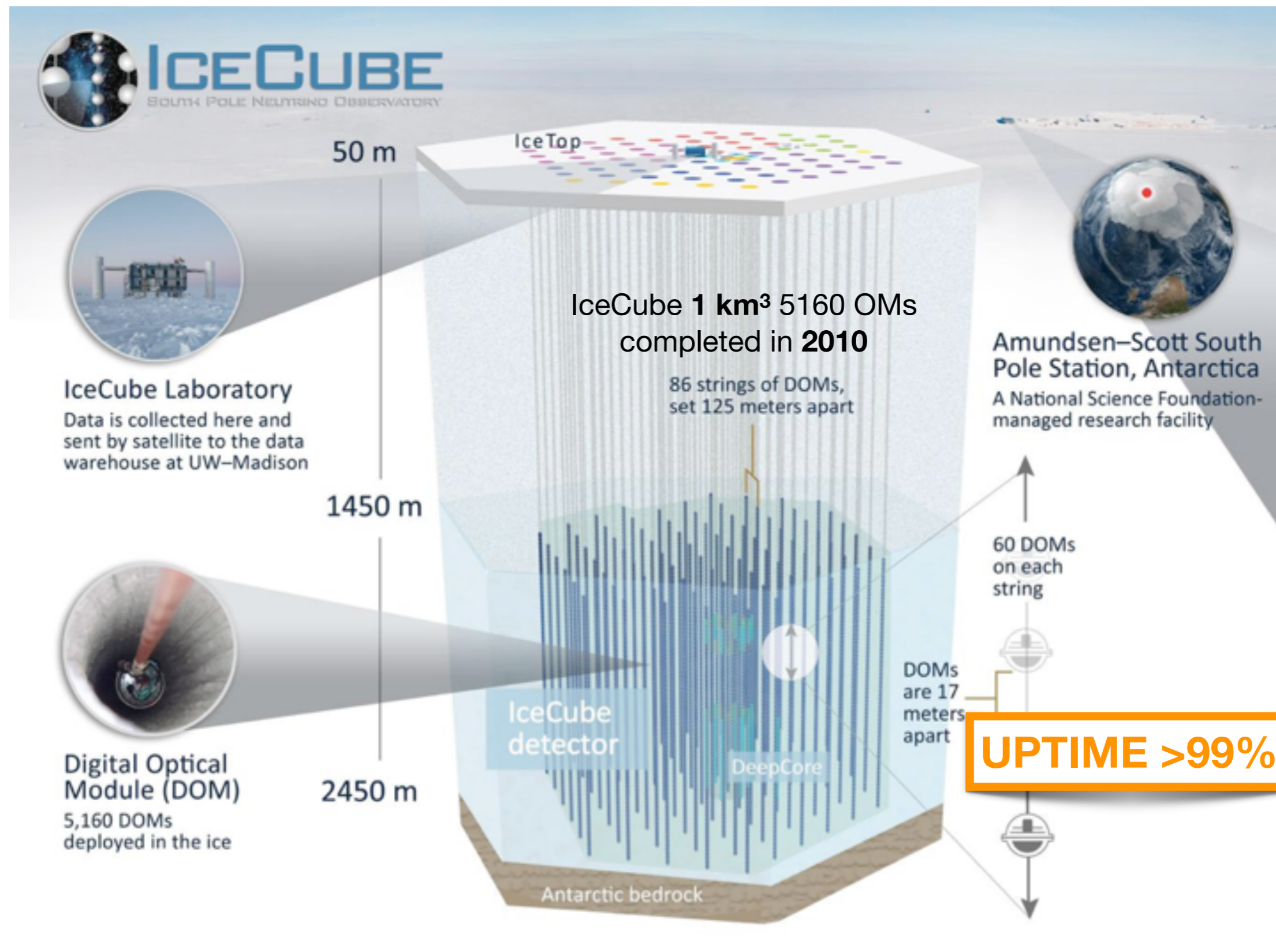
- Perché servono enormi masse ($>10^9$ t)
- L'acqua e il ghiaccio sono trasparenti alla luce Cherenkov
- Sono dei magnifici rivelatori naturali, come lo è l'atmosfera

L'idea: radiazione Cherenkov in ghiaccio/acqua

Particelle cariche con velocità superiore a quella della luce nel mezzo emettono una radiazione blu in avanti, la radiazione Cherenkov, rivelata con dei tubi fotomoltiplicatori.



IceCube: un rivelatore al Polo Sud



Prima evidenza di sorgenti di neutrini?

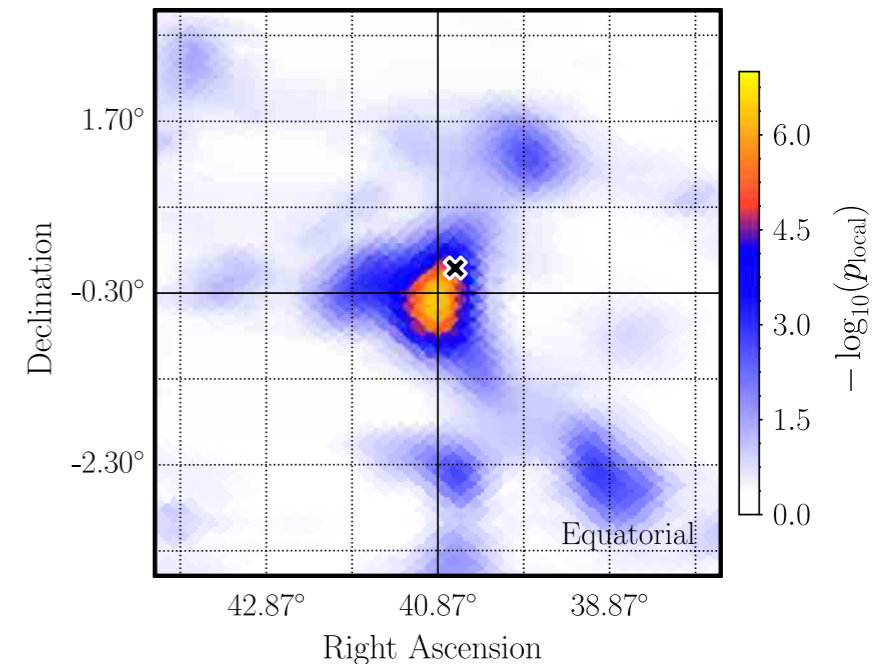
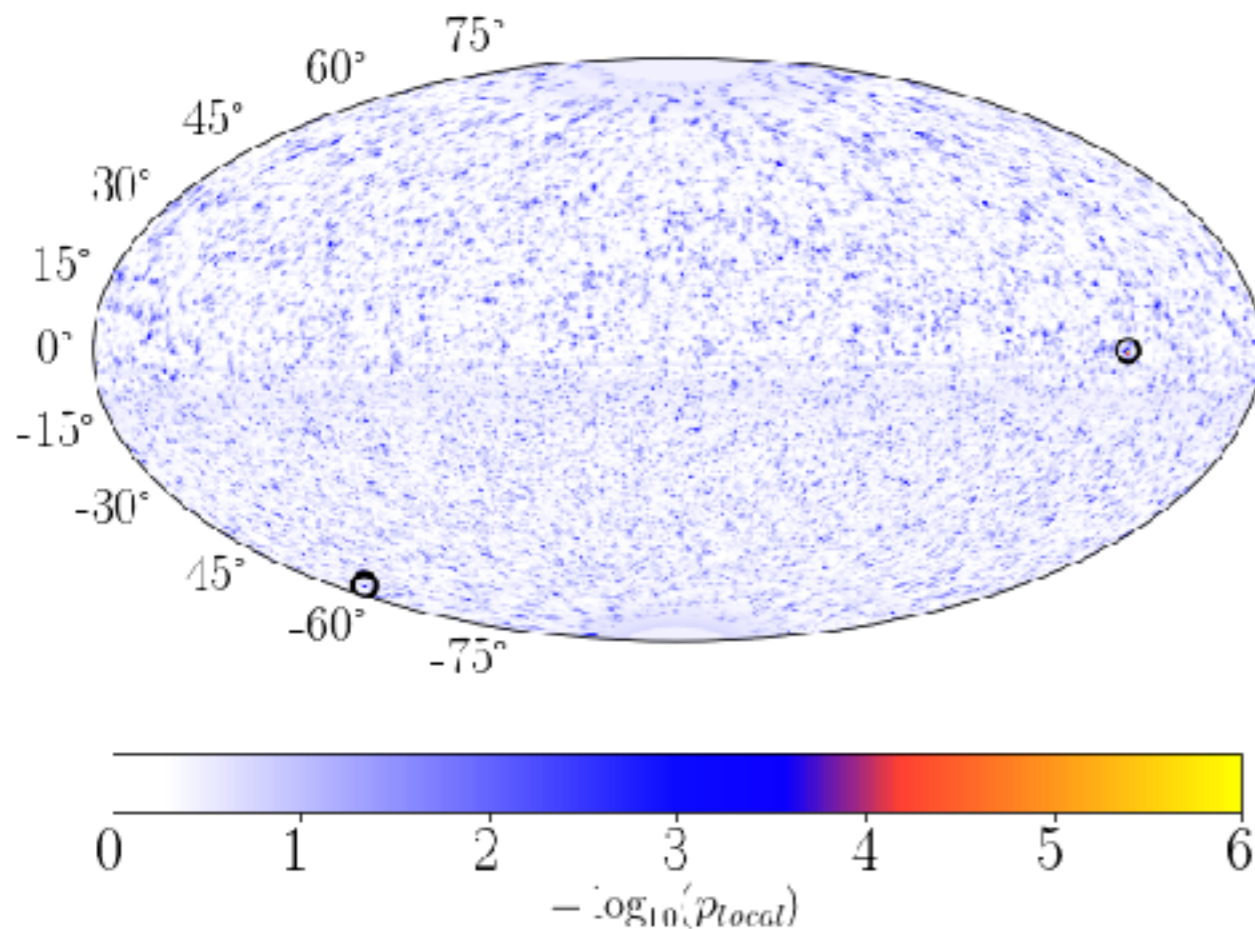
PHYSICAL REVIEW LETTERS **124**, 051103 (2020)

Editors' Suggestion

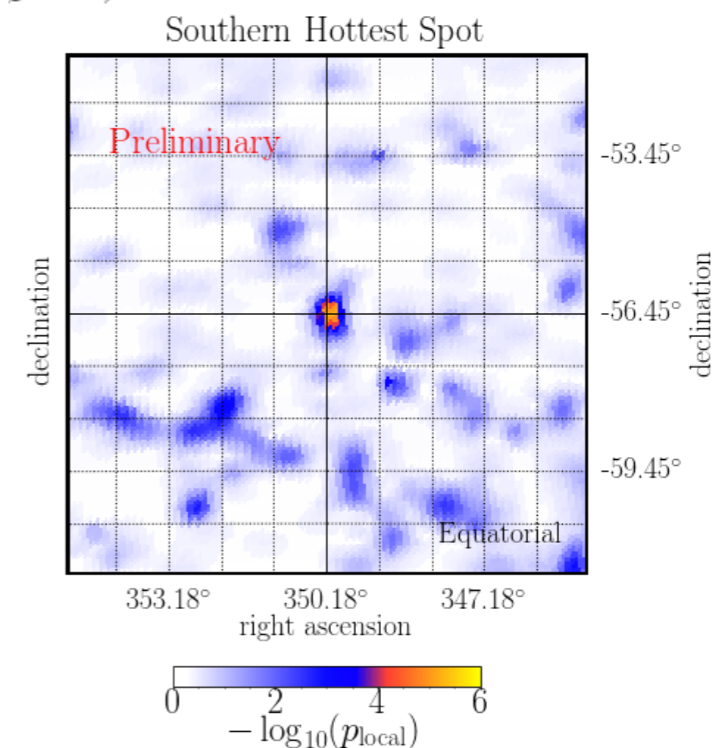
Featured in Physics

Time-Integrated Neutrino Source Searches with 10 Years of IceCube Data

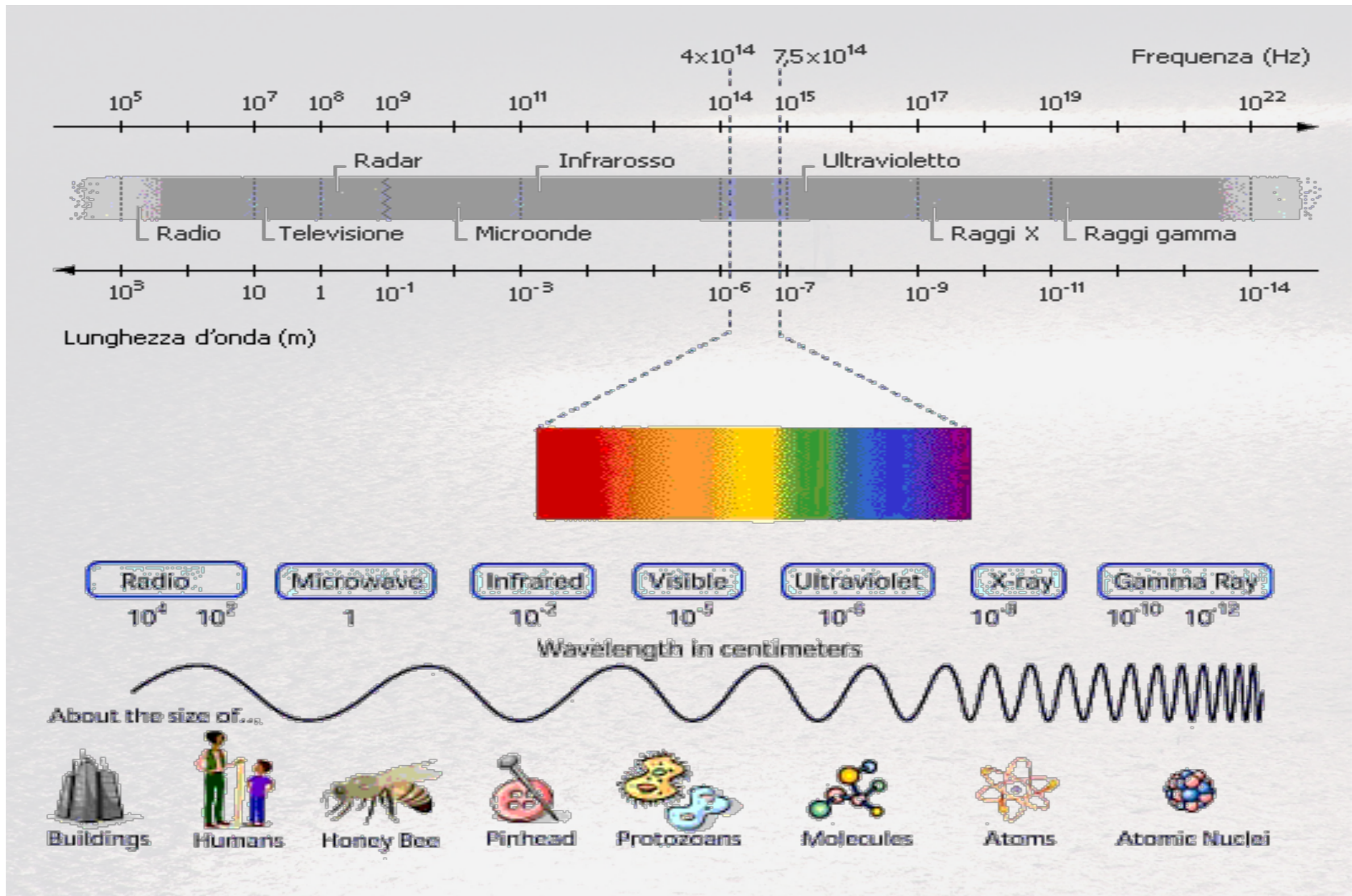
Nell'*emisfero Nord* il punto piu' significativo per una possibile emissione di neutrini e' coincidente con la galassia tipo Seyfert II denominata **NGC 1068**



Nell'*emisfero Sud* é coincidente con la galassia tipo Blazar denominata **TXS 0506+056**



Lo spettro elettromagnetico



Lo spettro elettromagnetico

Perché tanti nomi per gli “stessi” fotoni ?

- Radio, Microonde, Infrarossi, Luce, UV, X, γ

Perché *l'interazione fra fotoni e materia dipende dalla lunghezza d'onda, e la fisica coinvolta è molto diversa*

Storicamente, alcune di queste “radiazioni” sono state scoperte prima di riconoscere che si trattava delle stesse onde elettromagnetiche a frequenze non ancora esplorate

★ *Con fotoni di lunghezza d'onda diversa vedo cose diverse!*

Perche' non solo la 'luce'?

Vi sono molti motivi per “guardare” il cielo con sonde diverse dalla luce visibile

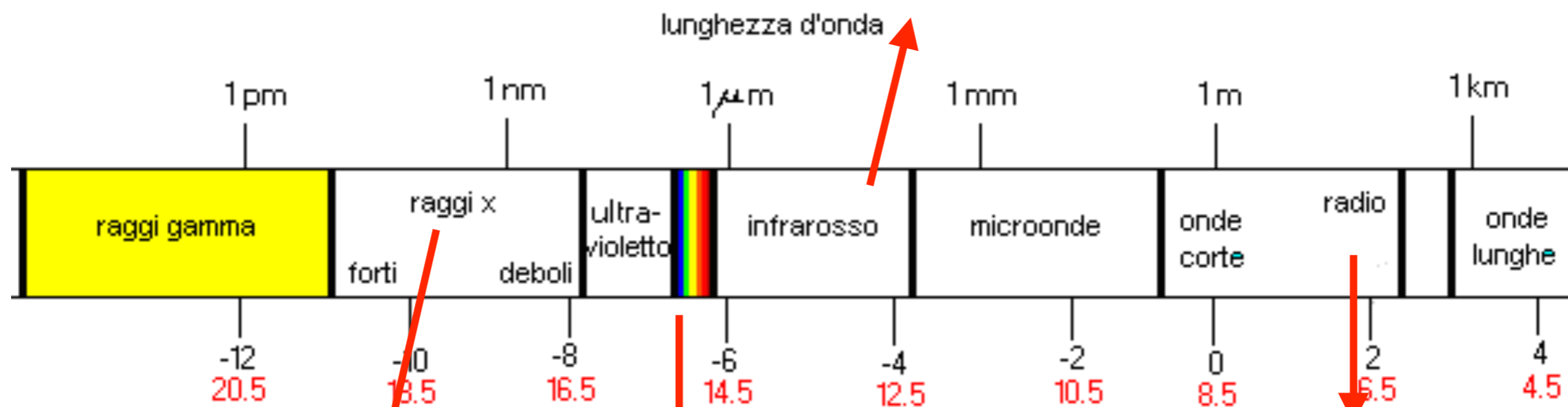
- Fotoni di *frequenza diversa* portano *informazioni fisiche diverse* sull'oggetto da osservare
- Non sempre la Galassia e' trasparente alla luce visibile, polvere e gas interstellare non lo sono
- Alcuni oggetti non emettono luce visibile, ma fotoni di altre frequenze
 - Buchi neri, stelle di neutroni, radio-galassie, quasars
- *La materia densa non è trasparente ai fotoni*
 - Altri oggetti, come i neutrini o le onde gravitazionali, ci possono dire qualcosa di ambienti inaccessibili come il centro di una stella in una esplosione di supernova o un nucleo galattico attivo o di una stella di neutroni

Lo spettro elettromagnetico

la Nebulosa del Granchio osservata con "differenti occhi" (diverse lunghezze d'onda)



Infrarosso



Pulsar

Raggi X



Ottico



Radio

Quali informazioni al variare di λ ?

Onde radio

- Emesse da cariche in moto collettivo. Nubi di gas carico, jets

Raggi infrarossi

- Emessi da corpi caldi. Stelle, gas interstellare. Non assorbiti dalla polvere

Luce visibile

- E' la frequenza che corrisponde alle transizioni atomiche e molecolari
- Luce: le molecole organiche hanno energie di legame simili ai fotoni luminosi

Raggi ultravioletti

- Atomi fortemente ionizzati, materia ad alta temperatura.

Raggi X

- Particelle cariche veloci, materia estremamente ionizzata, temperature altissime

Raggi γ

- Fenomeni nucleari e legati alle interazioni tra particelle elementari

Cosa sono i Raggi Cosmici ?

I raggi cosmici sono particelle cariche molto energetiche che bombardano continuamente la Terra da ogni direzione.

Fuori dall'atmosfera terrestre *su ogni metro quadrato "piovono" circa 30000 particelle ogni secondo!!!*

I raggi cosmici sono nuclei di atomi di materia ordinaria:

~ 90 % Idrogeno

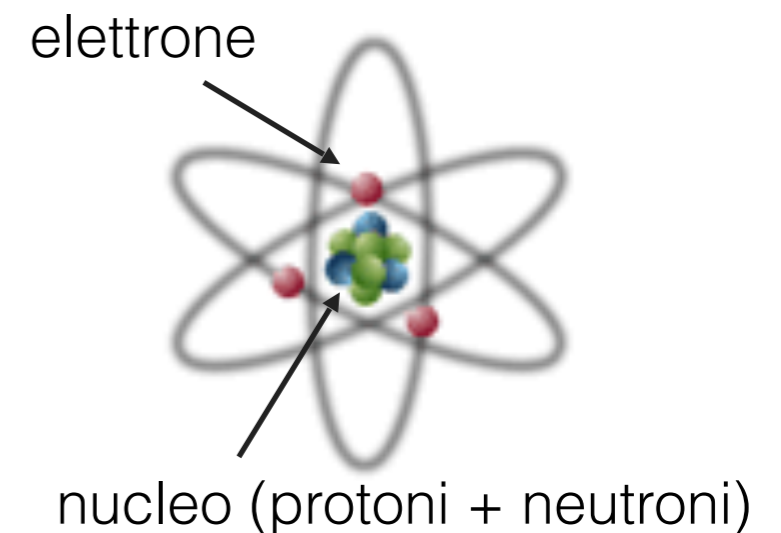
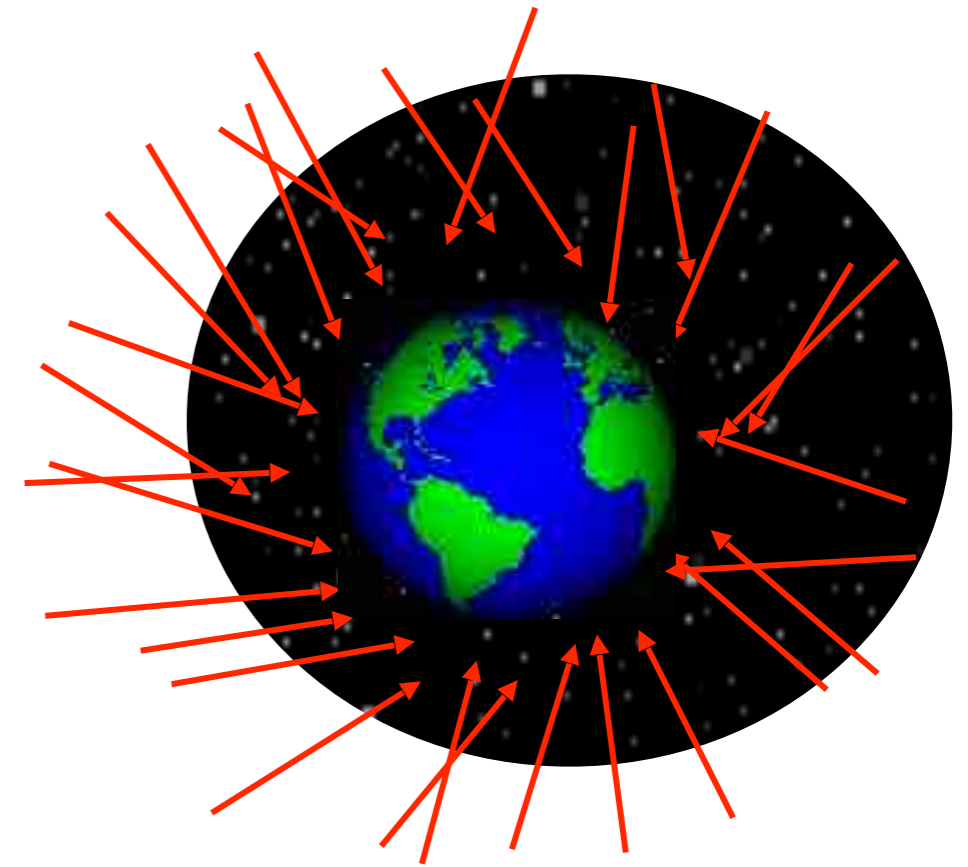
~ 9 % Elio

~ 1 % tutti gli altri nuclei

L'atomo piú comune nell'Universo é l'atomo di Idrogeno.

Il suo nucleo é costituito da un protone.

L'atmosfera terrestre assorbe la maggior parte dei raggi cosmici.



Why do we study Cosmic Rays ?

Cosmic Rays: a flux of high-energy particles from outer space

The major objective: study of "*non thermal*" phenomena in

most energetic and violent forms in the Universe

Through the exploration of *Extreme Particle Accelerators*

*Cosmic Ray Physics (→ High Energy Astrophysics) addresses an impressively broad range of topics related to the **high energy processes in the Universe**, including acceleration, propagation and radiation of relativistic particles on all astronomical scales: from compact objects like (neutron-stars and black holes) to large-scale cosmological structures (galaxy clusters).*

Why do we study Cosmic Rays ?

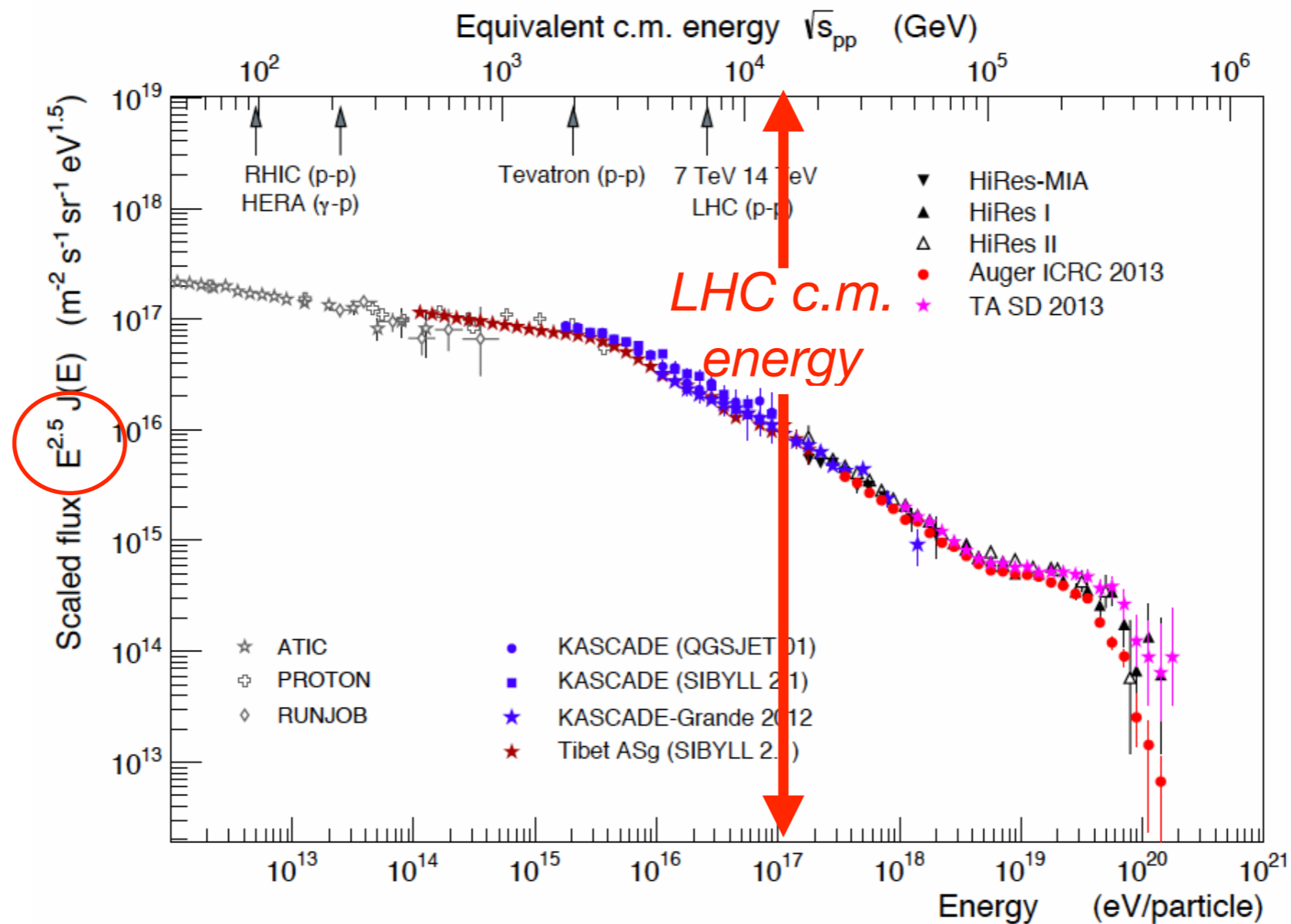
One of the main components of the Galaxy

Galactic component	Energy density (eV/cm³)
Cosmic Rays	≈ 1
Magnetic field	0.2 ÷ 0.8
Optical radiation	≈ 0.6
2.7 K radiation	0.265
I.S.M.	≈ 1

A research field at the interface between particle physics, plasma physics, astrophysics

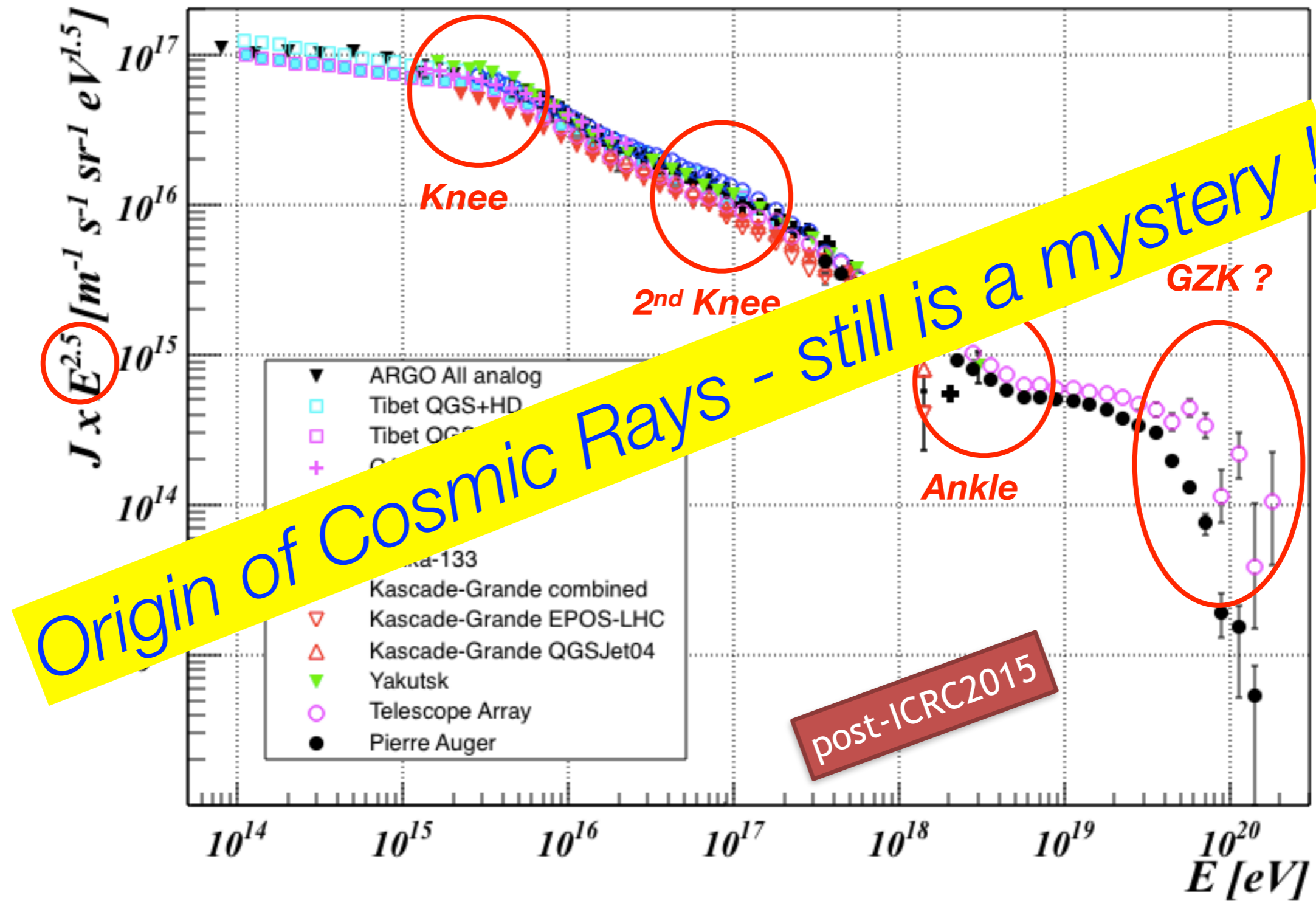
Why do we study Cosmic Rays ?

Cosmic Rays are the highest energy particles in the Universe !
Even in the LHC era...



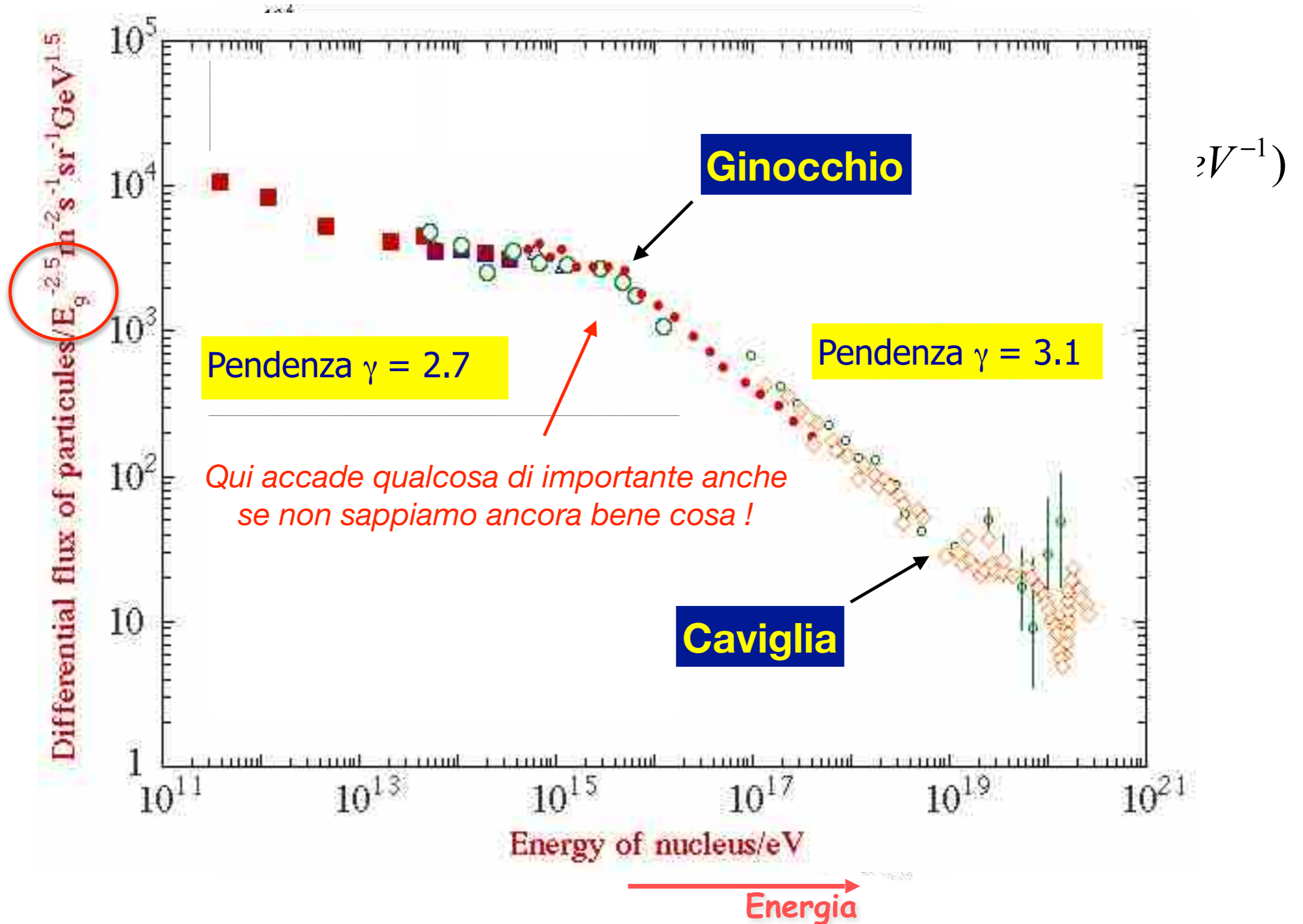
A $\approx 10^{17}$ eV proton hitting a nucleon produces an energy equivalent to that created at LHC when protons of 14 TeV collide with 14 TeV protons

All-particle energy spectrum



Ancora lo spettro dei RC, ma...

L'asse y viene moltiplicato per $E^{2.5}$, in modo da rendere "più piatta" la figura, ed accentuare il cambiamento di pendenza!



Come si diventa un 'Raggio Cosmico' ?

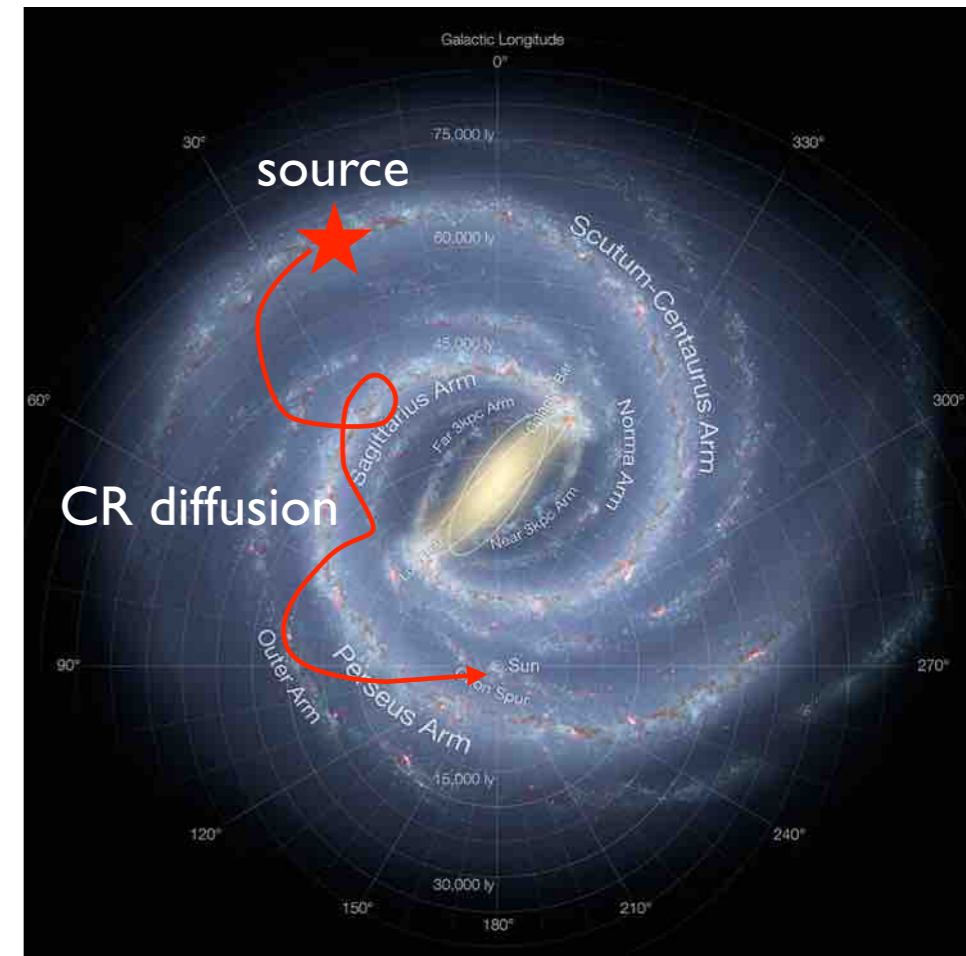
Non e' facile !

Ingredienti affinché una particella diventi un 'Raggio Cosmico'



The currently standard model

- CRs below 10^{17} eV are predominantly Galactic.
- **Standard paradigm**: Galactic CRs accelerated in SuperNova Remnants
→ *But smoking gun still missing !!!*
- Galactic CRs via *diffusive* shock acceleration ?
 $n_{CR} \propto E^{-\gamma}$ (at source), $\gamma \approx 2.1$
- Energy-dependent *diffusion* through Galaxy
 $n_{CR} \propto E^{-\gamma-\delta}$ (observed), $\delta \approx 0.6$



- Galactic CRs are scrambled by galactic magnetic field over very long time
→ arrival direction *mostly isotropic*
- Transition to extragalactic CRs occurs somewhere between 10^{17} and 10^{19} eV

The key questions

- ◆ **Origin of Cosmic Rays:** what are **the sites** that can accelerate particles up to $> 10^{20}$ eV ?
How many classes of sources at work ? Which cosmic accelerators dominate the CR flux in which energy range ?
 - which acceleration mechanism? → injection spectrum
 - total energy in CRs
 - *maximum energy of accelerated particles*
- ◆ **Cosmic Ray propagation:** How do CRs propagate ?
 - injected → observed spectrum
 - Why are CR confined in the Galaxy ? → magnetic field in the Galaxy
 - spatial distribution of sources
 - spatial distribution of CRs
- ◆ What is the **elemental composition** of the radiation ?

Do Galactic CRs originate from SuperNovae ?

It is widely believed that the bulk of CRs up to about 10^{17} eV are Galactic, produced and accelerated by the shock waves of SuperNova Remnants (SNR) expanding shells.

The *SNR paradigm* has two bases:

- ✓ firstly, *the energy released in SN explosions* can explain the CR energy density considering an overall efficiency of conversion of explosion energy into CR particles of the order of 10%.
- ✓ Secondly, the diffusive shock acceleration operating in SNR can provide the necessary power-law spectral shape of accelerated particles with *spectral index -2.0* that subsequently steepen to -2.7, as observed, due to the energy-dependent diffusive propagation effect.

The AGILE/Fermi measurements, however, *does not demonstrate* the capability of SNRs to produce the power needed to maintain the galactic CR population and to accelerate CRs up to the knee.

- ✓ *“early cutoffs”*: in all SNRs $E_{\text{cut}} < 100$ TeV
Should we relax and accept that SNRs are the main contributors to GCRs but until 10-100 TeV, and that there should be other sources (PeVatrons) responsible for the knee around 1 PeV ?

Perhaps, but we should explore other possibilities as well

- The *Galactic Center* is so far the most promising place for a “PeVatron”

The power argument for SNR

Cosmic ray energy density: $\rho \approx 1 \text{ eV} / \text{cm}^3$

Cosmic ray "lifetime": $t \approx 6 \times 10^6 \text{ years}$

Galaxy volume: $V \approx \pi r^2 d \approx 4.2 \times 10^{66} \text{ cm}^3$

$$dE/dt = \rho V / t \approx 4 \times 10^{33} \text{ J/s} \quad \text{a galactic phenomenon}$$

Supernova rate: $f \approx 1 / 30 \text{ years}$

kinetic energy of emission: $E \approx 10^{44} \text{ J}$

fraction in CRs: $\varepsilon \approx 10 \%$

$$dE/dt = f \varepsilon E \approx 10^{34} \text{ J/s}$$

No obvious alternative can provide this energy.

→ SuperNovae are prime candidates for the sources of CRs

Cosmic Ray Astrophysics with CRs ?

A lot of information about the locally measured primary and secondary components of CRs but still no definite conclusions about the accelerators

it is NOT a big surprise that the origin of CRs is yet a mystery !

charged CRs do not provide information about the acceleration sites

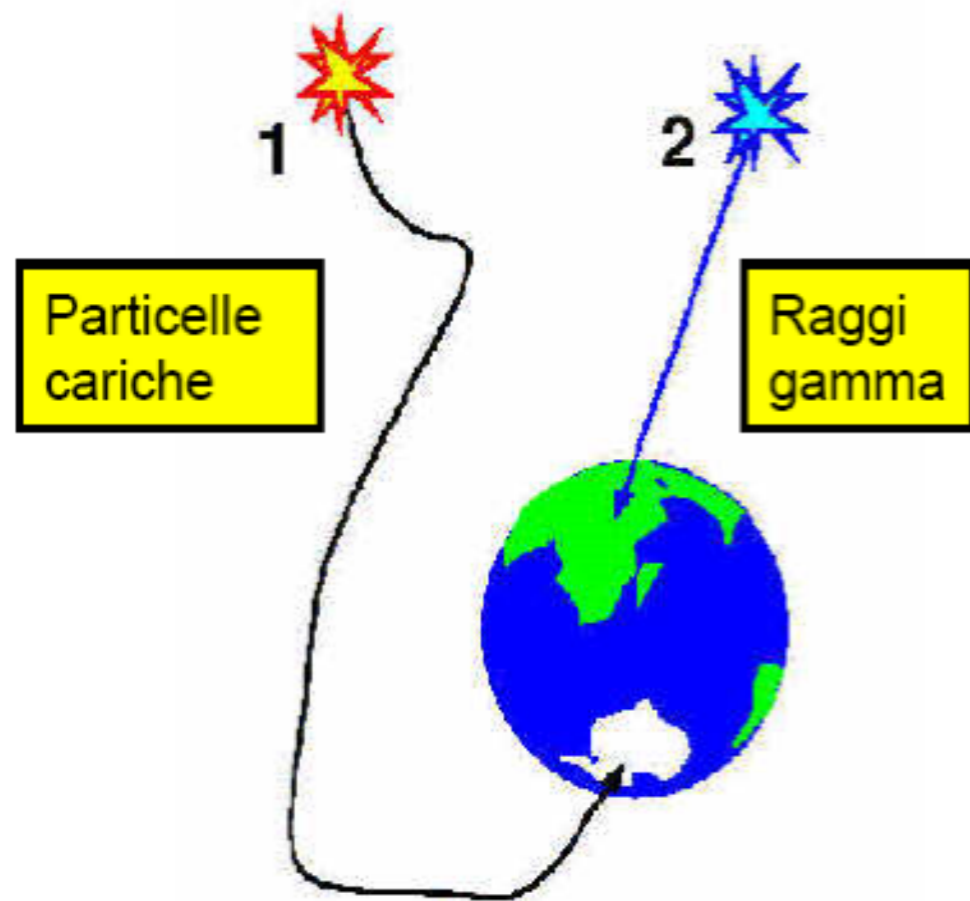
CR factories can be revealed only by *astronomical means*;

the astronomical messengers should be *neutral & stable*:

photons and *neutrinos*, but partly also *neutrons*

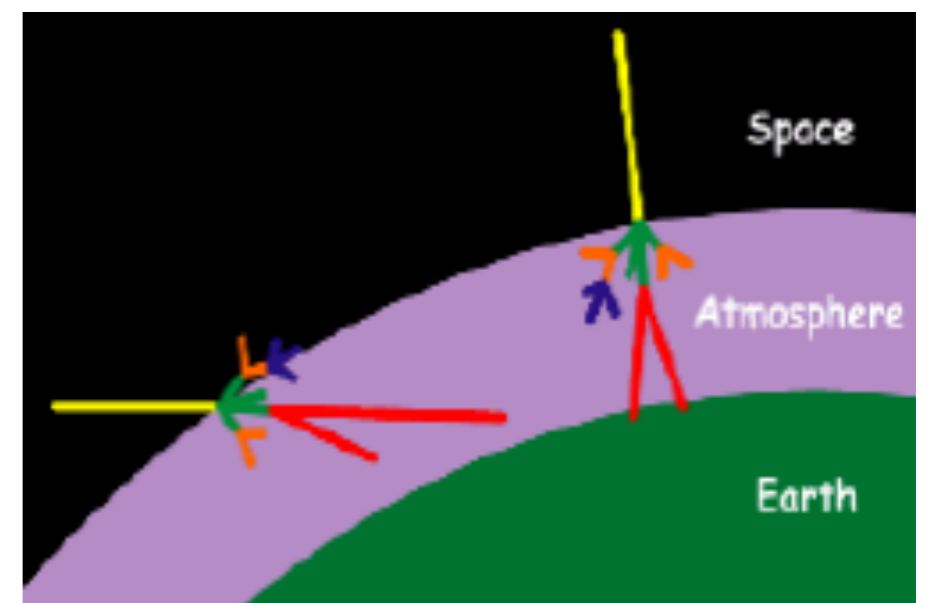
Da dove vengono i Raggi Cosmici ?

Difficile dirlo perchè sono particelle cariche
(sono deviate dai campi magnetici !!!)



Ma i **fotoni** (ed i **neutrini**), particelle neutre che vengono prodotte insieme ai raggi cosmici, non sono deflesse e dalla loro direzione possiamo individuare le sorgenti.

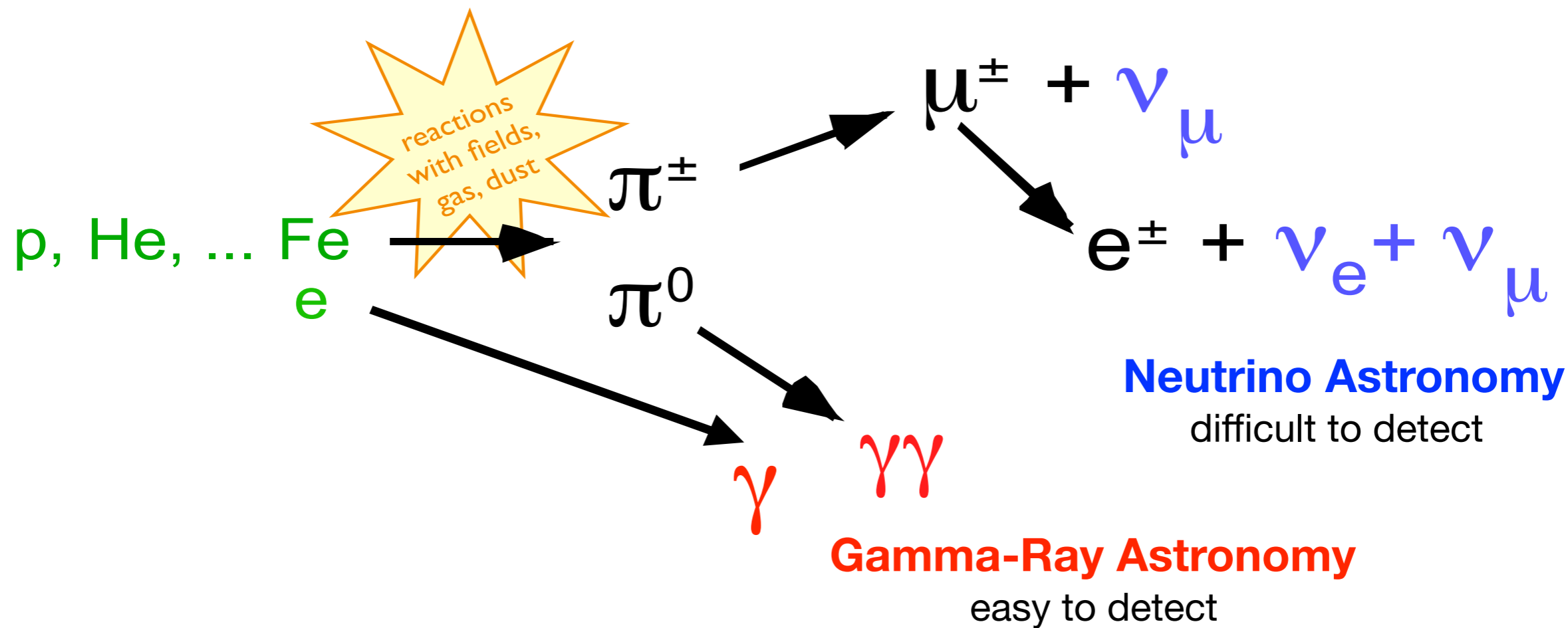
- I Raggi Cosmici “primari” vengono da tutte le direzioni !
- Le particelle che arrivano sulla Terra “preferiscono” la verticale (meno atmosfera da attraversare !)



The "Cosmic Ray Connection"

In CR sources *hadronic interactions* of nuclei produce photons and neutrinos

→ *CRs, photons and neutrinos are strongly correlated*: they come likely from the same sources !

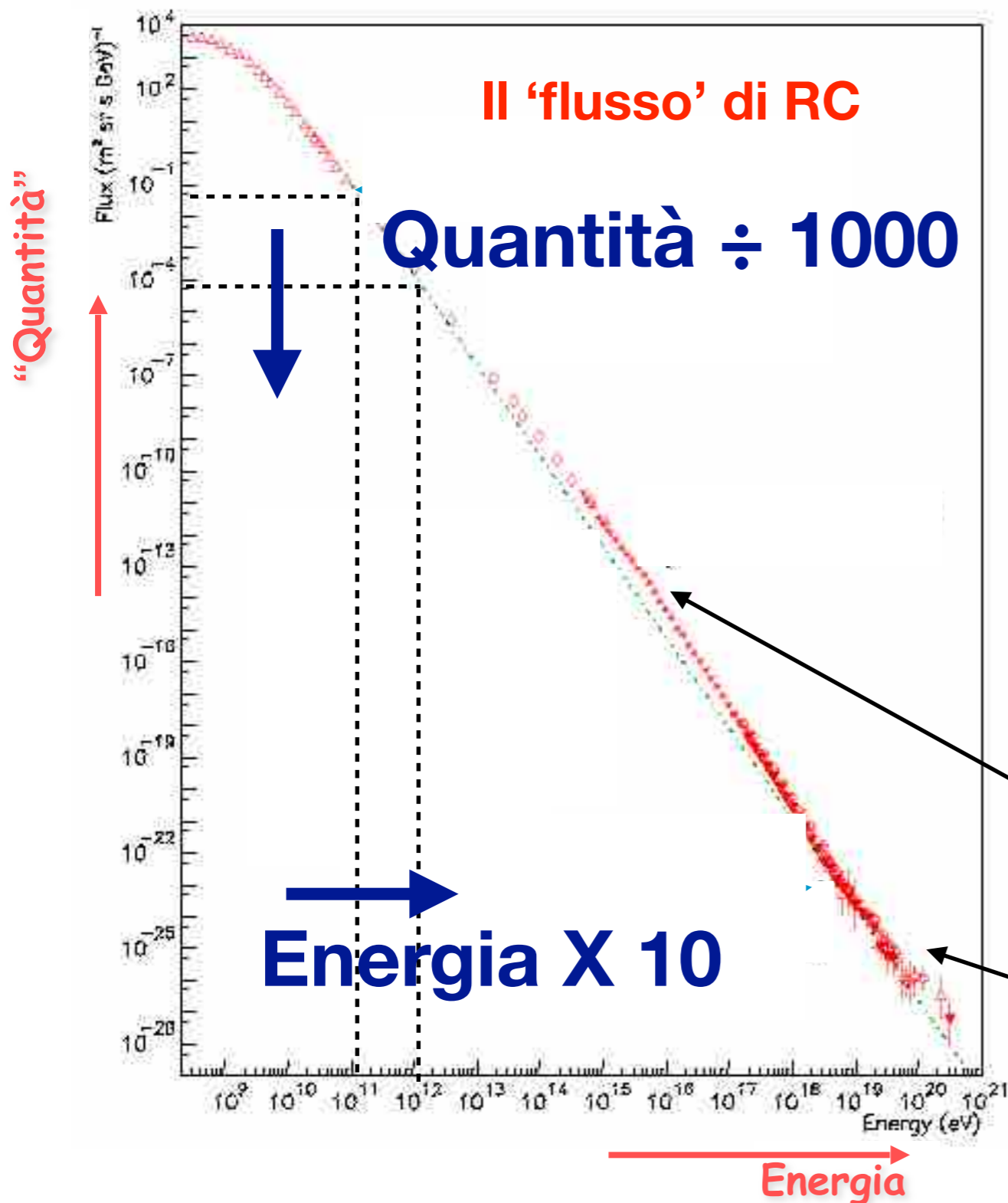


ONLY charged CRs observed at $E > 10^{14}$ eV so far !

Recent observations of PeV neutrinos by IceCube

γ, ν
*point back to sources
 (good for astronomy)
 but serious backgrounds*

Quanti sono i Raggi Cosmici ?



La “quantità” di Raggi Cosmici che raggiunge la Terra dipende dalla loro “energia”.

Il loro numero diminuisce al crescere dell'energia.

$E_0 \approx 10^8 \text{ eV} \rightarrow 100 \text{ eventi / m}^2 \text{ / secondo}$

$E_0 \approx 10^{15} \text{ eV} \rightarrow 1 \text{ evento / m}^2 \text{ / anno}$

$E_0 \approx 10^{19} \text{ eV} \rightarrow 1 \text{ evento / km}^2 \text{ / anno}$

$E_0 > 10^{20} \text{ eV} \rightarrow 1 \text{ evento / km}^2 \text{ / secolo}$

- 1 PC = 1 RC durante una partita di calcio
- 1 GRAnno = 1 RC entro il Grande Raccordo Anulare all'anno

Cosmic Ray detection

In general: for all particle types

- the higher the energy → the lower the flux
- the lower the flux → the larger the required detector area

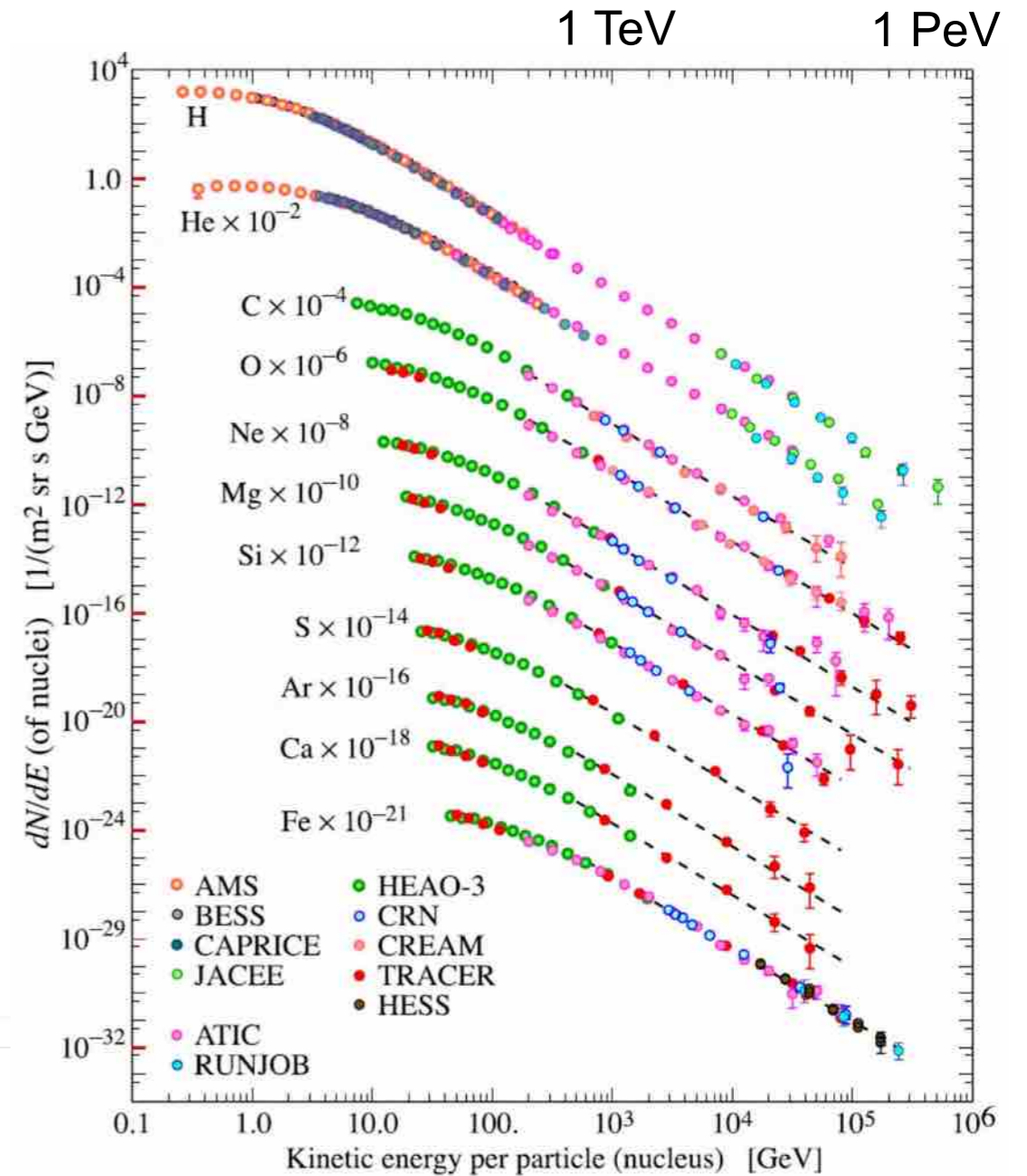
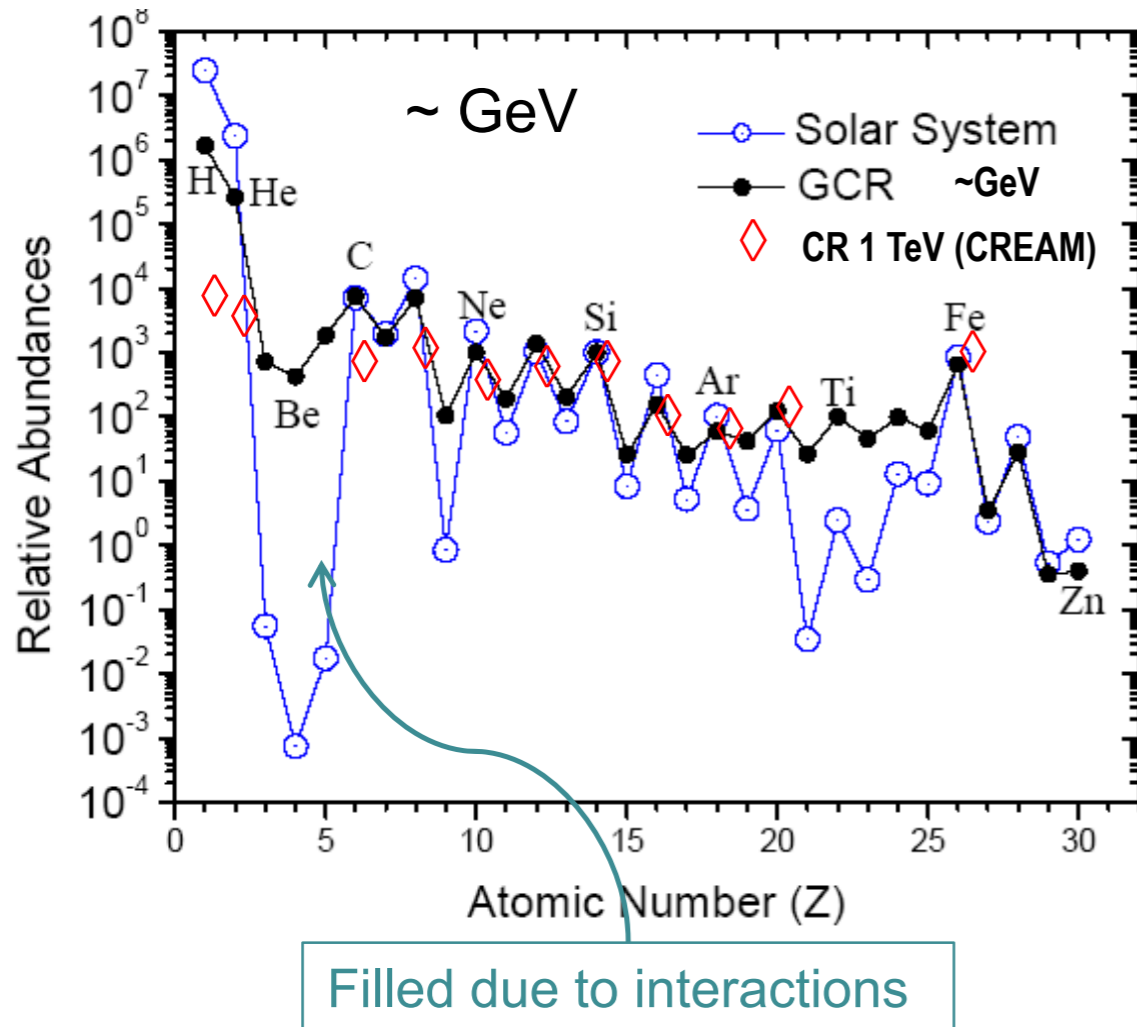
$$N_{\text{evts}} = \text{Flux} \times \text{Area} \times \text{Time}$$

The diagram illustrates the equation $N_{\text{evts}} = \text{Flux} \times \text{Area} \times \text{Time}$ with four arrows pointing to the terms: a blue arrow to N_{evts} , a red arrow to Flux , a green arrow to Area , and a purple arrow to Time . Below each arrow is descriptive text: a blue arrow points to > 100 ; a red arrow points to *small given by nature*; a green arrow points to $\approx 1 \text{ m}^2$ for satellite exp; and a purple arrow points to $\approx 3 \text{ yrs}$.

Detector size limits the smallest measurable flux !

Direct measurements up to about 100 TeV/n

CR composition up to ≈ 100 TeV



Basic facts:

- ★ secondary/primary ratio \rightarrow *traversed matter $\approx 10 \text{ g/cm}^2$*
- ★ unstable/stable secondaries \rightarrow *residence time $\approx 10^7$ years*

accelerated about 10^7 years ago charged particles stay in the galaxy due to magnetic fields

Deflection in magnetic fields

Magnetic fields →

- ◆ *contain* particles in accelerated region while they gain slowly energy (the better the higher their Z)
- ◆ *scramble* their directions (the more the higher their Z)

$$R_{Larmor} = \frac{p \cdot c}{B Z e} \approx 3.33 \text{ m} \frac{p}{B}$$

← in GeV/c
 ← in T
 for protons:

Radius is determined by B : magnetic field and units: Volt
 p/Ze : magnetic rigidity

$$R_L(p, E) = R_L(\text{Fe}, 26 E)$$

deflection $\sim 1 / R_L$

A source (*confinement region*) of size L_{acc} with a magnetic field B_{acc} confines particles with rigidities

$$pc/Z \leq e L_{acc} B_{acc}$$

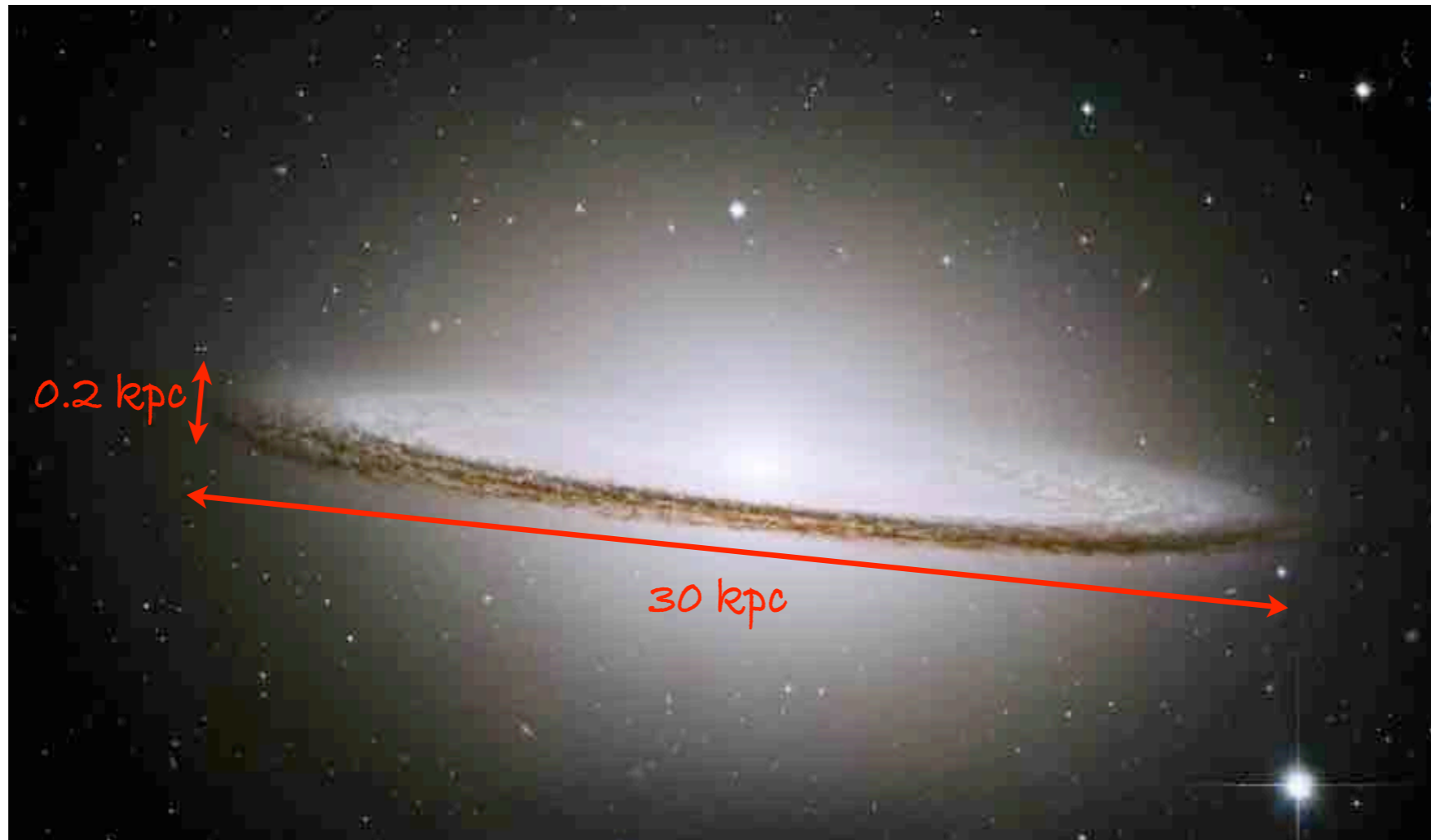
e.g. **SNR**: $L \approx 5-10 \text{ pc}$, $B \approx 10-100 \text{ nG}$
 $E_{max} \approx Z e L_{acc} B_{acc} \approx 10^{15} \text{ eV}$

Fe confined longer
 → accelerated to higher energies

Confinement in the Galaxy

Our Galaxy of thickness $L_{gal} \approx 200 pc$, with a magnetic field $B_{gal} \approx 1 \mu G$ confines particles with rigidities

$$pc/Z \leq e L_{gal} B_{gal} \approx 1 EV$$



Higher energies start leaking out, proton first
Anisotropy of arrival directions should emerge

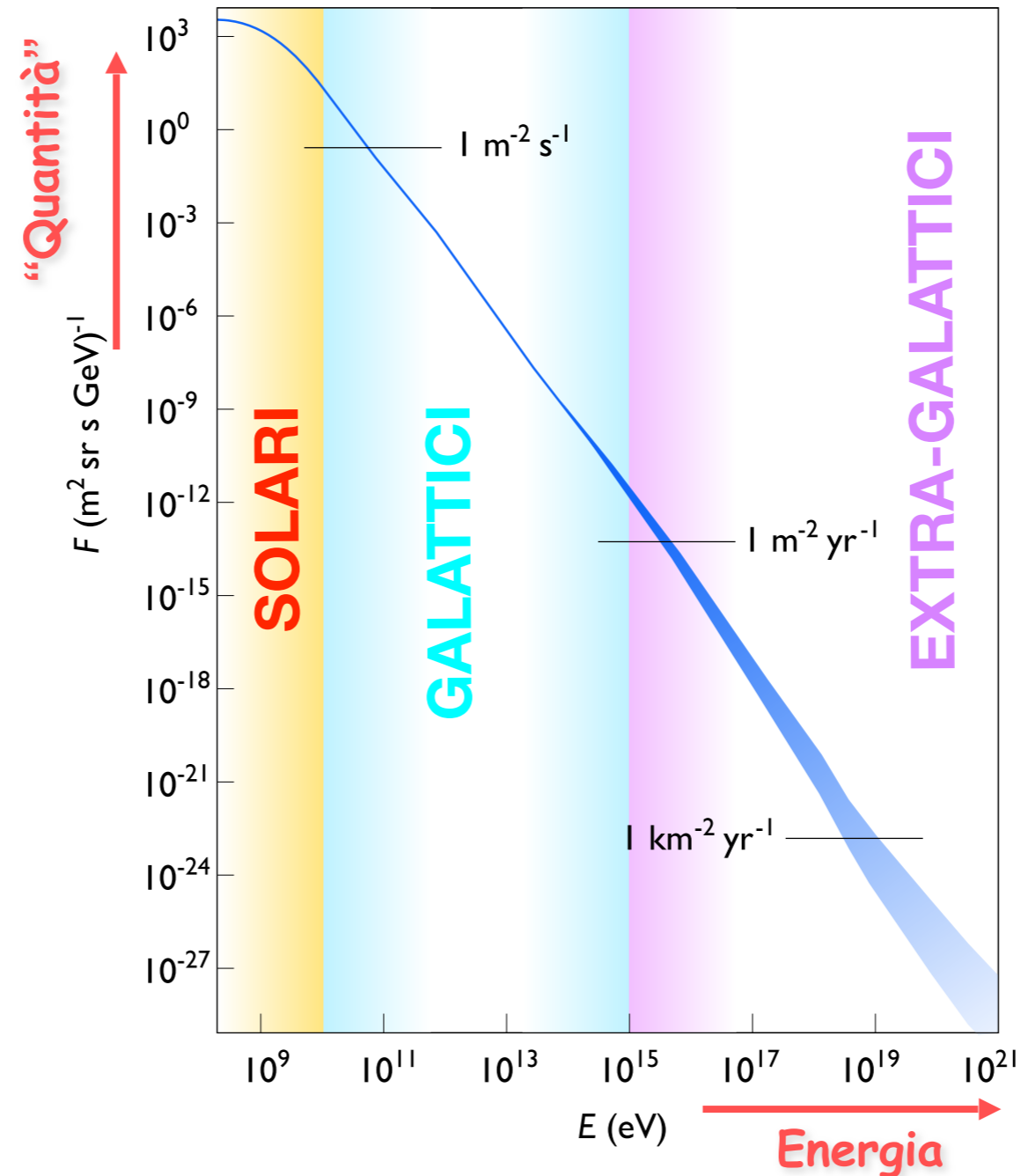
'Misteri' dopo 100 anni dalla scoperta

- ◆ Dove sono le *sorgenti* dei Raggi Cosmici ?
- ◆ *Come vengono accelerate* le particelle fino ad energie incredibilmente elevate ?
- ◆ Qual è l'energia massima che si può raggiungere in una determinata sorgente ?
- ◆ *Come si propagano* le particelle nello spazio ?
- ◆ A che energia c'è la transizione Raggi Cosmici Galattici/Extra-Galattici ?
- ◆ A che energia finisce lo spettro dei Raggi Cosmici ? E perchè ?

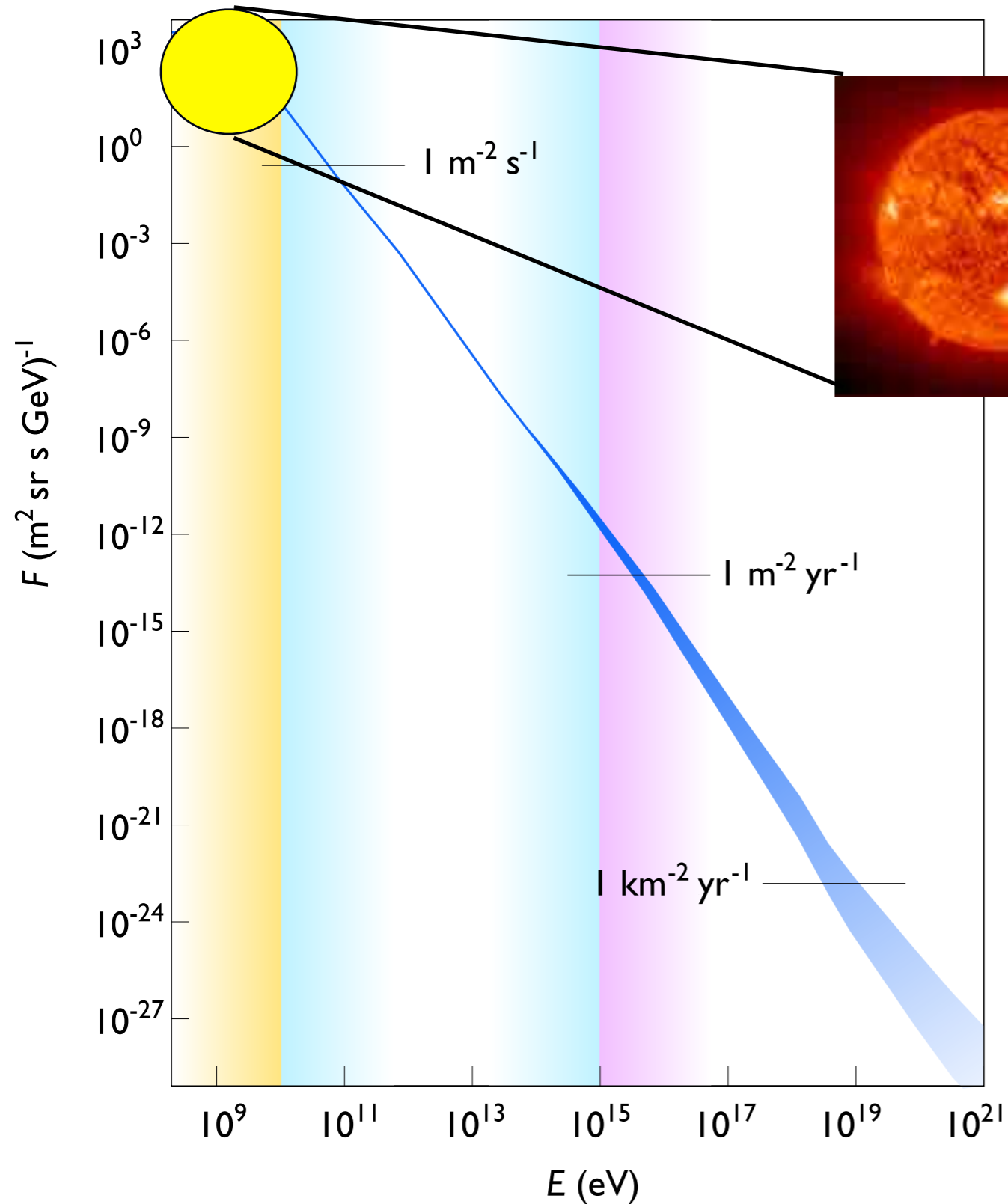
Cosa sappiamo ed ipotizziamo ?

Diverse sorgenti per diverse energie !

➔ *Diversi meccanismi di accelerazione*



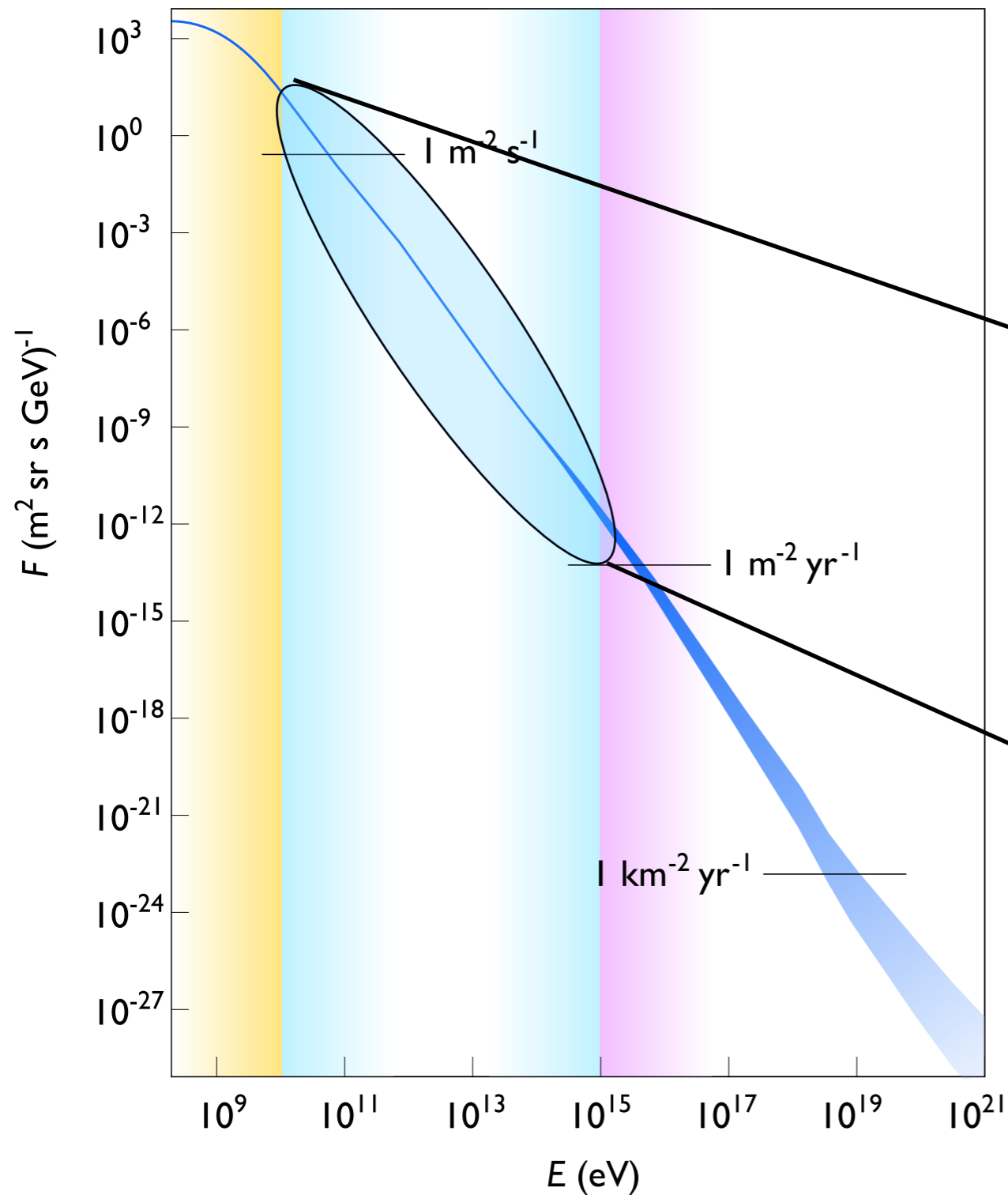
Il Sole



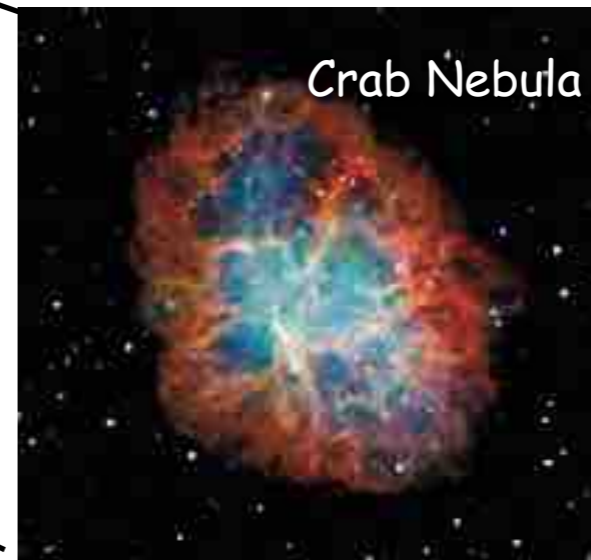
Fiammata Solare
 (“Solar Flare”)
 10 – 100 MeV
 Raramente 1 GeV



Le SuperNovae



In Esplosioni di **SuperNovae**
nella nostra Galassia



SuperNovae come 'acceleratori' di RC

L'esplosione delle Supernovae accelera i nuclei (dall'Idrogeno fino al Ferro) prodotti nel corso della vita delle Stelle.

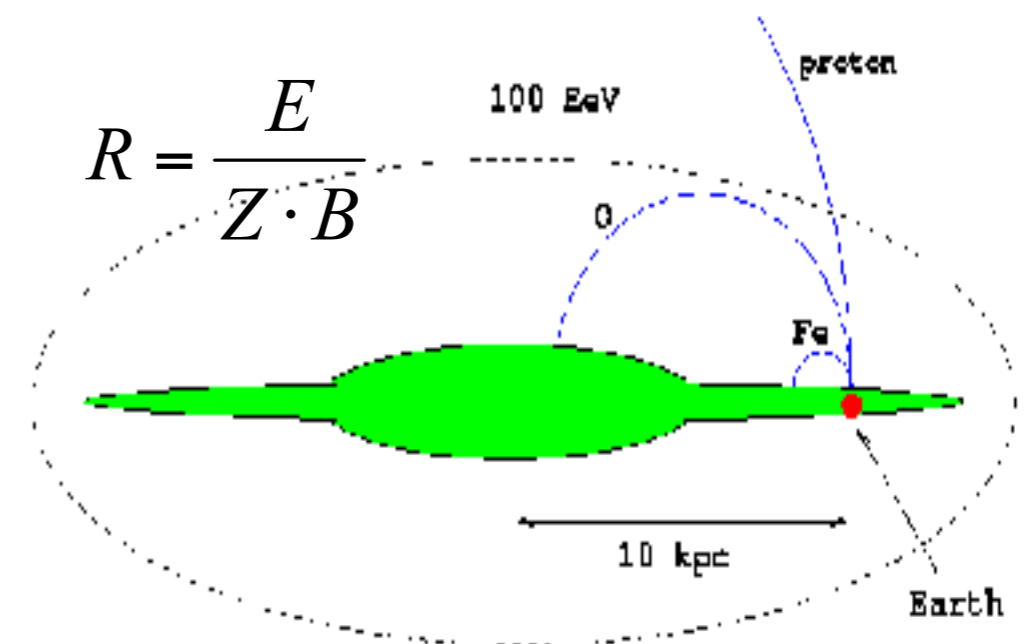
Queste particelle sono i Raggi Cosmici

I R.C. sono un "gas" che permea tutta la Galassia.

Galassia = "bottiglia magnetica" che confina i R.C. per milioni di anni

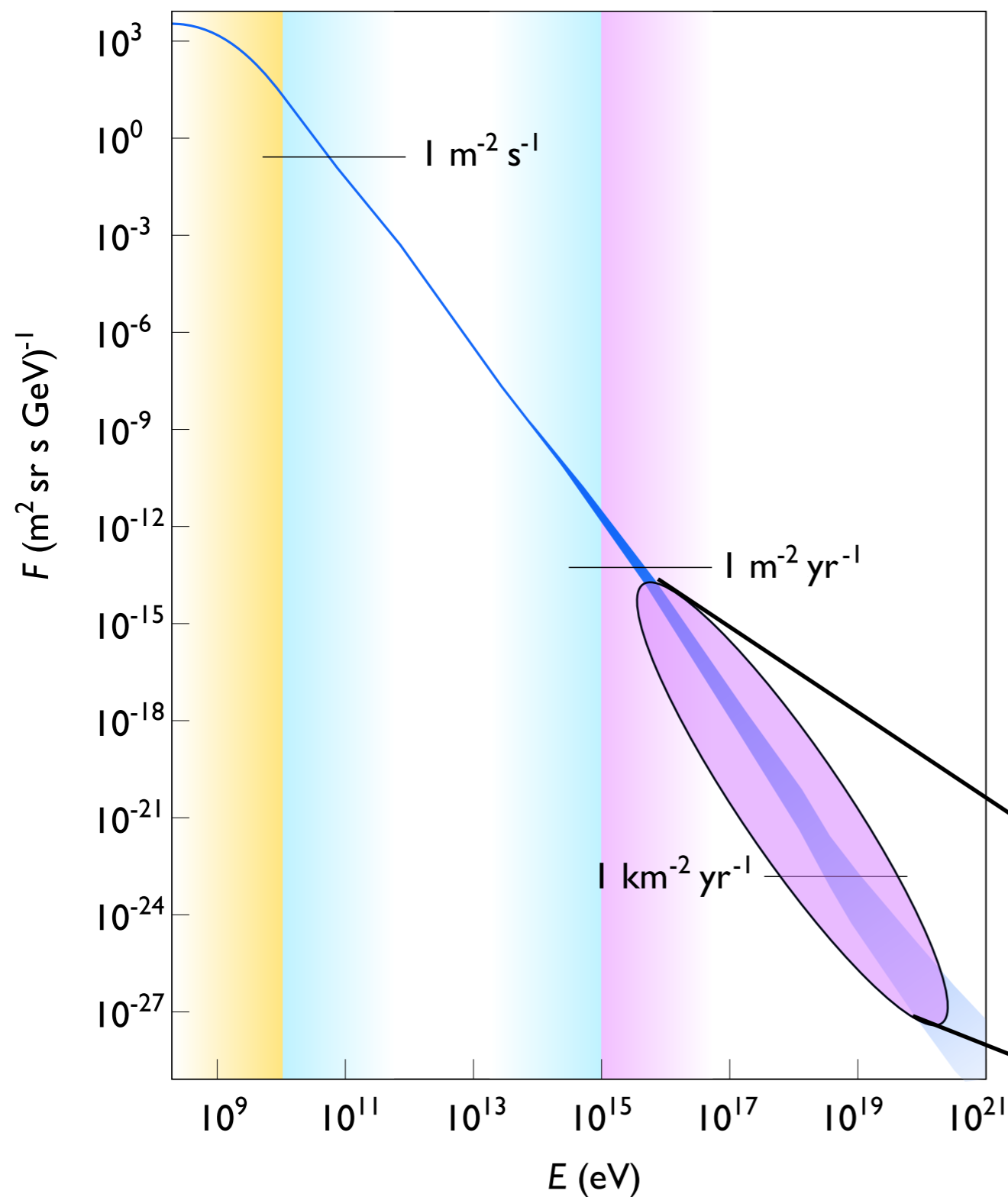
Il Sistema Solare si muove in questo gas.

La Nebulosa del Granchio



$$1 \text{ parsec} = 3.2 \text{ anni-luce} = 3.1 \cdot 10^{13} \text{ km}$$

Le energie estreme: altre galassie



Più energia concentrata in una particella microscopica che in una pallina da tennis dopo un servizio:

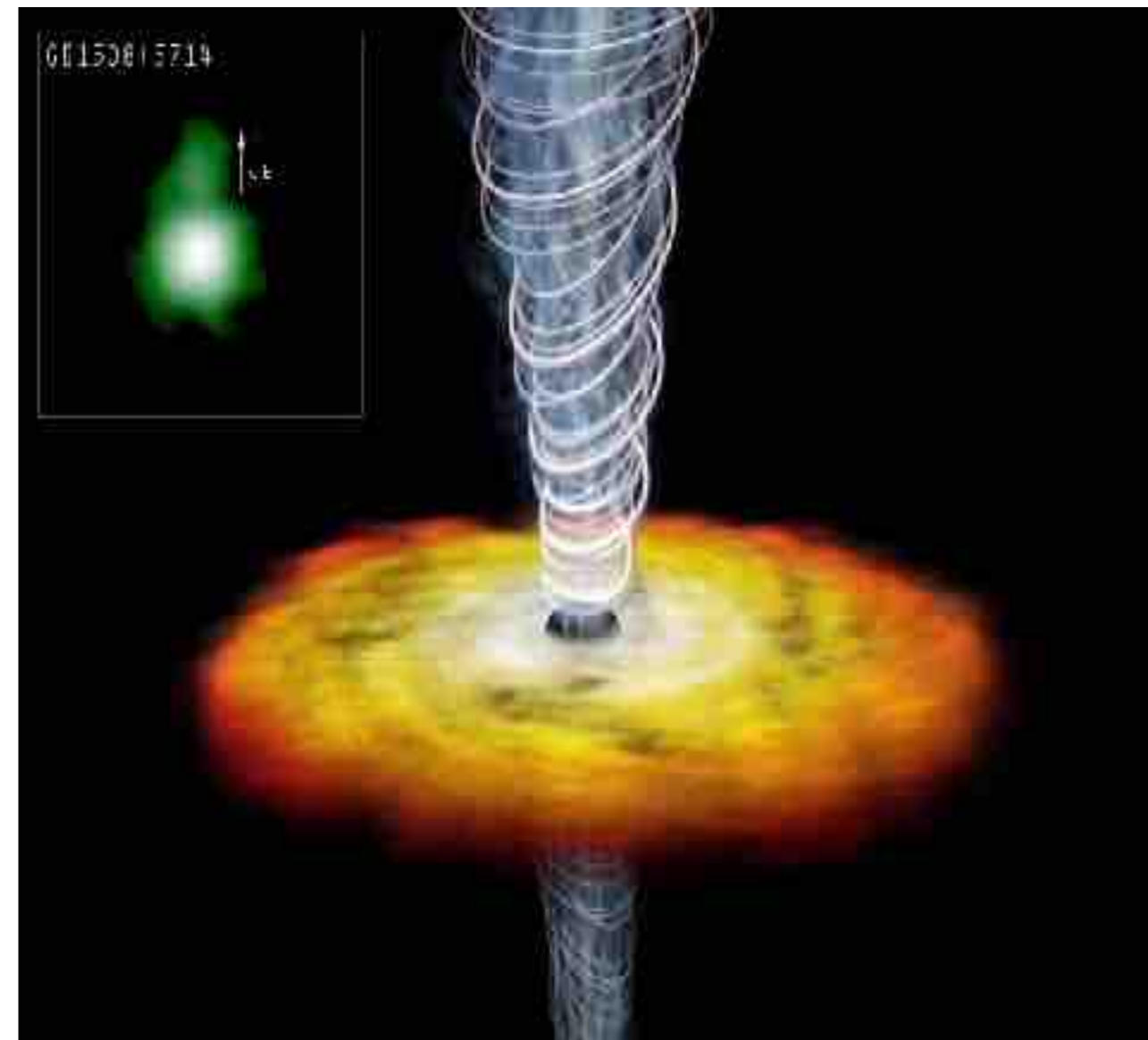
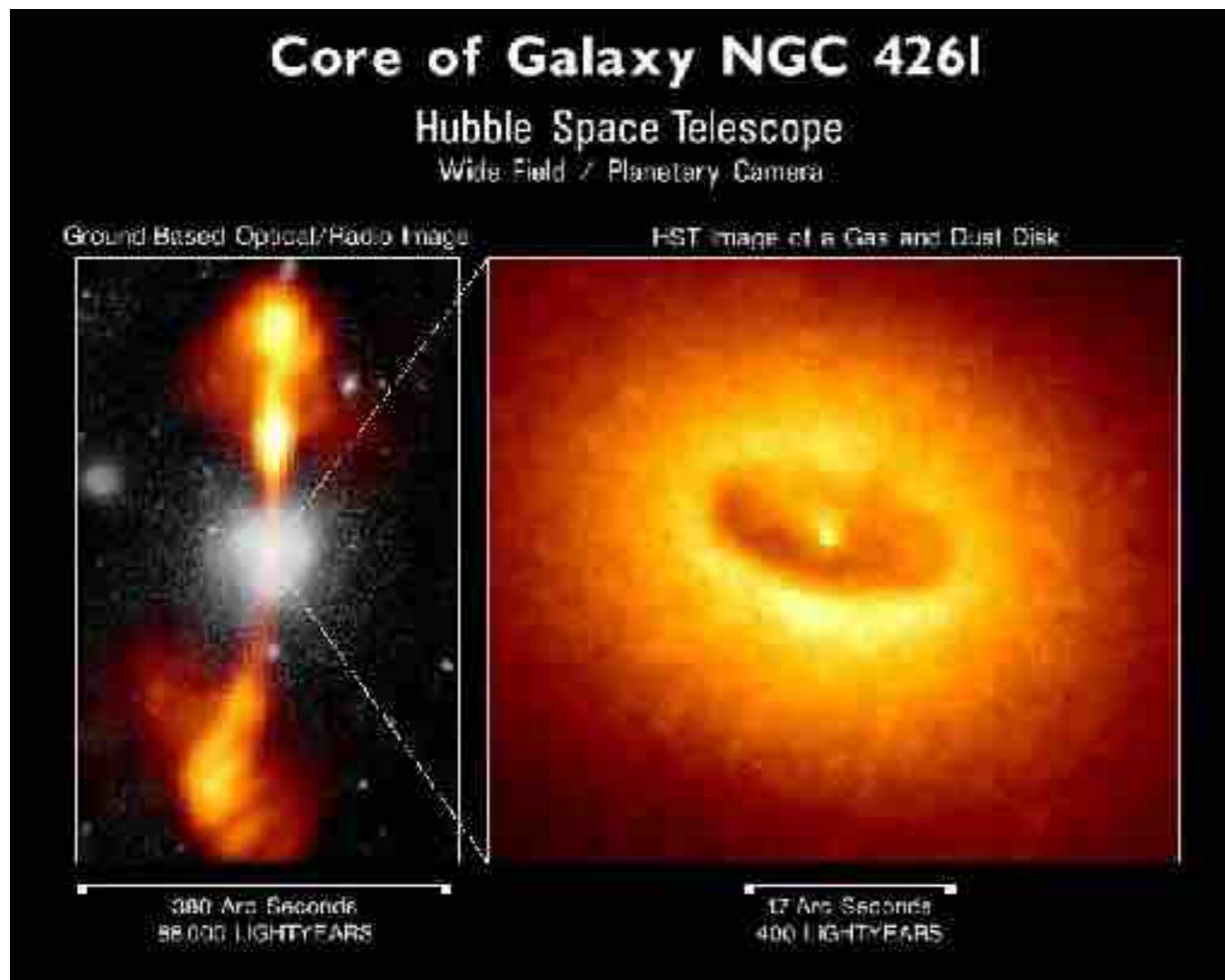
68 gr lanciata a 246 km/h

$\sim 10^{19}$ eV ~ 5 Joules



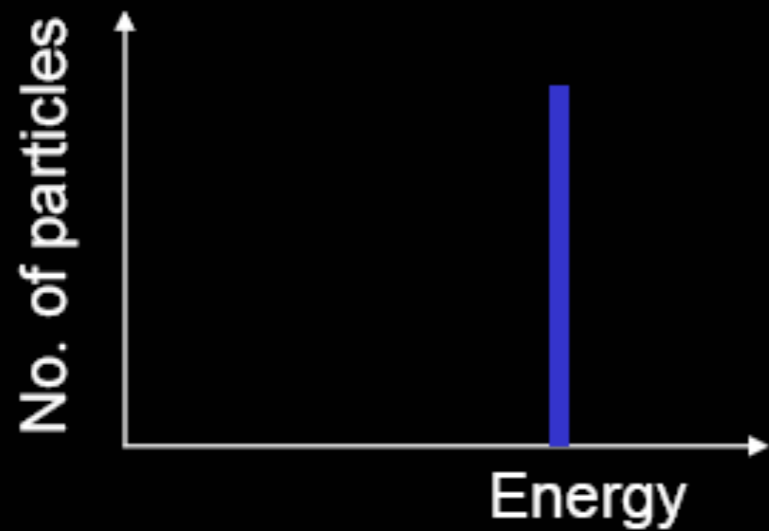
Sorgenti extra-galattiche ?

I RC di più alta energia molto probabilmente provengono da altre Galassie, i cosiddetti **“Nuclei Galattici Attivi”**, galassie peculiari con un Buco Nero supermassiccio al centro



Acceleratori artificiali

Man-made accelerators



$$\left(\frac{E}{10^{20} \text{ eV}} \right) < 0.3 \cdot \frac{1}{2} \cdot Z \cdot \beta \cdot \left(\frac{L}{10^{12} \text{ km}} \right) \cdot \left(\frac{B}{\text{G}} \right)$$

Il meccanismo di Fermi (1949)

Reprinted from Physical Review **75**, 8, April 15, 1949, by Permission

On the Origin of the Cosmic Radiation

ENRICO FERMI
Institute for Nuclear Studies, University of Chicago, Chicago, Illinois
(Received January 3, 1948)

A theory of the origin of cosmic radiation is proposed according to which cosmic rays are originated and accelerated primarily in the interstellar space of the galaxy by collisions against moving magnetic fields. One of the features of the theory is that it yields naturally an inverse power law for the spectral distribution of the cosmic rays. The chief difficulty is that it fails to explain in a straightforward way the heavy nuclei observed in the primary radiation.

I. INTRODUCTION

IN recent discussions on the origin of the cosmic radiation E. Teller¹ has advocated the view that cosmic rays are of solar origin and are kept relatively near the sun by the action of magnetic fields. These views are amplified by Alfven,² Richtmyer,³ and Teller.⁴ The argument against the conventional view that cosmic radiation may extend at least to all the galactic space is the very large amount of energy that should be present in form of cosmic radiation if it were to extend to such a huge space. Indeed, if this were the case, the mechanism of acceleration of the cosmic radiation should be extremely efficient.

I propose in the present note to discuss a hypothesis on the origin of cosmic rays which attempts to meet in part this objection, and according to which cosmic rays originate and are accelerated primarily in the interstellar space, although they are assumed to be prevented by magnetic fields from leaving the boundaries of the galaxy. The main process of acceleration is due to the interaction of cosmic particles with wandering magnetic fields which, according to Alfven,² occupy the interstellar spaces.

Such fields have a remarkably great stability because of their large dimensions (of the order of magnitude of light years), and of the relatively high electrical conductivity of the interstellar space. Indeed, the conductivity is so high that one might describe the magnetic lines of force as attached to the matter and partaking in its streaming motions. On the other hand, the magnetic field itself reacts on the hydrodynamics⁵ of the interstellar matter giving it properties which, according to Alfven,² can pictorially be described by saying that to each line of force one should attach a material density due to the mass of the matter to which the line of force is linked. Developing this point of view, Alfven is able to calculate a simple formula for the velocity V of propagation of magneto-elastic waves:

$$V = H / (4\pi\rho)^{1/2}, \quad (1)$$

where H is the intensity of the magnetic field and ρ is the density of the interstellar matter.

One finds according to the present theory that a particle that is projected into the interstellar medium with energy above a certain injection threshold gains energy by collisions against the moving irregularities of the interstellar magnetic field. The rate of gain is very slow but appears capable of building up the energy to the maximum values observed. Indeed one finds quite naturally an inverse power law for the energy spectrum of the protons. The experimentally observed exponent of this law appears to be well within the range of the possibilities.

The present theory is incomplete because no satisfactory injection mechanism is proposed except for protons which apparently can be regenerated at least in part in the collision processes of the cosmic radiation itself with the diffuse interstellar matter. The most serious difficulty is in the injection process for the heavy nuclear component of the radiation. For these particles the injection energy is very high and the injection mechanism must be correspondingly efficient.

II. THE MOTIONS OF THE INTERSTELLAR MEDIUM

It is currently assumed that the interstellar space of the galaxy is occupied by matter at extremely low density, corresponding to about one atom of hydrogen per cc, or to a density of about 10^{-24} g/cc. The evidence indicates, however, that this matter is not uniformly spread, but that there are condensations where the density may be as much as ten or a hundred times as large and which extend to average dimensions of the order of 10 parsec. (1 parsec. = 3.1×10^{13} cm = 3.1 light years.) From the measurements of Adams⁶ on the Doppler effect of the interstellar absorption lines one knows the radial velocity with respect to the sun of a sample of such clouds located at not too great distances from us. The root-mean-square of the radial velocity, corrected for the proper motion of the sun with respect to the neighboring stars, is about 15 km/sec. We may assume that the root-mean-square velocity

⁶ N. S. Adams, *Astr. J.*, **57**, 165 (1945).

¹ Nuclear Physics Conference, Birmingham, 1948.

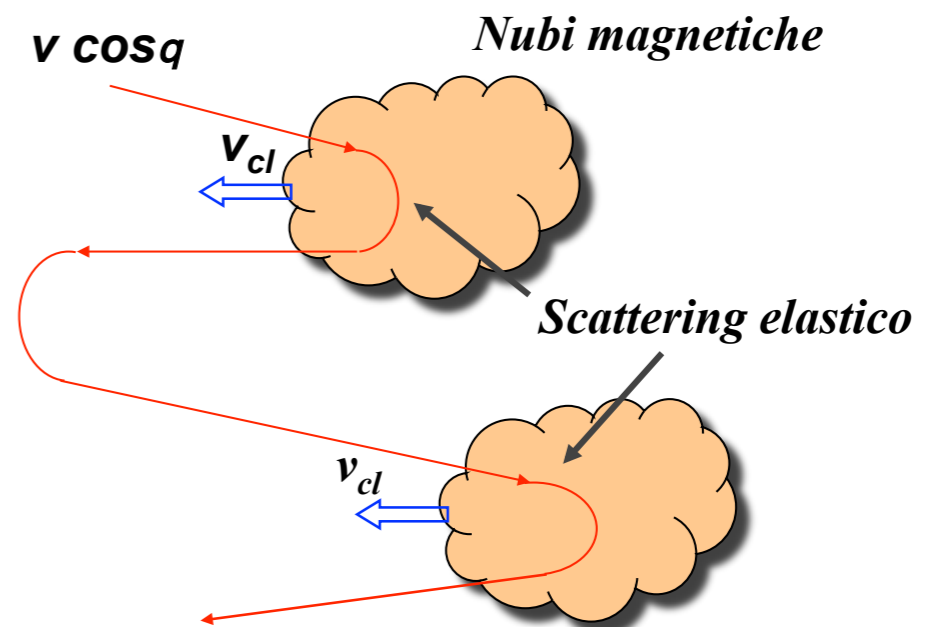
² Alfven, Richtmyer, and Teller, *Phys. Rev.*, to be published.

³ H. Alfven, *Arkiv Mat. F. Astr. o. Fys.*, **23D**, 2 (1941).

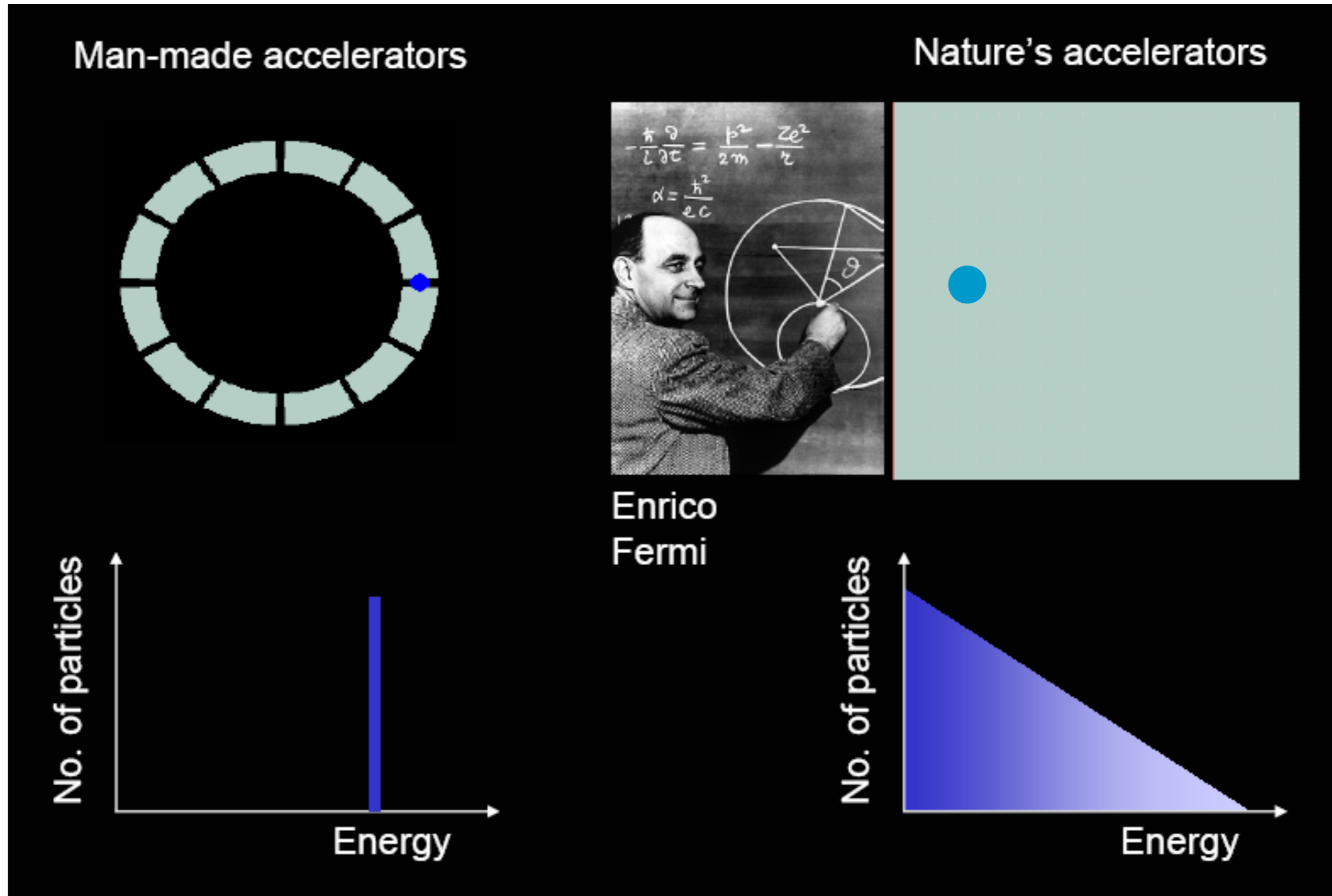
Accelerazione dovuta a **collisioni con nubi magnetiche** distribuite in modo casuale nella galassia, ed in moto con velocità dell'ordine di 30 km/s.

Una "collisione" con una nube magnetica può causare un aumento dell'energia della particella.

Un gran numero di collisioni con questi **"specchi magnetici"** può far crescere l'energia fino a valori molto elevati.



Acceleratori astrofisici



Laboratori per studiare i Raggi Cosmici



Esperimento EAS-TOP
(1985 - 2000)

EAS-TOP sotto la neve



EAS-TOP sotto la neve



rivelatori

Laboratori per studiare i Raggi Cosmici

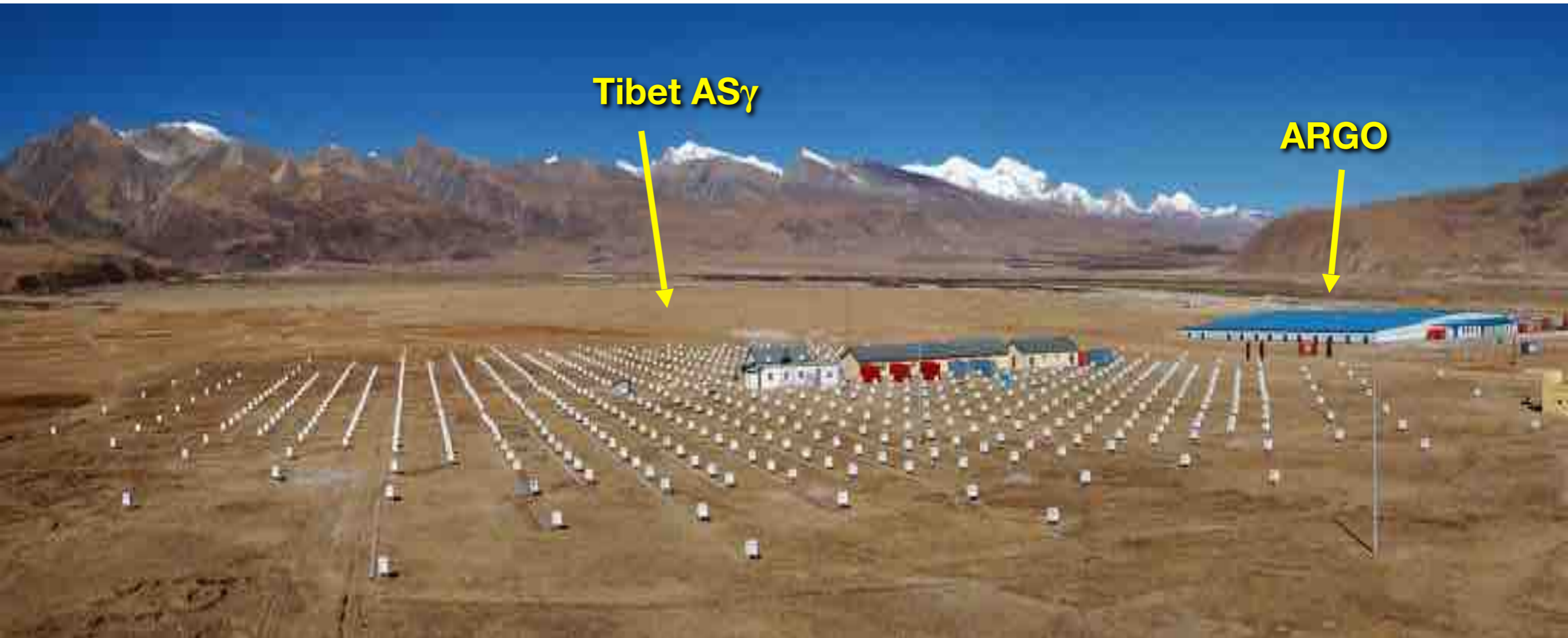
Il piu' alto !!!

Chacaltaya, Bolivia 5200 m slm



L'esperimento ARGO in Tibet

Osservatorio di YangBaJing, 90 km a Nord di Lhasa, 4300 m slm



Laboratorio di ARGO



Esperimento LHAASO su altopiano tibetano



Esperimento LHAASO su altopiano tibetano

4400 m slm

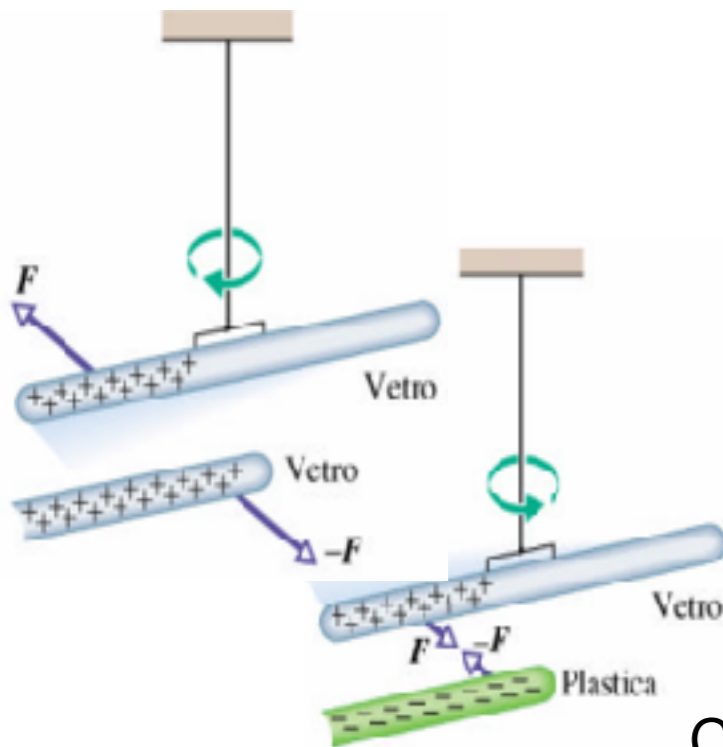


HESS, Namibia



Prologo: gli studi sull'elettricità

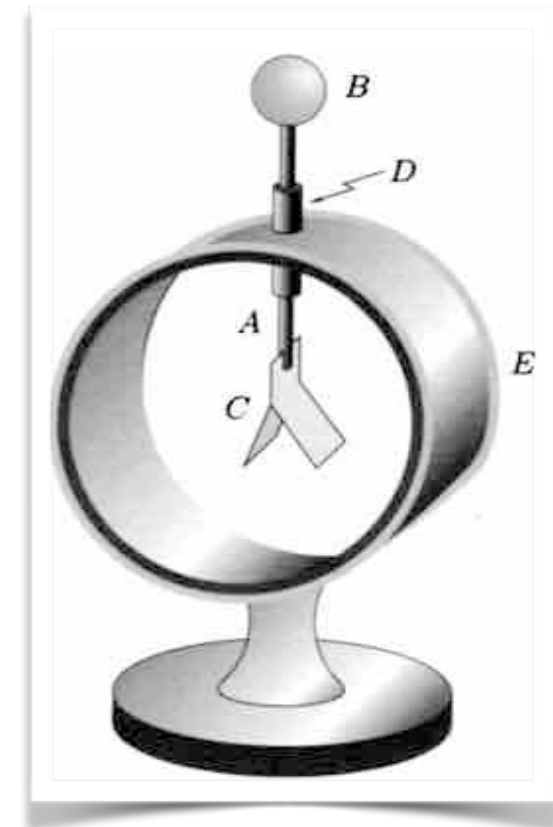
Il primo seme nella scoperta dei raggi cosmici fu gettato con gli studi sull'elettricità.



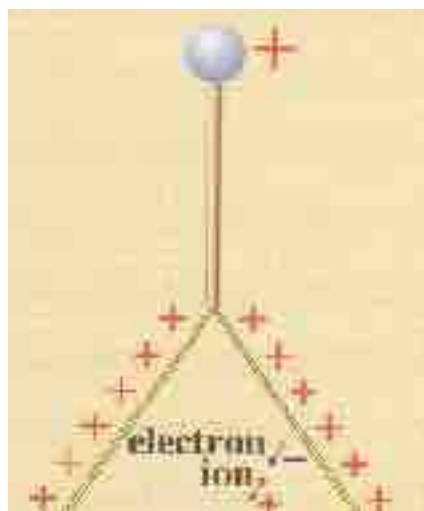
Elettrostatica: studio di quei fenomeni elettrici che vengono prodotti nello spazio o nei corpi che vi sono immersi dalle cariche elettriche libere, positive e negative, che si trovano disgiunte fra loro e in stato di equilibrio statico sui corpi comunque elettrizzati.

Elettroscopio: uno strumento che serve a rivelare la presenza di cariche elettriche e determinarne il segno.

Consiste di un'asta metallica con 2 sottilissime foglie d'oro saldate ad una delle estremità, collocata in un contenitore trasparente ed isolato. L'altra estremità è all'esterno del contenitore e termina con una sfera.



Se alla sfera si avvicina un corpo elettrizzato, le foglioline si caricano per induzione con cariche dello stesso segno e quindi si separano, respingendosi tra loro.



Succede qualcosa di strano...

Se non fosse per un isolamento imperfetto, sembrerebbe a prima vista che un elettroscopio debba mantenere per sempre la sua carica.

Nel 1785 **Coulomb** osservò un fatto apparentemente insignificante: **un corpo carico** (un elettroscopio) **perde spontaneamente la carica nonostante venisse ben isolato.**

→ primo esempio di conduzione elettrica nell'aria

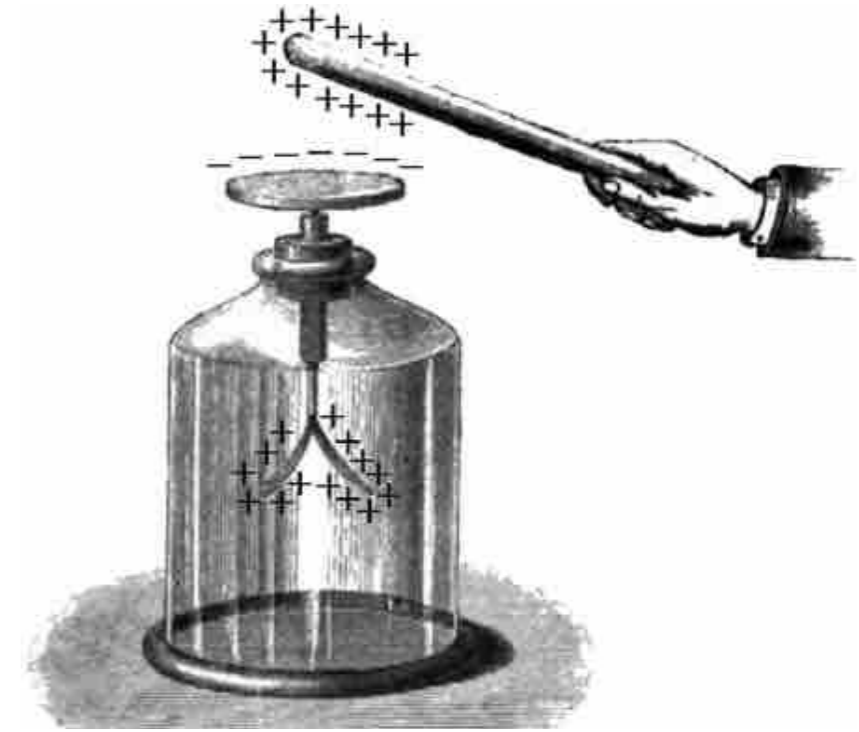
Perchè ?

Si pensò che l'isolamento non fosse ottimale e le particelle di polvere trasportassero via la carica elettrica

Ma nel 1835 **Faraday** confermò il fenomeno con una strumentazione meglio isolata.

Nel 1879 **Crookes** osservò che la velocità di scarica diminuiva quando la pressione veniva ridotta. Si concluse quindi che la causa diretta della scarica dell'elettroscopio dovesse essere la ionizzazione dell'aria contenuta nell'elettroscopio stesso.

Ma quale era la causa prima ?



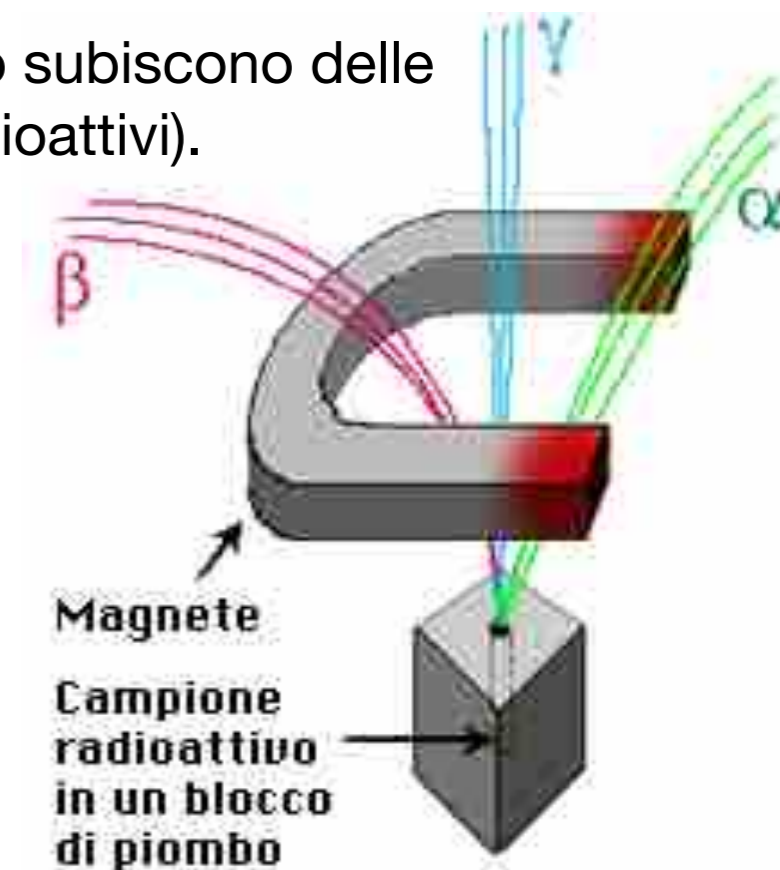
100 anni dopo: la radioattività

- Nel 1896 **Becquerel** scoprì la radioattività naturale.
- Nel 1898 **Marie e Pierre Curie** scoprirono che il Polonio ed il Radio subiscono delle trasmutazioni spontanee generando radioattività (decadimenti radioattivi).

La maggior parte dei nuclei non sono eterni ma hanno vita finita e si trasformano in altri nuclei emettendo particelle (α , β , γ).

Il decadimento radioattivo di un nucleo è un fenomeno puramente statistico, ossia non è possibile prevedere quali nuclei decadranno ma solo il ritmo (“rate”) di decadimento.

- In presenza di materiale radioattivo un elettroscopio carico si scarica più velocemente
- Alcuni elementi sono capaci di emettere particelle cariche che a loro volta possono causare la scarica degli elettroscopi.
- **Si può dunque concludere che la scarica spontanea degli elettroscopi possa essere dovuta a particelle cariche emesse nei decadimenti radioattivi.**
- La **velocità di scarica** di un elettroscopio può quindi essere usata per valutare il **livello di radioattività**



Da dove proviene la radioattività naturale ?

- Dal suolo ?
- Dal Sole ?
- Dall'atmosfera ?

All'inizio l'opinione dominante era che la quasi totalità della radioattività naturale provenisse dal suolo.

Si susseguirono numerosi esperimenti ma con risultati contraddittori e non conclusivi principalmente a causa dell'**inadeguatezza degli strumenti di misura**.

Tuttavia **l'opinione che l'origine della radioattività naturale fosse da ricercarsi nella crosta terrestre uscì rafforzata**.



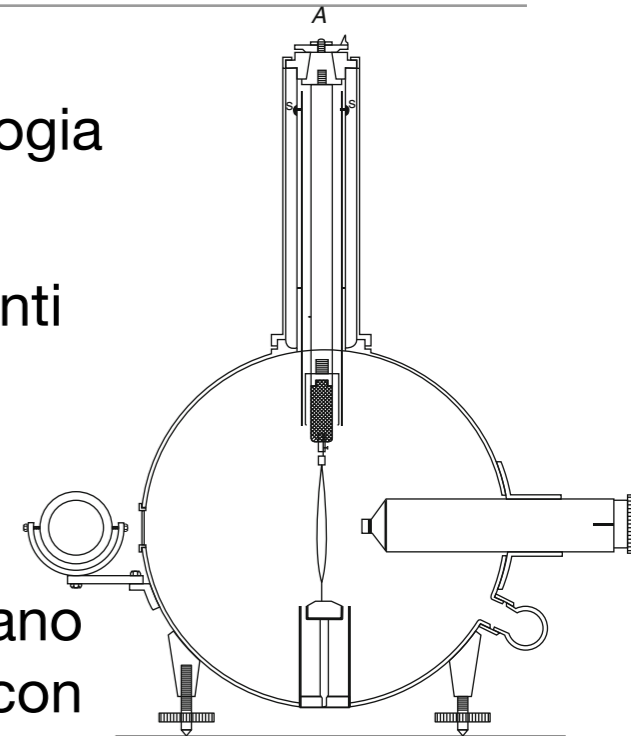
L'elettroscopio di Padre Wulf

Lo studio della velocità di scarica degli elettroscopi richiedeva una tecnologia sperimentale abbastanza sofisticata.

La ricerca dell'origine della radioattività naturale richiedeva che gli strumenti fossero trasportabili con facilità.



Padre Wulf costruì un elettroscopio dove le due foglie erano sostituite da due fili o lamelle di vetro metallizzato con silicio, con una molla di tensione di vetro posta nel mezzo.



Per mettere a punto lo strumento fece una serie di misure ottenendo risultati consistenti con l'ipotesi che la radiazione penetrante fosse causata da sostanze radioattive presenti negli strati superiori della crosta della Terra.

Wulf ebbe l'idea di **misurare la variazione di radioattività con l'altezza per capire la sua origine.**

L'idea era semplice: **se la radioattività veniva dalla Terra, essa sarebbe diminuita con l'altezza.**



L'esperimento di Wulf sulla torre Eiffel

Nel 1909-1910 Wulf portò con sé a Parigi l'elettroscopio da lui inventato e **misurò il tasso di ionizzazione a Parigi ed in cima alla Torre Eiffel** (a circa 300 metri di altezza).

Le osservazioni di Wulf furono di grande valore, perché i dati vennero registrati a diverse ore del giorno e per diversi giorni nello stesso luogo.

Ipotizzando che la maggior parte della radiazione fosse di origine terrestre **si aspettava di trovare in cima una ionizzazione minore di quella al suolo.**

Il tasso di ionizzazione mostrò, tuttavia, **un calo troppo piccolo per confermare l'ipotesi.**

Wulf concluse che, in confronto con i valori al suolo, **l'intensità della radiazione diminuisce "a circa 300 metri di nemmeno della metà del suo valore a terra"**, mentre nell'ipotesi che la radiazione emergesse dal terreno si aspettava che rimanesse in cima alla torre **"solo una piccola percentuale della radiazione a terra"**.

Wulf, tuttavia, concluse che la spiegazione più probabile del suo risultato era ancora l'emissione da parte del suolo.



Il contributo di Pacini



La congettura che la radioattività provenisse principalmente dalla crosta terrestre fu messa in dubbio dal fisico italiano *Domenico Pacini*, nato a *Marino* il 20 febbraio 1878.

A conclusione di una serie di misure del tasso di ionizzazione in montagna, sulla superficie di un lago, e sul mare Tirreno, nel 1911 Pacini realizzò un *innovativo esperimento* immergendo un elettroscopio in profondità nel tratto di mare antistante Livorno e poi nel lago di Bracciano, misurando una significativa diminuzione della radioattività in profondità rispetto alla superficie: *dimostrò così che parte della radiazione veniva dall'alto*.



Il Cacciatorpediniere "Fulmine" usato da Pacini nel 1910-1911

L'esperimento chiave

Nel 1911 Pacini ebbe l'idea vincente: **immergendo un elettroscopio alla profondità di 3 m nel mare** di fronte a Livorno (e poi nel lago di Bracciano) trovò una **significativa diminuzione della ionizzazione** (20%, a livello di 4.3 deviazioni standard).

In un articolo sul Nuovo Cimento pubblicato nel 1912 Pacini concluse

... appare confermino le esperienze di cui è oggetto questa nota [. . .] che **esista nell'atmosfera una sensibile causa ionizzante, con radiazioni penetranti, indipendente dall'azione diretta delle sostanze radioattive del terreno.**

Fu la scoperta dei Raggi Cosmici ?

La tecnica di Pacini non poteva escludere con certezza un'origine atmosferica della radiazione.

Ma questa ***fu la prima volta in cui venne stabilito che i risultati di molti esperimenti sulla radiazione non potevano essere spiegati dalla radioattività della crosta terrestre.***

L'esperimento di Pacini segnò l'inizio della tecnica subacquea, e più in generale degli esperimenti sottoterra, per gli studi dei raggi cosmici.

L'apparecchio fu disposto a bordo della medesima lancia che fu ancorata a oltre 300 metri dalla costa, sopra 8 m. di fondo e dal 24 al 31 giugno si fecero delle osservazioni coll'apparecchio alla superficie, e coll'apparecchio immerso nelle acque, a 3 m. di profondità.

Ecco i risultati di queste osservazioni, ciascuna delle quali ha all'incirca la durata di 3 ore:

Coll'apparecchio alla superficie del mare si ebbe una perdita oraria di Volta:

13,2 — 12,2 — 12,1 — 12,6 — 12,5 — 13,5 — 12,1 — 12,7

media 12,6 equivalente a ioni 11 per cm³ al 1".

Coll'apparecchio immerso:

10,2 — 10,3 — 10,3 — 10,1 — 10,0 — 10,6 — 10,6.

media 10,3 equivalente a ioni 8,9 per cm³ al 1".

La differenza fra questi due valori è di ioni 2,1.

Il coefficiente d'assorbimento per l'acqua essendo 0,034 è facile dedurre dalla nota equazione $\frac{I}{I_0} = e^{-\lambda d}$, dove d è lo spessore di materia traversata, che nelle condizioni delle mie esperienze, l'azione del fondo e quella della superficie erano trascurabili.

Hess 1912: la scoperta dei Raggi Cosmici

Negli anni 1911-12 Hess realizzò una serie di voli con pallone ad altissima quota utilizzando **tre diversi strumenti di misura della radioattività** (racchiusi in contenitori con pareti metalliche di spessori differenti per stimare l'effetto della radiazione beta).

Il volo finale fu quello decisivo: il **7 agosto del 1912**, Hess raggiunse i **5200 metri** di quota a bordo della mongolfiera "Böhmen" (Boemia) durante un viaggio di sei ore da Aussig, nella Boemia settentrionale, a **Bad Saarow-Pieskow**, un villaggio a una sessantina di chilometri a est di Berlino.



7 Agosto 1912: il volo decisivo

Table I. Data taken during Hess's 7th flight in 1912.

Balloon "Böhmen" (1680 cbm hydrogen)
 Meteorological observer: E. Wolf.

Leader: Captain W. Hoffory.
 Electr. observer: V. F. Hess

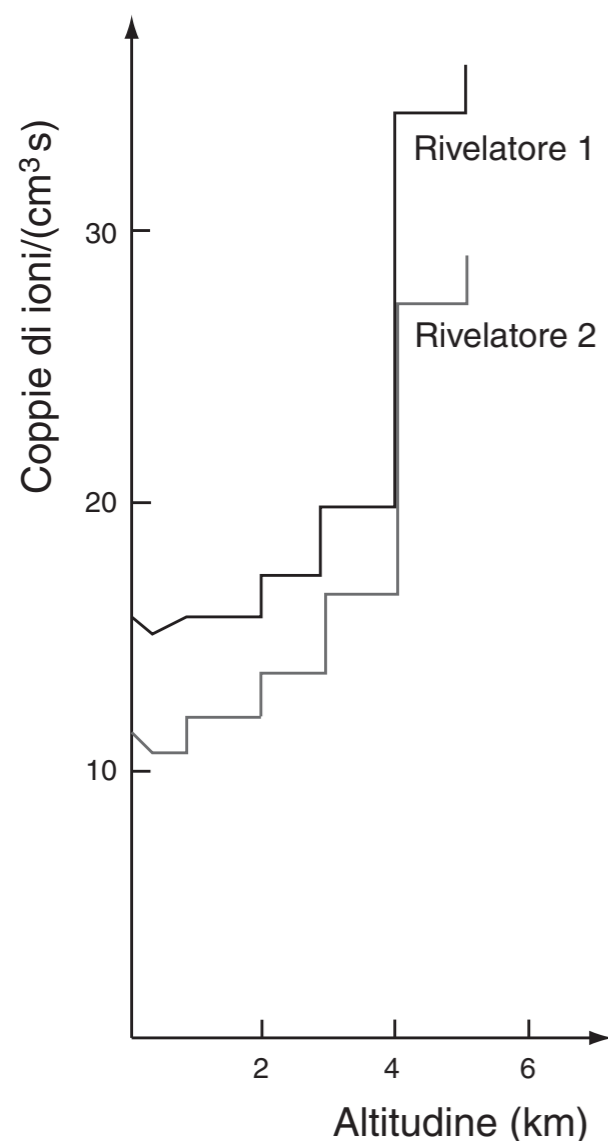
No.	Time	Mean height		Observed radiation				Temp.	Rel. humidity %
		abs. m	rel. m	Inst. 1	Inst. 2	Inst. 3			
				q_1	q_2	q_3	red. q_3		
1	15 ^h 15–16 ^h 15	156	0	17.3	12.9	1½ days before the ascent (in Vienna)	
2	16 ^h 15–17 ^h 15	156	0	15.9	11.0	18.4	18.4		
3	17 ^h 15–18 ^h 15	156	0	15.8	11.2	17.5	17.5		
4	6 ^h 45– 7 ^h 45	1700	1400	15.8	14.4	21.1	25.3	+ 6.4°	60
5	7 ^h 45– 8 ^h 45	2750	2500	17.3	12.3	22.5	31.2	+ 1.4°	41
6	8 ^h 45– 9 ^h 45	3850	3600	19.8	16.5	21.8	35.2	– 6.8°	64
7	9 ^h 45–10 ^h 45	4800	4700	40.7	31.8	(ended by accident)		– 9.8°	40
		(4400–5350)							
8	10 ^h 45–11 ^h 15	4400	4200	28.1	22.7		
9	11 ^h 15–11 ^h 45	1300	1200	(9.7)	11.5		
10	11 ^h 45–12 ^h 10	250	150	11.9	10.7			+ 16.0°	68
11	12 ^h 25–13 ^h 12	140	0	15.0	11.6			(After landing at Pieskow, Brandenburg)	

"Schermati"

Sensibile α, β, γ

La ionizzazione risultò il doppio di quella a terra !!!

Il segnale aumenta con l'altitudine



I risultati mostrarono chiaramente che la ionizzazione, dopo essere passata per un minimo, aumentava considerevolmente con l'altezza.

Hess trovò che:

- (i) immediatamente sopra al suolo la radiazione totale diminuisce leggermente;
- (ii) a un'altitudine fra i 1000 e i 2000 metri avviene un leggero riaumento della radiazione penetrante;
- (iii) l'aumento raggiunge, a un'altitudine fra i 3000 e i 4000 metri, già il 50% della radiazione totale che si osserva al suolo;
- (iv) *tra i 4000 e i 5200 metri la radiazione è più forte di oltre il 100% che al suolo.*

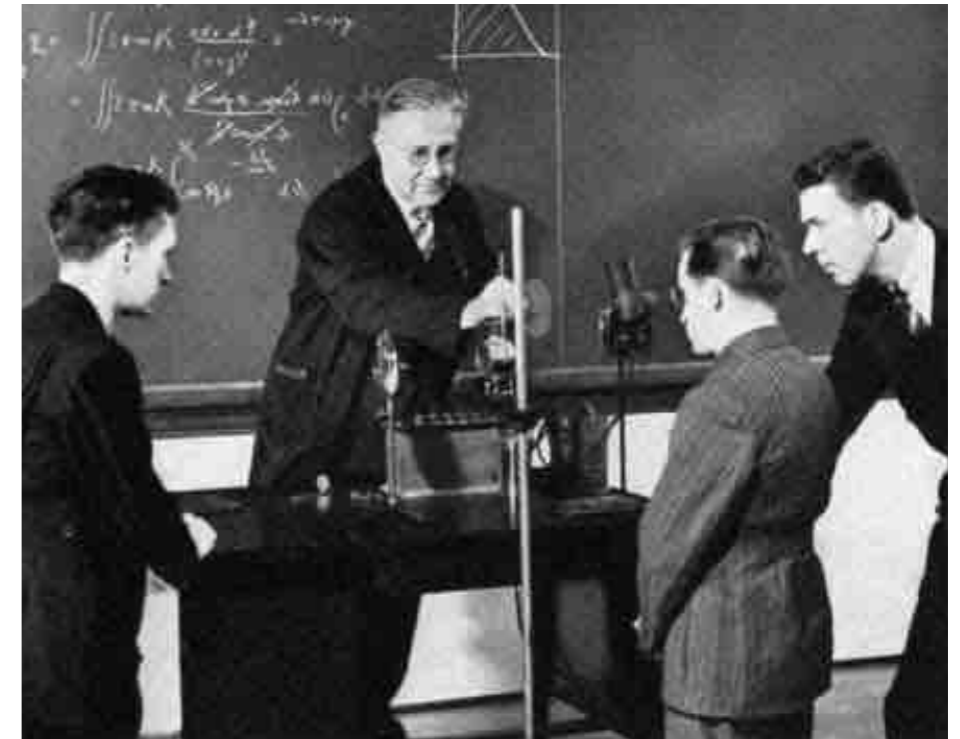
Hess concluse che l'aumento della ionizzazione con l'altezza deve dipendere dal fatto che la radiazione proviene dall'alto, e **pensò che questa radiazione fosse di origine extraterrestre.**

Il Premio Nobel a Hess

Nel **1936** Victor Hess, il primo a comprenderne l'origine, vince il **Premio Nobel per la Fisica** con questa motivazione

“...con eccezionale abilità sperimentale scoprì la sorprendente presenza di radiazione proveniente dalle profondità dello spazio, la radiazione cosmica. ...”

*La presenza di questa radiazione ci pone nuovi, importanti problemi circa la formazione e la distruzione della materia, problemi che aprono **nuovi campi di ricerca.**”*



In un libro scritto nel 1949 (*Cosmic radiation and its biological effects*, Fordham University Press) **Hess riconobbe i meriti di Pacini**

*“The first who expressed some doubts as to the correctness of this view was **D. Pacini**, who, in 1910, from measurements over sea and on shores at Livorno **concluded that part of the observed ionization might be due to sources other than the known radioactive substances.**”*

I raggi cosmici sono carichi o neutri ?

Si credeva che la radiazione cosmica fosse costituita da **raggi gamma** di altissima energia a causa del loro potere di penetrazione.

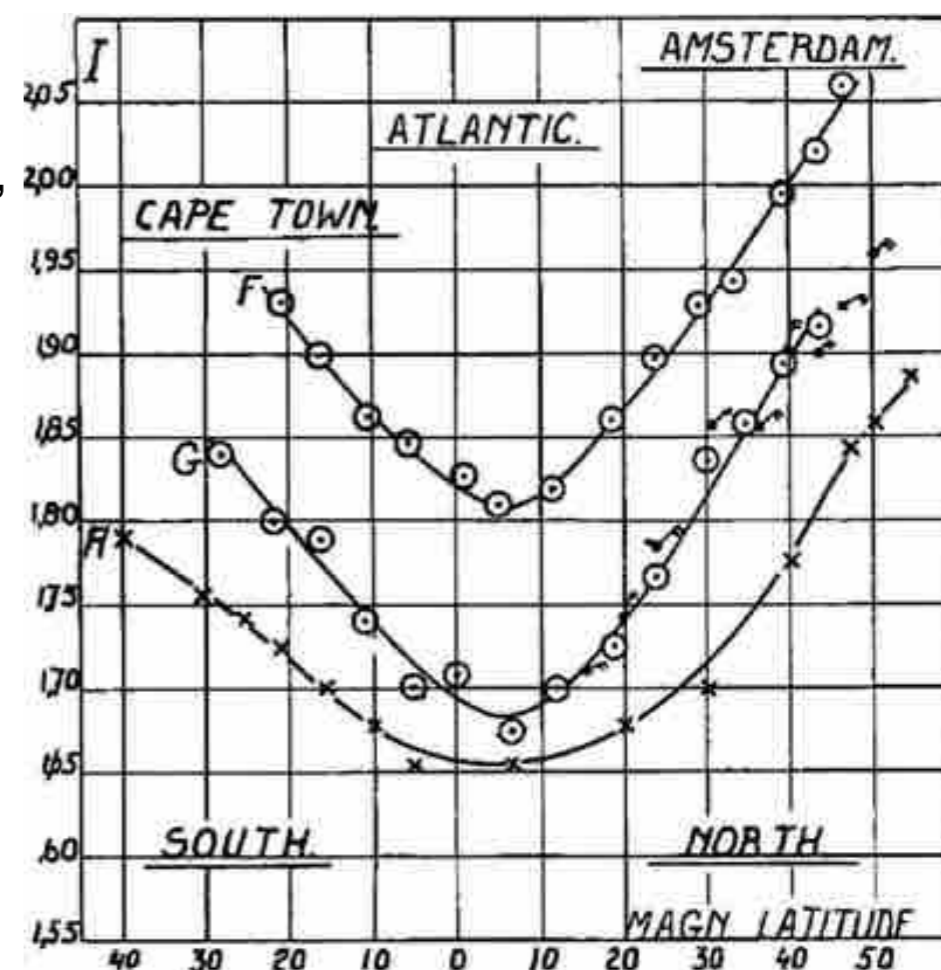
Millikan aveva proposto l'ipotesi che questo tipo di raggi gamma venissero prodotti quando i protoni e gli elettroni formano nuclei di elio nello spazio interstellare.

Un esperimento cruciale, che avrebbe stabilito la natura dei raggi cosmici (e in particolare se fossero carichi o neutri), fu la **misurazione della dipendenza dell'intensità dei raggi cosmici dalla latitudine geomagnetica**.

Il campo magnetico terrestre, infatti, devia le particelle cariche, fatto che induce una disomogeneità nel flusso di tali particelle provenienti dall'esterno a diverse latitudini.

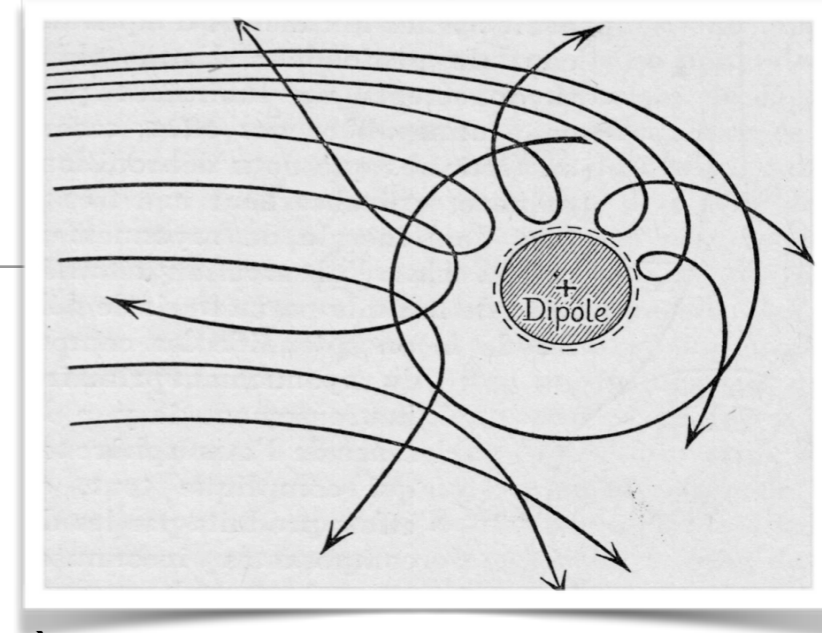
Clay 1927-1928: la ionizzazione aumentava con la latitudine in modo riproducibile. Variazioni di questo genere non si sarebbero attese se la radiazione fosse stata di tipo gamma.

Ma sono particelle positive o negative ?



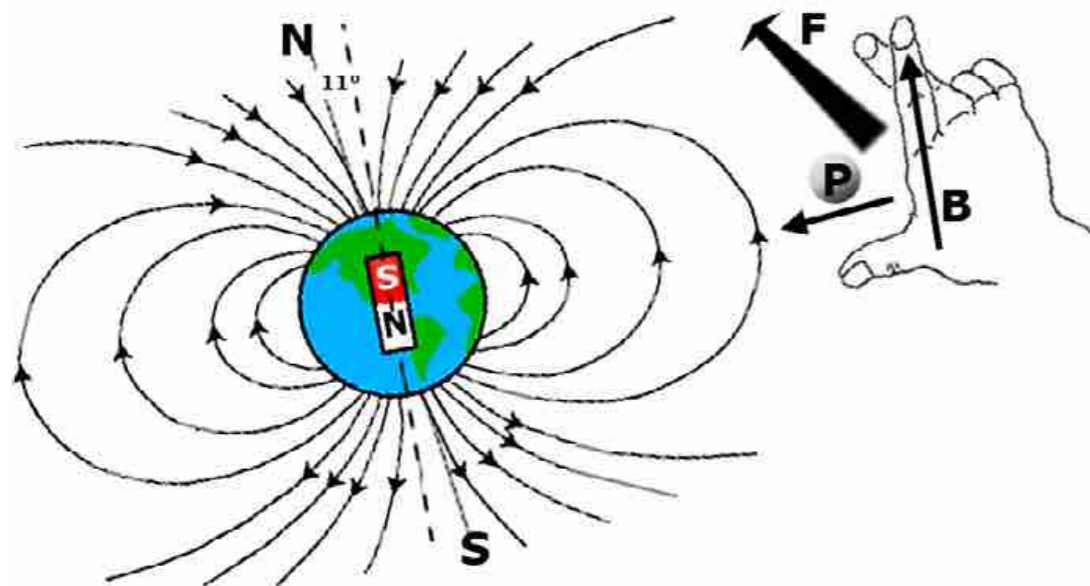
Il Campo Magnetico terrestre

Nel 1930 B. Rossi ebbe l'idea di utilizzare il campo magnetico terrestre per **misurare se le particelle cosmiche avessero carica positiva o negativa.**



La Terra è come un grosso magnete con il polo nord magnetico in prossimità del polo sud geografico e il polo sud magnetico quasi in corrispondenza del polo nord geografico.

Le particelle cariche che si muovono in un campo magnetico vengono deviate dalla forza di Lorentz.



Questo produce un effetto di sbarramento nella **zona equatoriale**, dove le linee di campo magnetico sono praticamente parallele alla superficie terrestre e quindi **le particelle vengono limitate.**

Mentre **ai poli** dove le linee di campo sono praticamente perpendicolari alla superficie (parallele alla direzione di moto delle particelle), **lo sbarramento è nullo.**

Considerando un protone P in direzione radiale verso la Terra, si vede che esso incontra all'equatore le linee di flusso magnetico perpendicolarmente e quindi subisce la **massima deviazione possibile verso Est.** Viceversa per le cariche negative.

Lo stesso protone non subisce deviazioni ai poli, dove le linee di usso sono parallele.

Il campo magnetico non blocca affatto le particelle di alta energia

L'effetto Est-Ovest

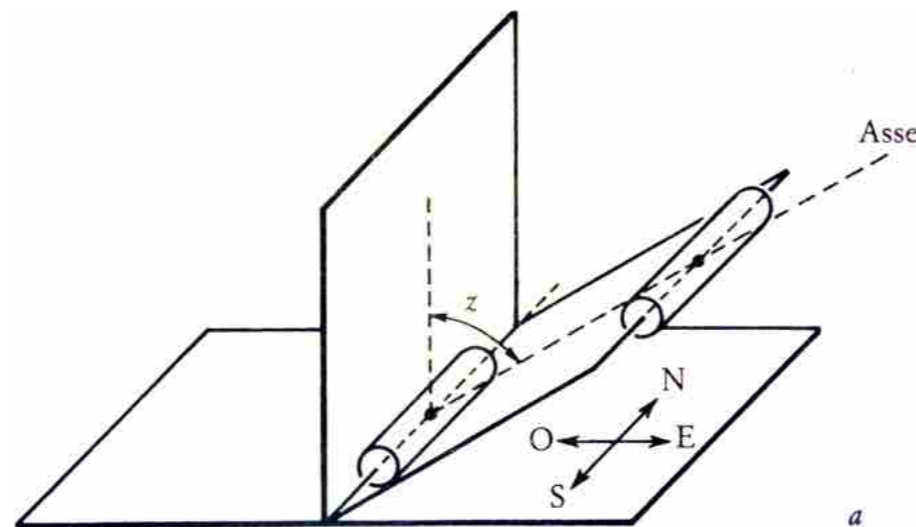
Se i raggi cosmici sono prevalentemente particelle di **carica positiva**, per l'interazione con il campo magnetico terrestre appariranno provenire prevalentemente da **Ovest**.

Se sono particelle **negative** appariranno provenire prevalentemente da **Est**.



Rossi durante una spedizione in **Eritrea** misurò un'**asimmetria del 26%** con prevalenza di particelle cariche provenienti da Ovest.

Sorpresa: un flusso maggiore da Ovest
→ i RC sono prevalentemente di carica positiva !



Primo telescopio per Raggi Cosmici → Coincidenza!!!

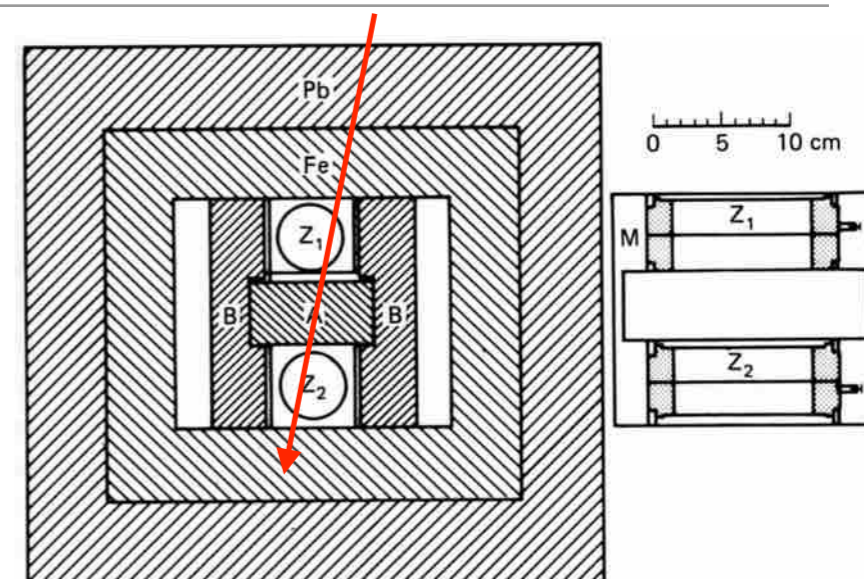
Il circuito di coincidenza

Bothe e Kolhorster nel 1929 fecero un esperimento mettendo per la prima volta in coincidenza i 2 rivelatori Z_1 e Z_2 .

La risoluzione temporale era di circa $1/100$ s.

Lo schermaggio di Pb e Fe elimina la radioattività naturale, quindi solo i raggi cosmici sono in grado di raggiungere i rivelatori.

Sorpresa ! Ben il 76% di tutte le particelle in coincidenza senza il blocco di oro erano in grado di attraversare 4.1 cm di oro !



Enorme potere penetrante delle particelle ionizzanti responsabili delle coincidenze doppie.

La **tecnica di coincidenza** consente di dire se un evento si è verificato 'contemporaneamente' (entro un intervallo di tempo prestabilito) tra due punti diversi e quindi, in particolare, di tracciare la direzione di provenienza di una particella.

La coincidenza stabilisce una correlazione temporale fra particelle associate allo stesso evento fisico che attraversano più rivelatori.

Il limite del circuito di Bothe era che **era possibile solo una coincidenza doppia**: cioè solo 2 rivelatori potevano essere messi in coincidenza.

Bothe per questa realizzazione vinse il **Premio Nobel nel 1954**.

Il ruolo di Bruno Rossi

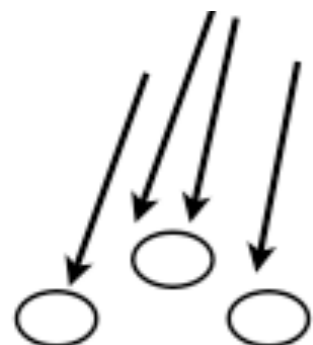
Bruno Rossi (Venezia 1905 - Boston 1993) fu uno dei principali protagonisti nello studio della fisica dei Raggi Cosmici.



Pochi mesi dopo, nel 1930, Bruno Rossi mise a punto un circuito di coincidenza concettualmente diverso da quello di Bothe ed in grado di ottenere coincidenze multiple, cioè di utilizzare molti rivelatori a grandi distanze con una risoluzione temporale di 0.4 ms.

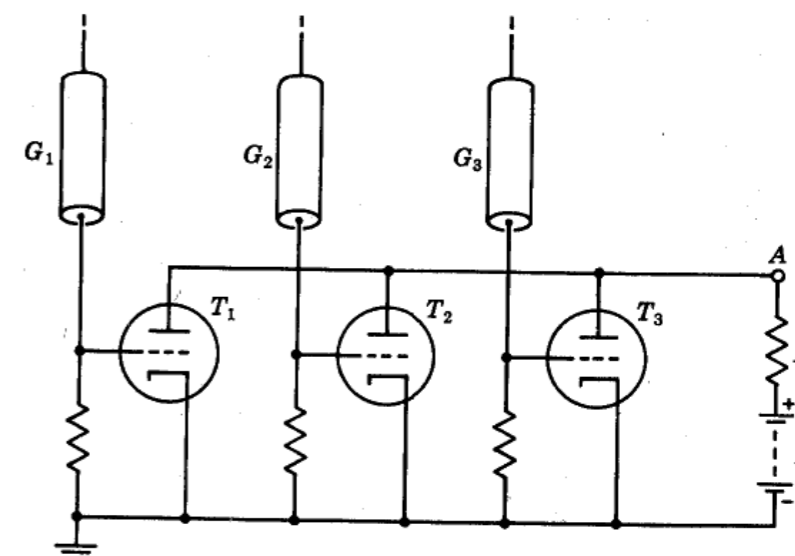
➔ una rivoluzione tecnologica !

In particolare, l'utilizzo di una coincidenza tripla (tra 3 rivelatori) fu decisiva per abbattere il fondo di casuali e rivelare eventi di raggi cosmici rari.



"... the triple coincidences method is the only one available for studying the form of the paths of cosmic rays, and I mean to employ it in experiments on the magnetic deviation of these radiations".

Bruno Rossi

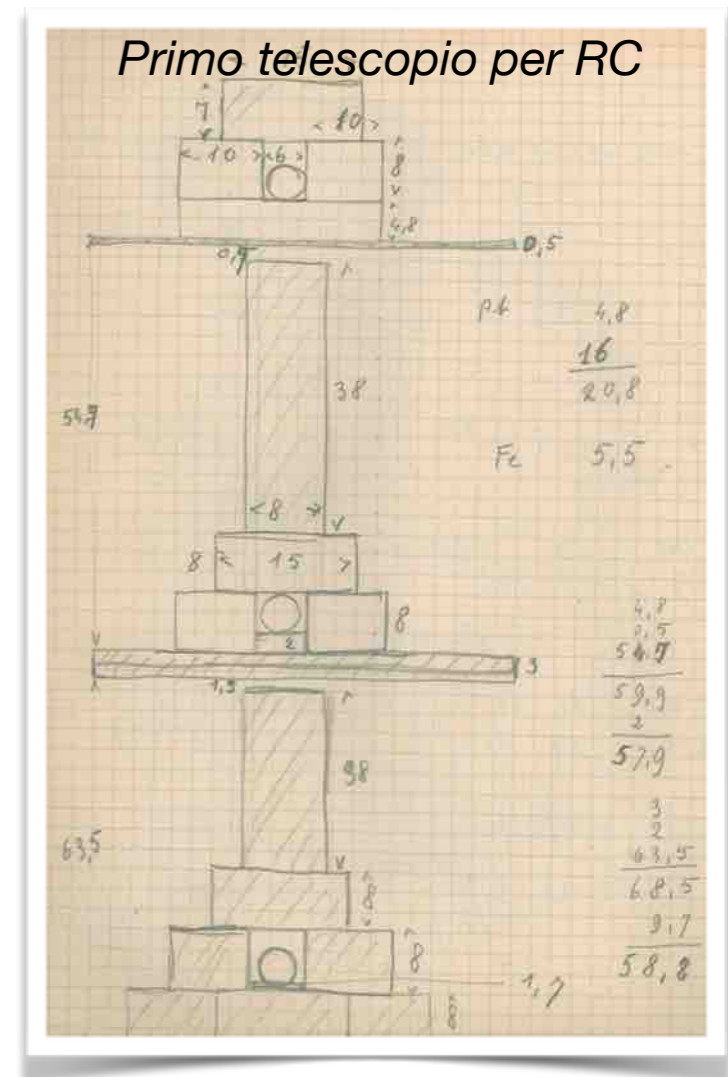
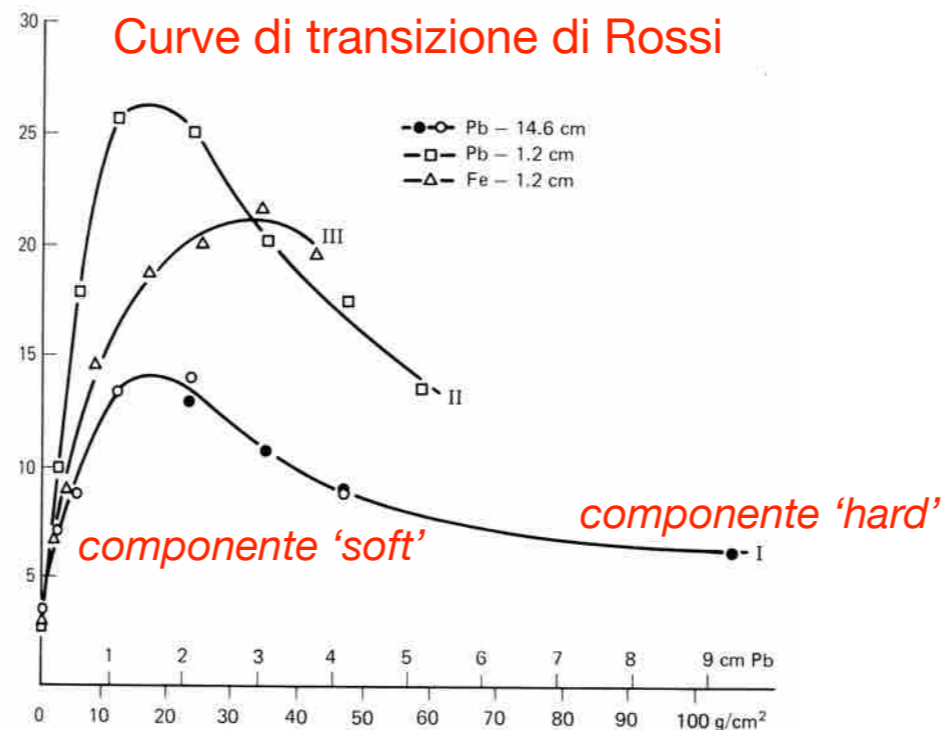
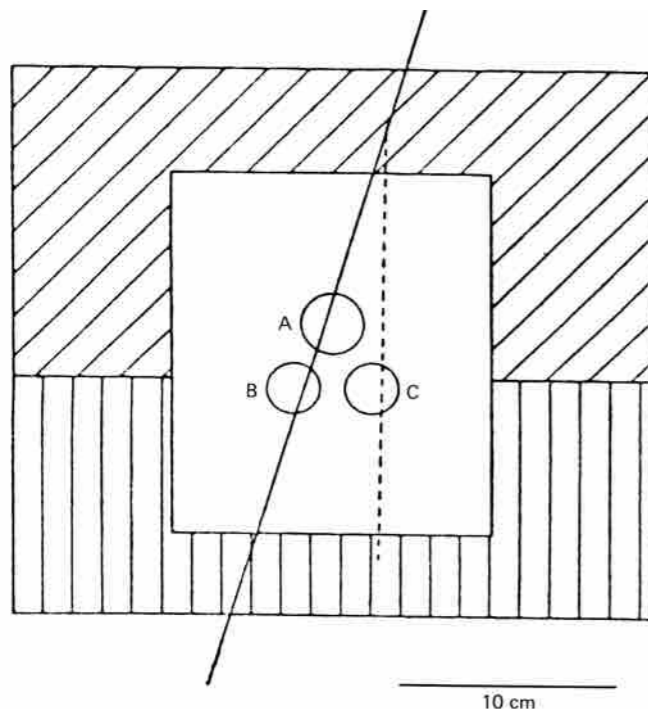


Circuito di coincidenza tripla pubblicato su Nature nel 1930.

La scoperta di una 'componente penetrante'

I contributi di Bruno Rossi alla fisica dei Raggi Cosmici sono stati numerosi e molto importanti. Tra questi ricordiamo la scoperta della 'componente penetrante' e delle *interazioni con la materia*.

Questo esperimento fu così 'rivoluzionario' che ci fu chi pensò non funzionasse il metodo di coincidenza.



Rossi osservò che:

1. il 50% delle particelle sono in grado di attraversare 1 metro di piombo (energia $> 10^{10}$ eV) !
2. un rapido aumento delle coincidenze triple (*produzione di particelle nell'assorbitore*) ed una successiva rapida diminuzione delle particelle al crescere dello spessore di assorbitore (*componente 'soft'*). Da un certo spessore in poi il numero di particelle diventa quasi costante (*componente 'hard'*).

Ma, sorpresa ancora più grande...

Rossi riportò durante un test delle apparecchiature l'**osservazione di scariche quasi simultanee di contatori Geiger molto distanti tra loro** posti su un piano orizzontale e scrisse nel 1934

La frequenza delle coincidenze registrate con i contatori lontani l'uno dall'altro e indicata nelle tabelle sotto il nome di "coincidenze casuali", appare più elevata di quella che sarebbe stata prevedibile [...]. Ciò fece nascere il dubbio che tali coincidenze non fossero, in realtà, tutte casuali [...].

Parrebbe dunque [...], che di tanto in tanto giungessero sugli apparecchi degli sciami molto estesi di corpuscoli, i quali determinassero coincidenze fra contatori anche piuttosto lontani l'uno dall'altro.

Mi è mancato purtroppo il tempo di studiare più da vicino questo fenomeno per stabilire con sicurezza l'esistenza dei supposti sciami di corpuscoli ed investigarne l'origine.

Bruno Rossi

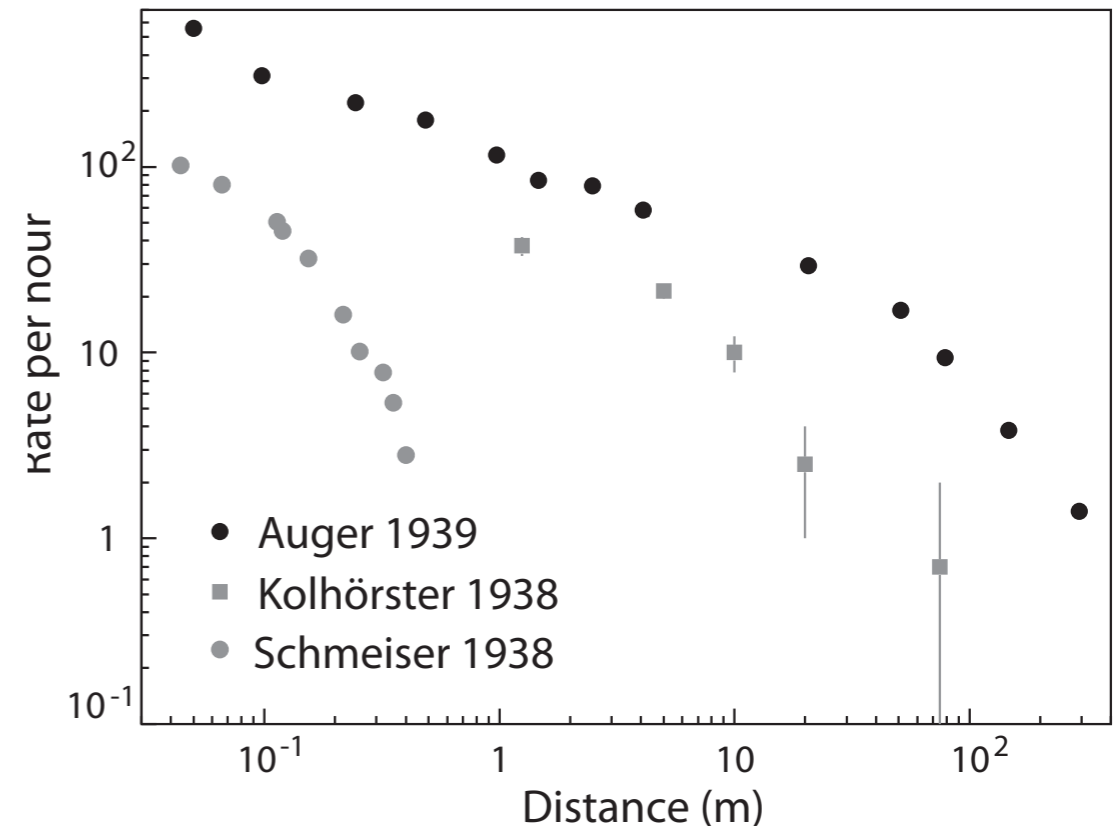
La prima osservazione di Sciame Atmosferico Esteso !

La scoperta degli Sciami Atmosferici Estesi

Rossi fu il primo ad intuire l'esistenza di **'Sciami'** molto estesi di corpuscoli in grado di determinare coincidenze fra contatori anche piuttosto lontani l'uno dall'altro.

Successivamente Kolhorster (1938) misurò la **curva di decoerenza tra 2 rivelatori**, cioè il numero di coincidenze (rate) tra 2 rivelatori in funzione della loro distanza.

Queste misure dimostrarono che sciami di particelle colpiscono 'contemporaneamente' i 2 rivelatori e che si tratta dello stesso fenomeno osservato da Rossi nel 1930.



Nonostante ciò **la scoperta degli Sciami Atmosferici Estesi viene attribuita a Pierre Auger.**

Auger portò la risoluzione dei circuiti di coincidenza a 5 μ s e misurò la curva di decoerenza **fino a 300 m**, stimando l'energia di questi sciami dell'ordine di **10^{15} eV** !

Sia Auger che Kolhorster non erano al corrente delle misure fatte da Rossi.

Gli Sciame Atmosferici Estesi (EAS)

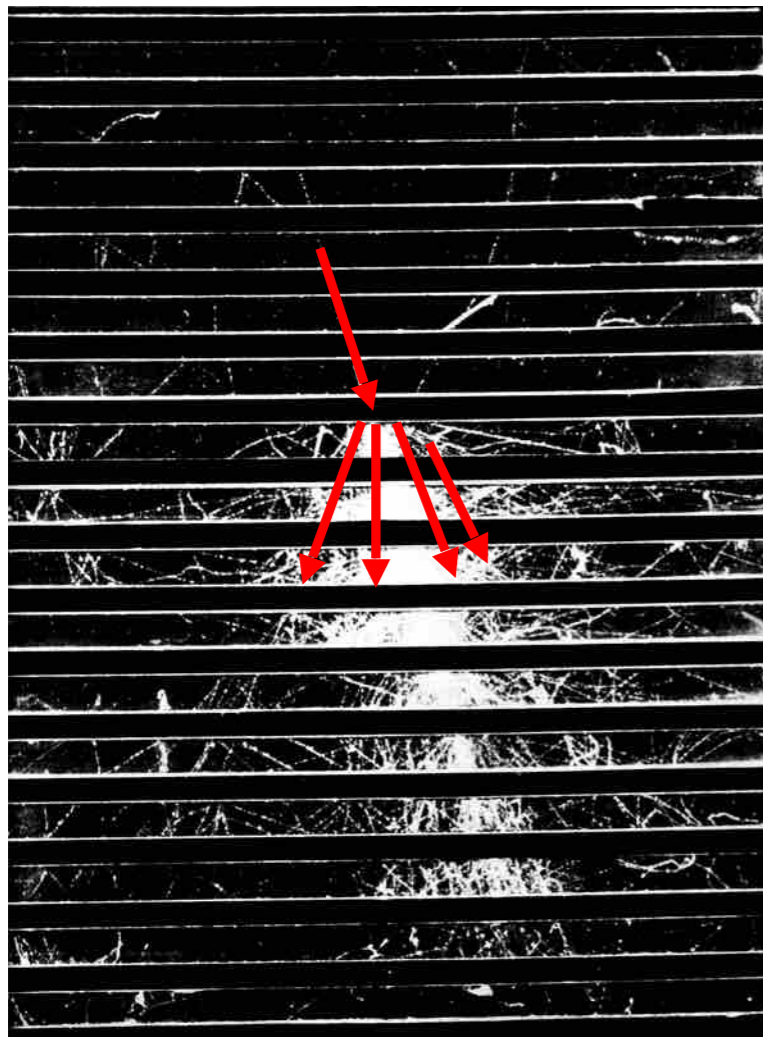
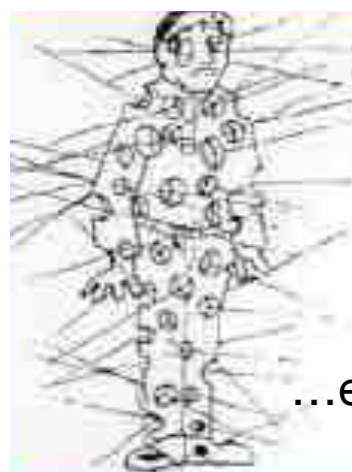
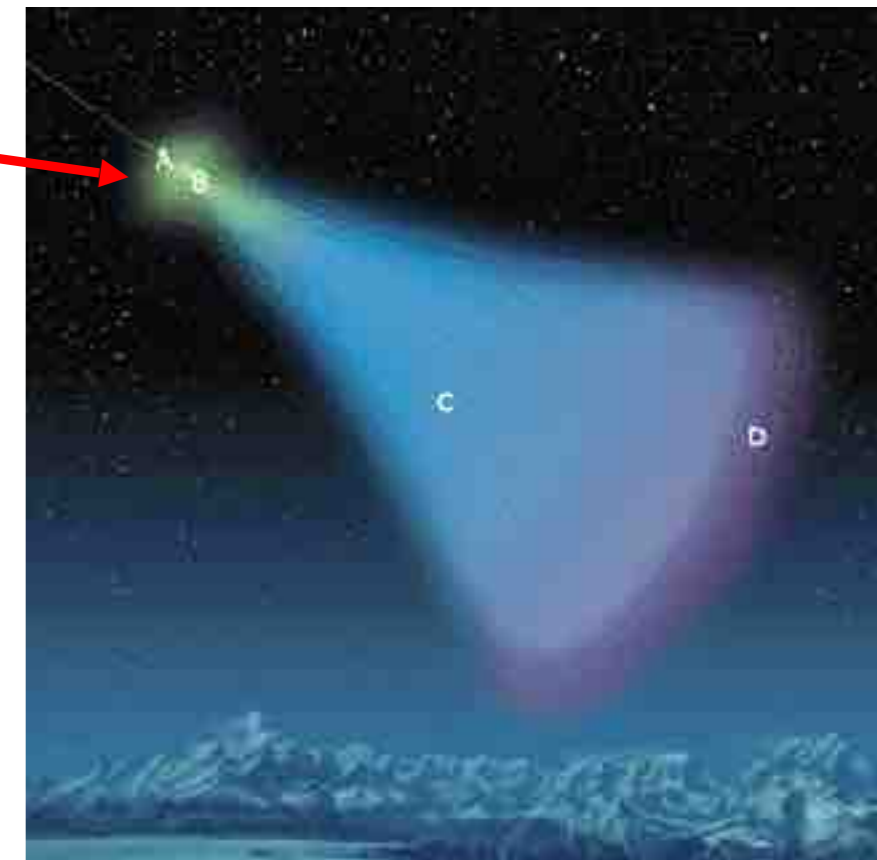
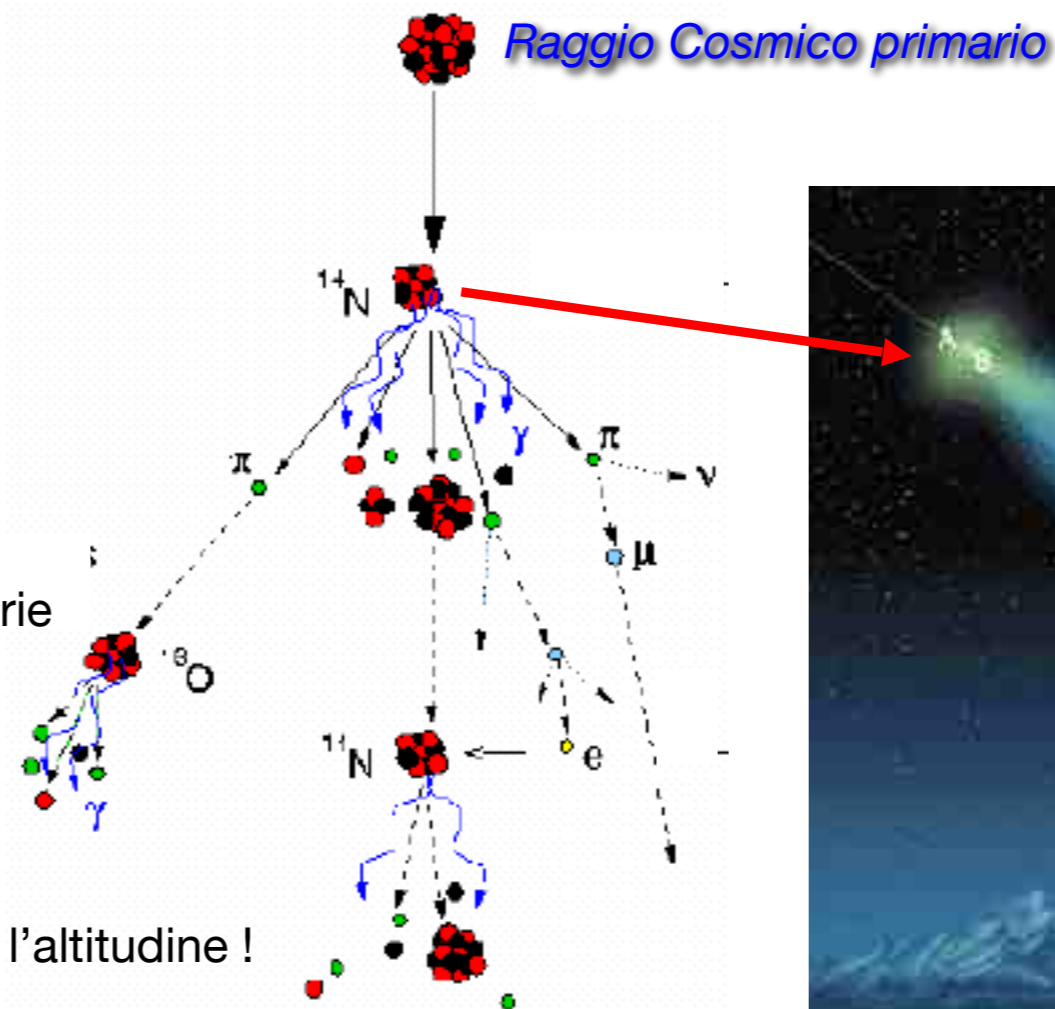


Immagine di una cascata di particelle o *'sciame'* osservato in una camera a nebbia a 3000 m slm e generato da un protone di circa 10 GeV.

Gli EAS sono il risultato dell'interazione dei Raggi Cosmici con l'atmosfera.



Oltre 100 particelle secondarie di sciame attraversano il nostro corpo ogni secondo

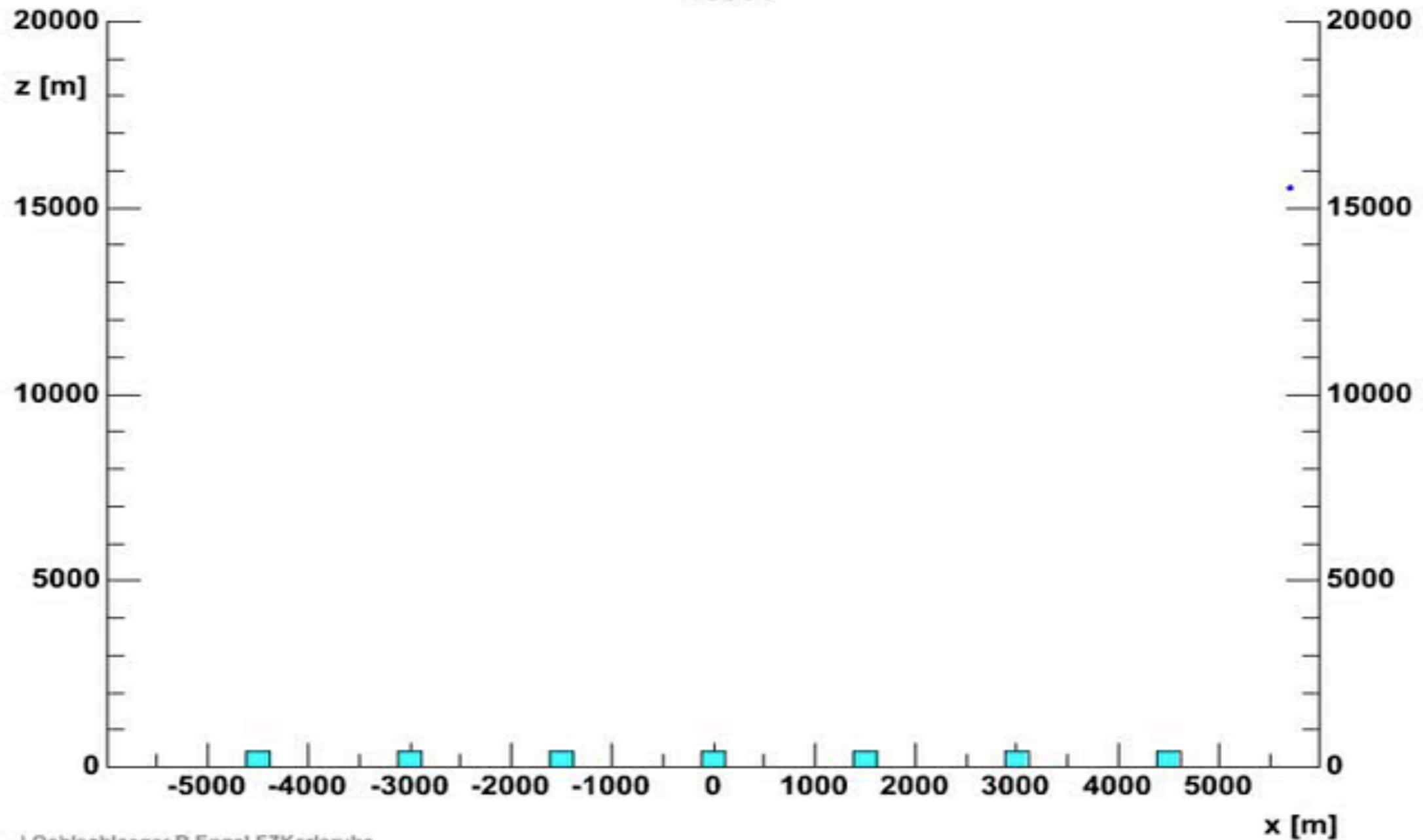
...e l'esposizione aumenta con l'altitudine !

Lo sviluppo di uno Sciame Esteso

hadrons muons electrs neutrs

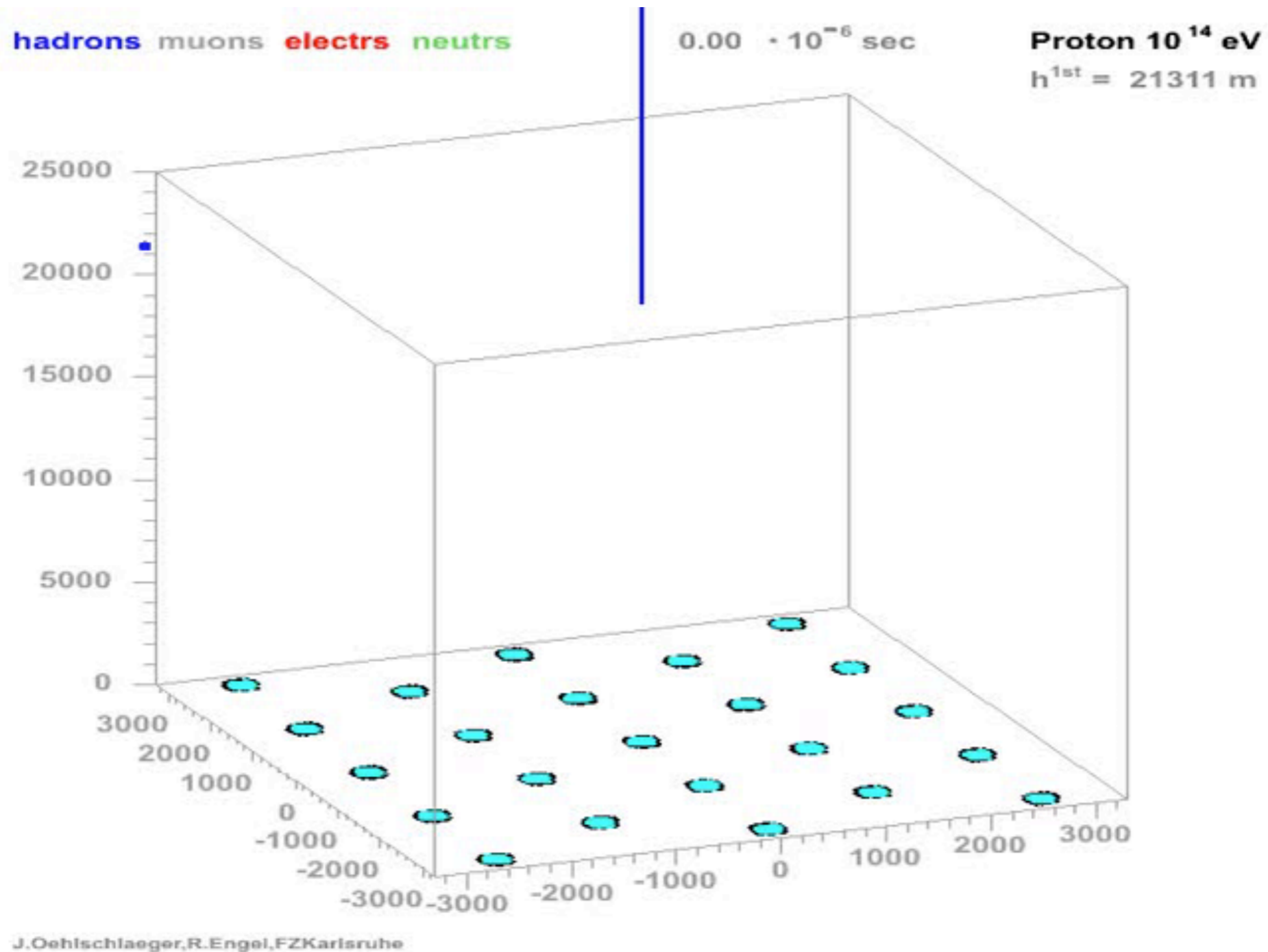
15514

Proton 10^{15} eV



J.Oehlschlaeger,R.Engel,FZKarlsruhe

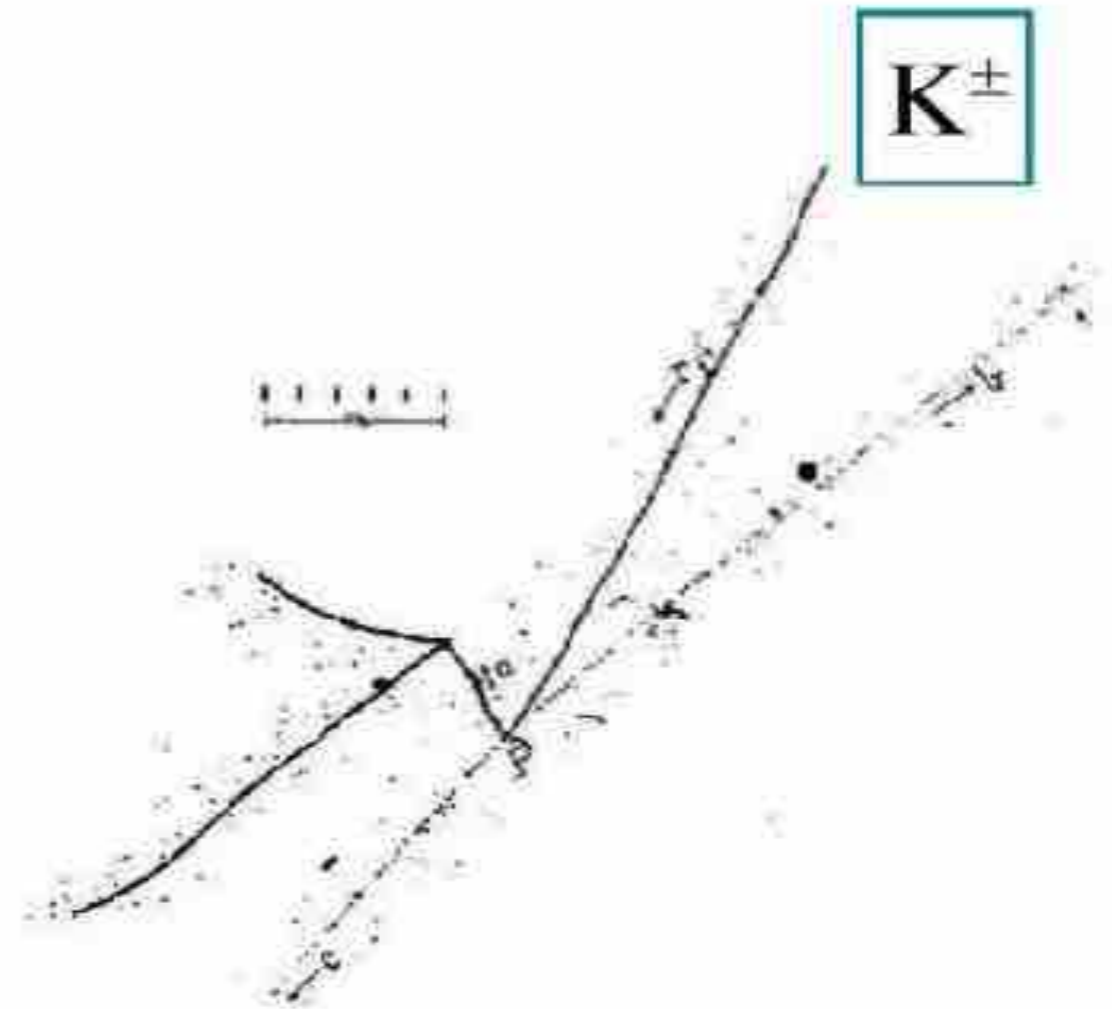
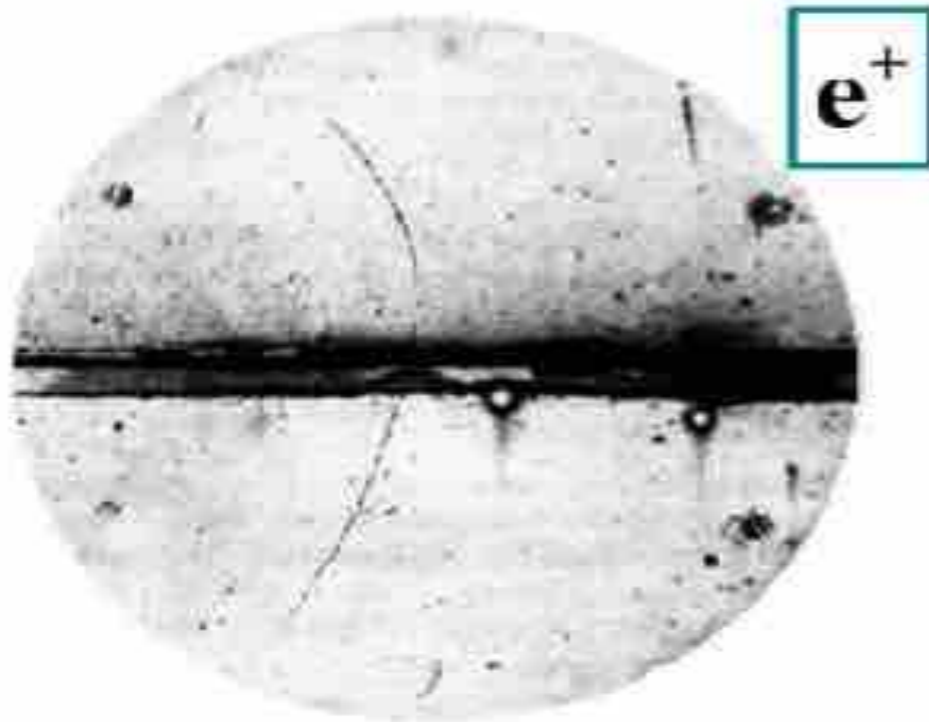
Lo sviluppo di uno Sciame Esteso



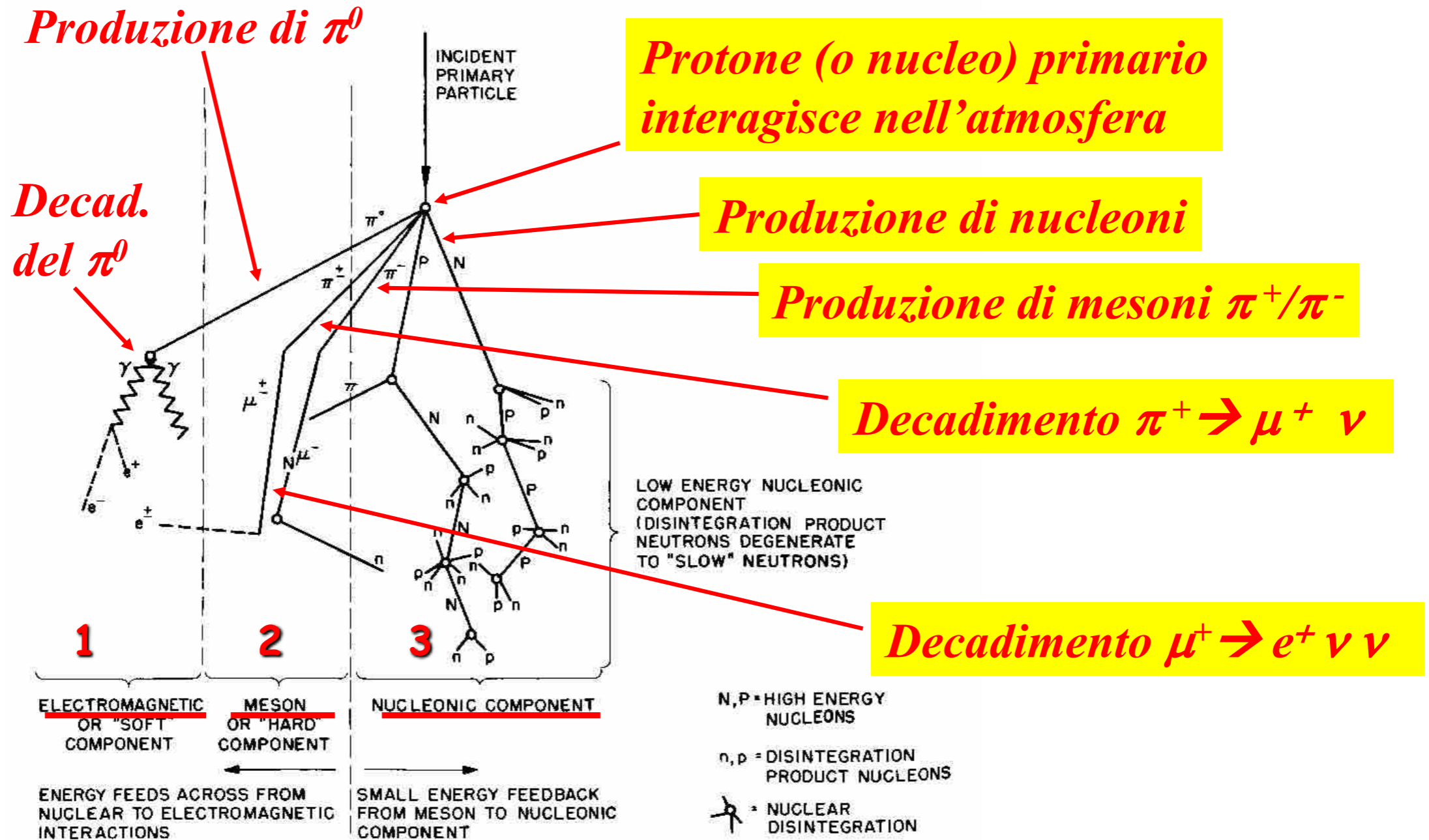
Prende vita la fisica delle particelle elementari

I Raggi Cosmici sono i primi acceleratori di particelle

e sono gratis...!!!

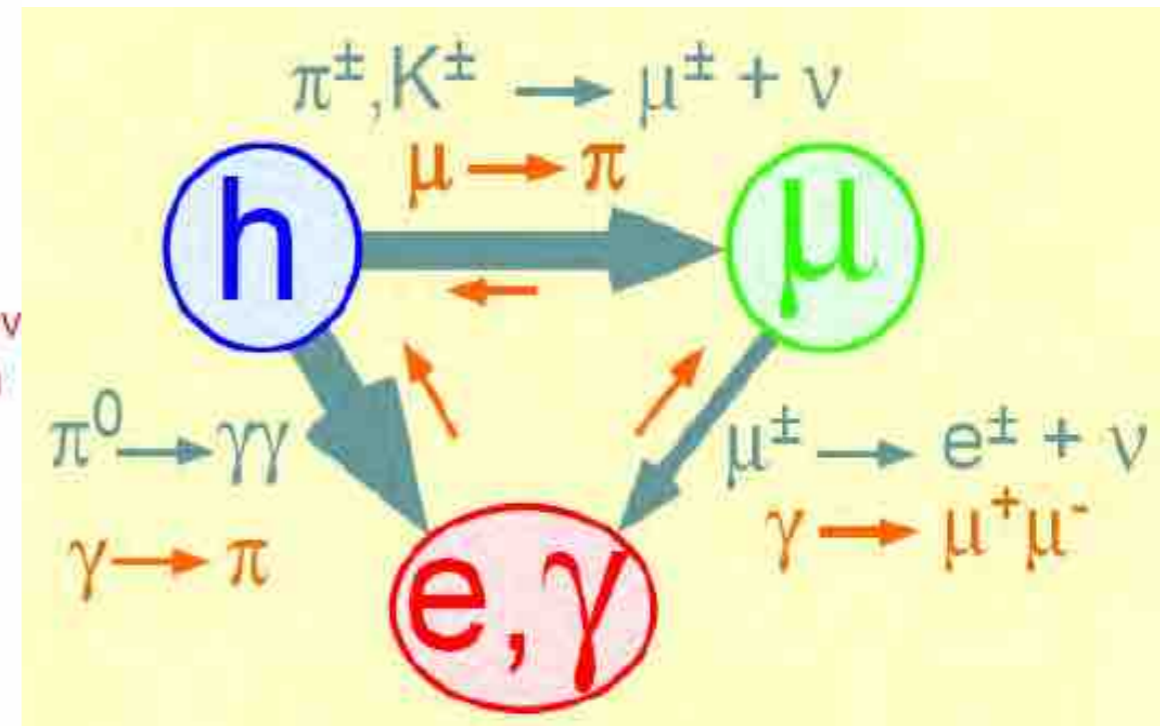
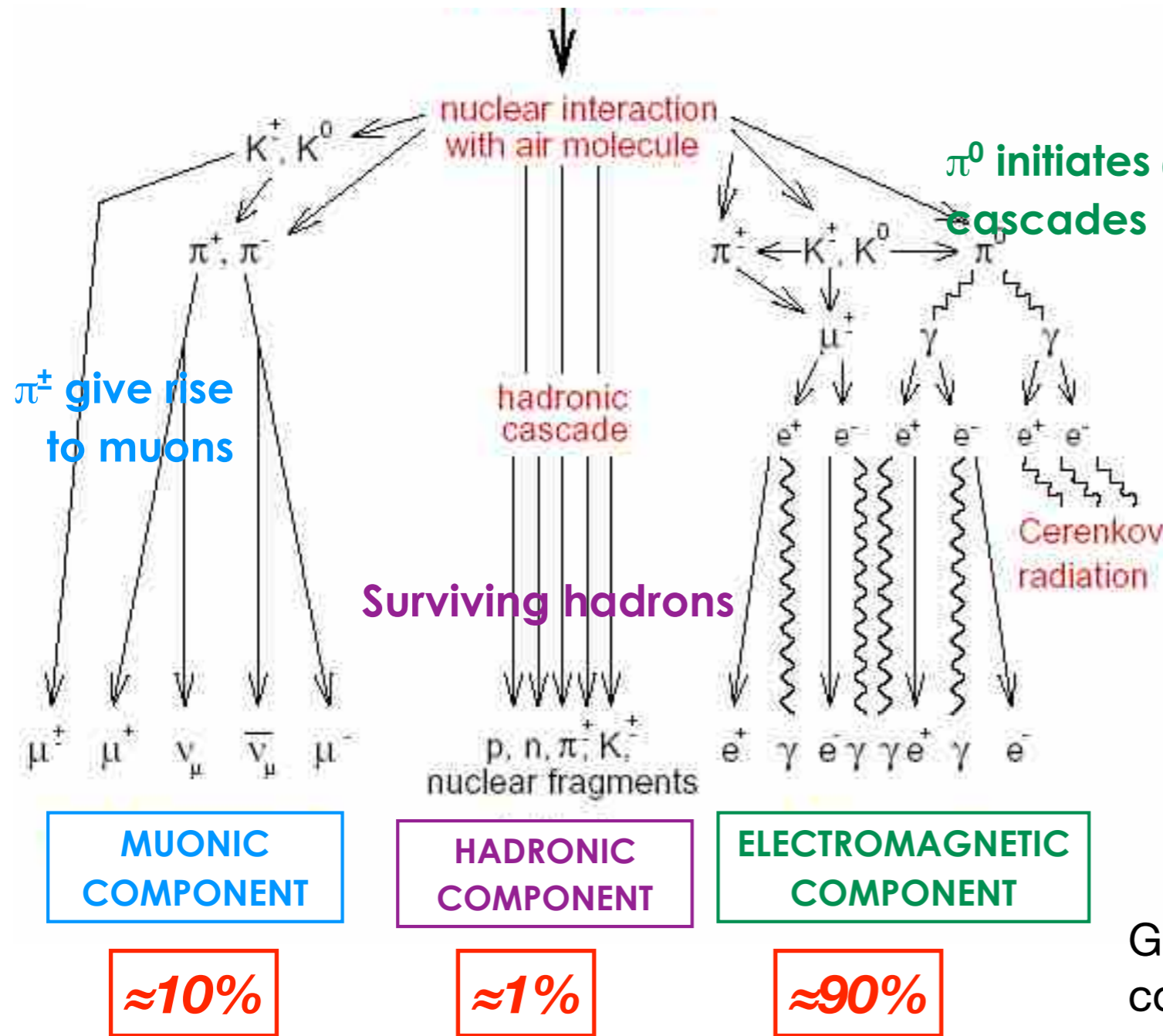


Il contenuto di uno sciame esteso



Schematic Diagram of Cosmic Ray Shower

Il flusso di energia in uno sciame esteso



Gli Adroni h forniscono energia alle componenti muonica ed e.m.
 → sono lo 'scheletro' di uno sciame esteso

Neutroni 🤯🤯🤯

Il muone

Anderson nel **1937**, notò delle particelle che deviavano in maniera diversa dagli elettroni e da altre particelle note quando queste passavano attraverso un campo magnetico.

In particolare, queste nuove particelle venivano deflesse ad un angolo minore rispetto agli elettroni, ma più acuto di quello dei protoni.

Si assunse che la loro carica fosse identica a quella dell'elettrone e, per rispondere alla differenza di deflessione, si ritenne che avesse una massa intermedia (un valore compreso tra la massa del protone e dell'elettrone).

Si scoprì che questa particella aveva delle caratteristiche pecuniari da renderla il cugino pesante dell'elettrone (esperimento Pancini-Piccioni-Conversi).

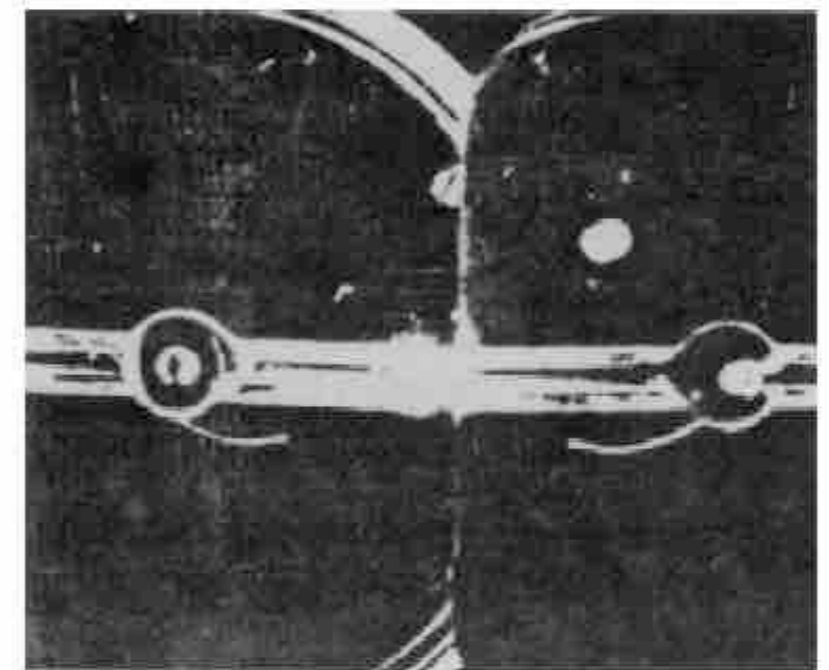
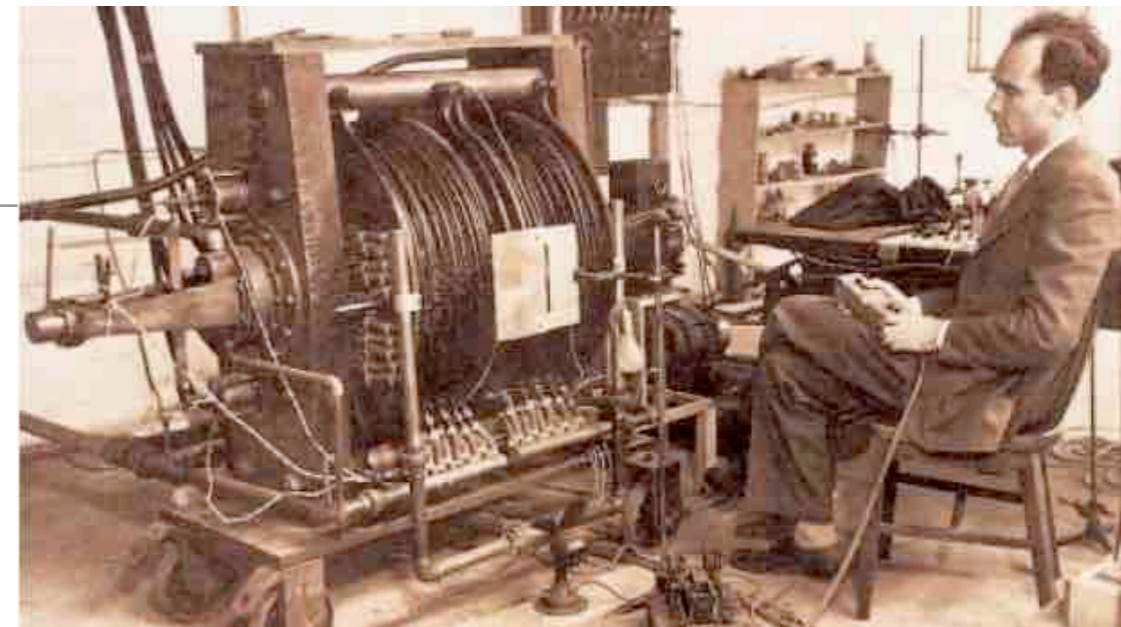


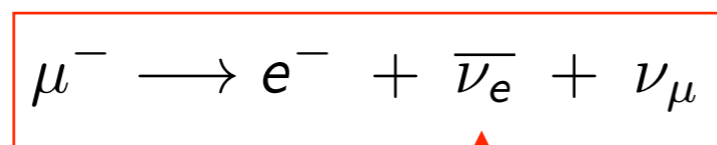
Fig. 1. - Evidenza in camera di Wilson di un muone positivo che traversa un contatore di Geiger entro la camera [1]. La sensibilità della camera non poteva arrivare a rivelare l'elettrone di decadimento.

Leggere l'articolo di Salvini:

<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2FBF02904476.pdf>

Il muone: proprieta'

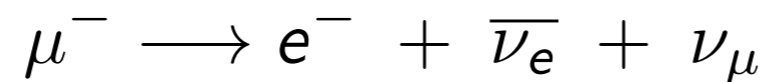
- muone (μ): particella elementare della famiglia dei leptoni
- elementare: si ignora se abbia una struttura, se sia cioe' composta
- leptoni: elettrone (e), muone (μ), tau (τ) con i corrispondenti neutrini (ν_e, ν_μ, ν_τ)
- proprieta' fondamentali del μ :
 1. massa: $m_\mu = 106 \text{ MeV}/c^2$ (1.90×10^{-28} kg), ovvero $\approx 200 m_e$
 2. carica: negativa pari a quella dell'elettrone (-1.602×10^{-19} Coulomb), si indica quindi con μ^-
 3. spin: $1/2$ (si tratta quindi di un fermione, come tutti i leptoni)
 4. e' instabile ed "in media" dopo $\approx 2.2 \mu\text{s}$ decade in tre particelle:



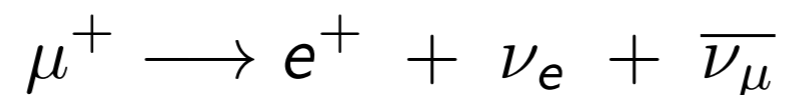
Cos'e'?

Il muone: decadimento

- antiparticelle: per ciascun leptone esiste il corrispondente anti-leptone: ν_e \bar{e} un anti-neutrino elettronico
- per le particelle cariche, l'antiparticella ha carica uguale in $| |$ ma opposta in segno: μ^+ e' l'antiparticella del muone, e^+ , detto *positrone*, e' l'antiparticella dell'elettrone
- anche μ^+ instabile. Oltre al decadimento del μ^- ovvero



- esiste anche il corrispondente decadimento del μ^+ :



- ciascuna particella e' stata sostituita dalla sua antiparticella

Muoni al livello del suolo

- I muoni sono prodotti secondari della radiazione cosmica primaria (soprattutto protoni di alta energia)
- a 15-20 km di altezza, i protoni interagiscono con i nuclei del gas atmosferico
 - un protone interagendo con un nucleo produce uno “sciame” di particelle
 - fra queste molti sono “*pioni*” π^0 , π^+ , π^-
 - π instabile; decadimento π^+ e π^- :
$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$
 - Vita media di π^+ , π^- : circa 26 ns (2.6×10^{-8} s)
 - Una piccola frazione di muoni giunge al suolo
 - *energia media μ prodotti in alta atmosfera: ≈ 6 GeV; al suolo arrivano con ≈ 4 GeV*

Dilatazione relativistica della vita

- avendo $\tau \approx 2.2 \mu\text{s}$, anche per $v \approx c$ il muone percorre solo $2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \times 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} = 6 \cdot 10^2 \text{ m}$
- come mai arriva al suolo percorrendo 15-20 km?
- con energia cinetica media $T_\mu \approx 6 \text{ GeV}$ e massa a riposo $m_\mu = 106 \text{ MeV}$, relativisticamente abbiamo

$$\gamma = \frac{m_\mu c^2 + T_\mu}{m_\mu c^2} \approx \frac{6106 \text{ MeV}}{106 \text{ MeV}} \approx 60$$

- nel sistema di riferimento del nostro laboratorio il tempo di vita di un muone con $T_\mu \approx 6 \text{ GeV}$ si dilata di un fattore 60 \rightarrow per $v \approx c$ percorre $6 \cdot 10^2 \times 60 = 36 \cdot 10^3 \text{ m}$
- questo vale “in media” (non tutti vivono per τ)
- **energia media μ prodotti in alta atmosfera: $\approx 6 \text{ GeV}$; al suolo arrivano con $\approx 4 \text{ GeV}$**

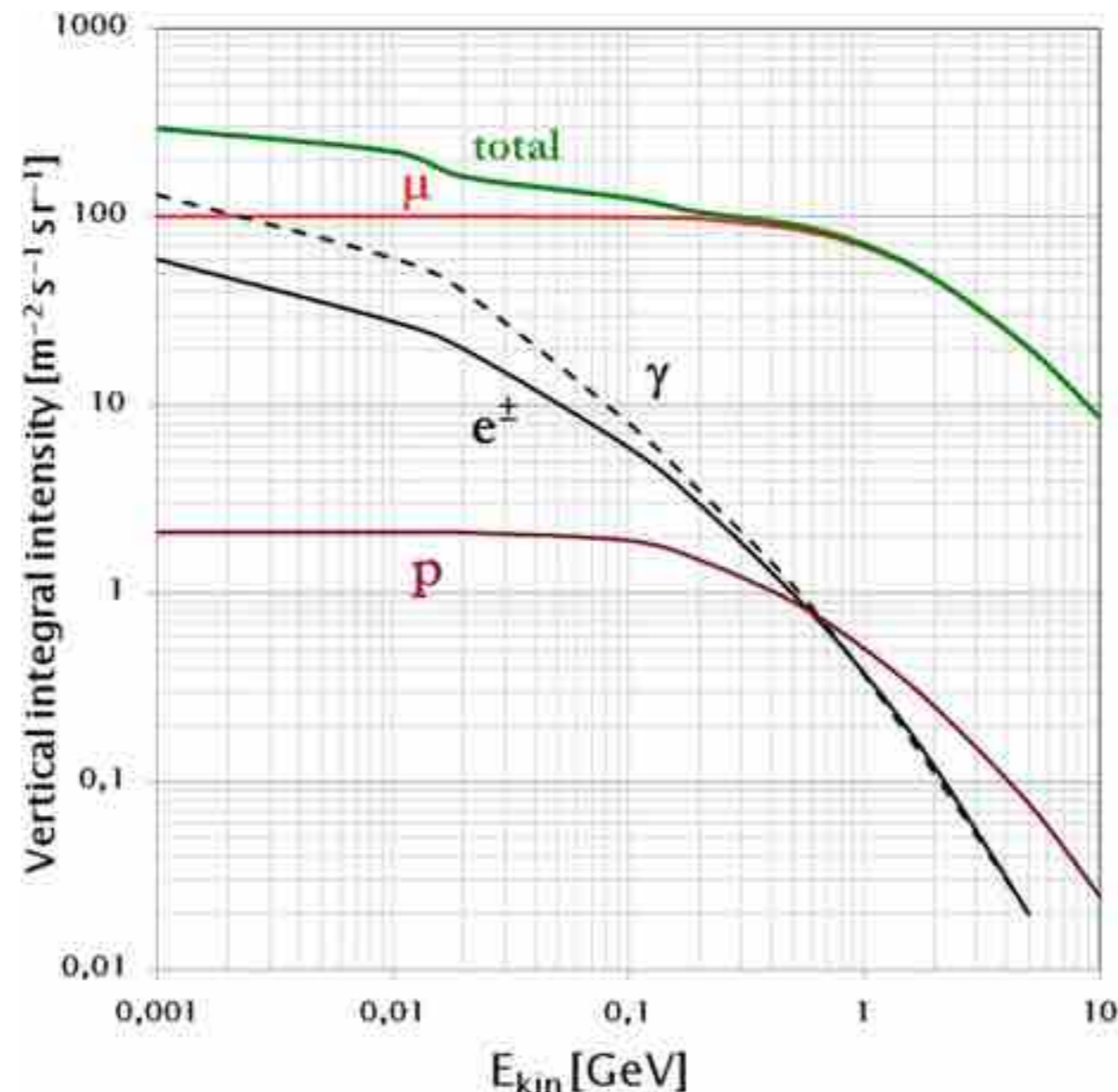
Flusso di particelle al livello del mare

I *muoni* sono la componente prevalente di particelle cariche al livello del mare.

Vengono prodotti prevalentemente dal decadimento dei pioni.

Il loro numero dipende dalla competizione tra interazione e decadimento dei pioni e dalla possibilità che decadano prima di raggiungere il suolo.

A 1 GeV il muone ha un fattore di Lorentz $\Gamma = E_\mu/m_\mu c^2 \sim 10$ e una lunghezza di decadimento $d_\mu = \Gamma \tau_\mu c \sim 6 \text{ km}$



Distribuzione angolare

La distribuzione angolare delle particelle secondarie alla profondita' x e all'angolo zenitale θ puo' essere descritta con l'espressione

$$j_{\theta}(x) = j_{\perp} \left(\frac{x}{\cos \theta} \right)$$

cioe' con il flusso verticale j_{\perp} calcolato alla profondita' $x/\cos \theta$.

Questo e' vero se

1. I raggi cosmici colpiscono isotropicamente l'atmosfera
2. Tutte le particelle si propagano senza cambiare la loro direzione
3. La variazione di intensita' dipende **solo** dalla geometria, cioe' dallo spessore di atmosfera attraversato.

In generale la distribuzione angolare delle particelle secondarie alla profondita' x e all'angolo zenitale θ puo' essere descritta con l'espressione

$$j(\theta) = j_{\perp} \cos^n(\theta)$$

Dove n dipende dalla quota del rivelatore, dal tipo di particella e dalla sua energia

Distribuzione angolare dei muoni

I muoni possono raggiungere il suolo terrestre grazie agli effetti relativistici di dilatazione della vita media..

A basse energie e a grandi angoli zenitali lo spessore di atmosfera da attraversare e' cosi grande che la probabilita' di decadimento dei muoni aumenta sensibilmente, quindi il loro flusso diminuisce: a 90° lo spessore da attraversare e' circa 36 volte lo spessore dell'atmosfera sulla verticale!

Ad alte energie i pioni penetrano piu' in profondita' perche' percorrono piu' spazio in alta quota dove la densita' dell'aria e' minore → la probabilita' di decadimento in muoni e' superiore a quella di interazione

Il flusso di muoni dipende quindi da energia e spessore

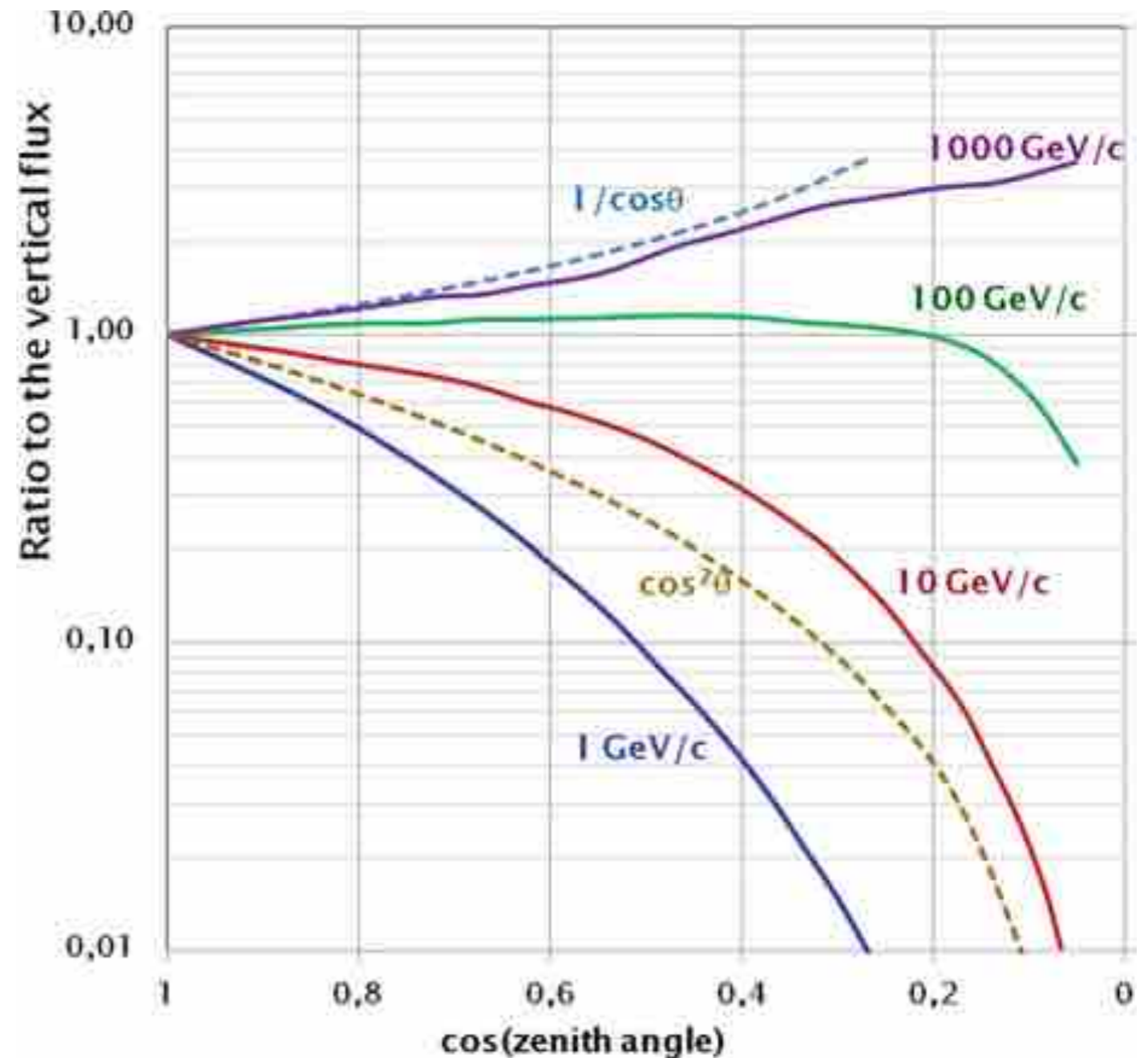
Dalla direzione verticale e per $E_\mu > 1 \text{ GeV}$, il flusso di muoni e' ~ 1 particella per cm^2 e per min: $I_\nu (E_\mu > 1\text{GeV}) \sim 70 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

L'energia media dei muoni al livello del mare e' 3-4 GeV/c

Distribuzione angolare dei muoni

La distribuzione angolare dei muoni al livello del mare e' $\propto \cos^2(\theta)$, caratteristica dei muoni con energia $E_\mu \approx 3 \text{ GeV}$.

Solo i muoni di alta energia seguono un andamento $\propto 1/\cos(\theta)$



Effetto Barometrico

CR rate varies under the effect of atmospheric pressure and temperature variations.

Since the beginning of 1900's the researchers observed an anti-correlation between the cosmic rays intensity and the pressure variation.

In order to take into account these effects consider:

- the *barometric effect*, which describes the variation of the atmospheric depth as a consequence of the pressure changes;
- the *temperature effect*, which is related to the change of the air density because of the variation of the temperature in the higher layer of the atmosphere (at constant pressure);

During their travel, the particles are subject to two different phenomena: the decay and the interaction with the nuclei of the atmosphere.

The relative probability of *the two processes depends on the air density*, thus changing with the variation of the pressure and the temperature of the different layers of the atmosphere.

As an example, with the decrease of the temperature there is a decrease in the air density and consequently an increase of the decay probability versus the interaction one, thus modifying the development of the shower.

Effetto Barometrico

The effects of the pressure changes is usually expressed in terms of the *barometric coefficient β* , which describes the percentage variation in the cosmic ray intensity caused by a pressure change of 1 mbar.

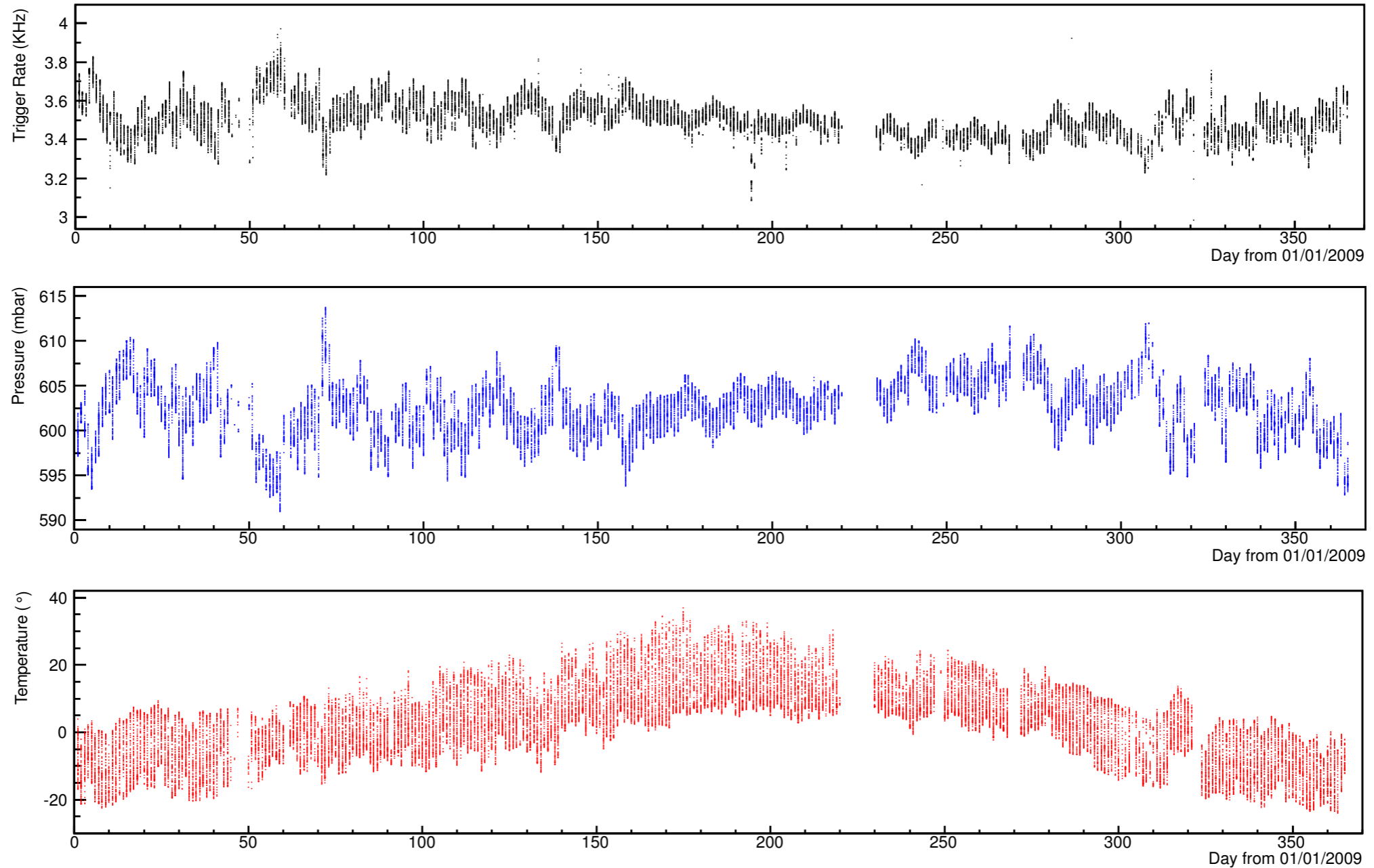
The value of β is negative because of the anti-correlation and depends on the particular experimental set-up used for the detection and on its geographical location.

The barometric coefficient is also strongly dependent on the nature of the secondary component detected: for instance, for the neutron component $|\beta|$ is about 0.7%/mbar, while it is smaller for the ionizing component ($|\beta| \sim 0.1-0.2\%/mbar$).

The *coefficient of the temperature effect* is positive because the increase of the temperature leads to a decrease of the air density: the pion decay, from which muons are originated, becomes more probable than the interaction processes.

It expresses the percentage variation in the cosmic ray intensity caused by a temperature variation of 1 K, but is very difficult to determine experimentally, because of the impossibility to measure the temperature profile of the atmosphere.

Effetto Barometrico



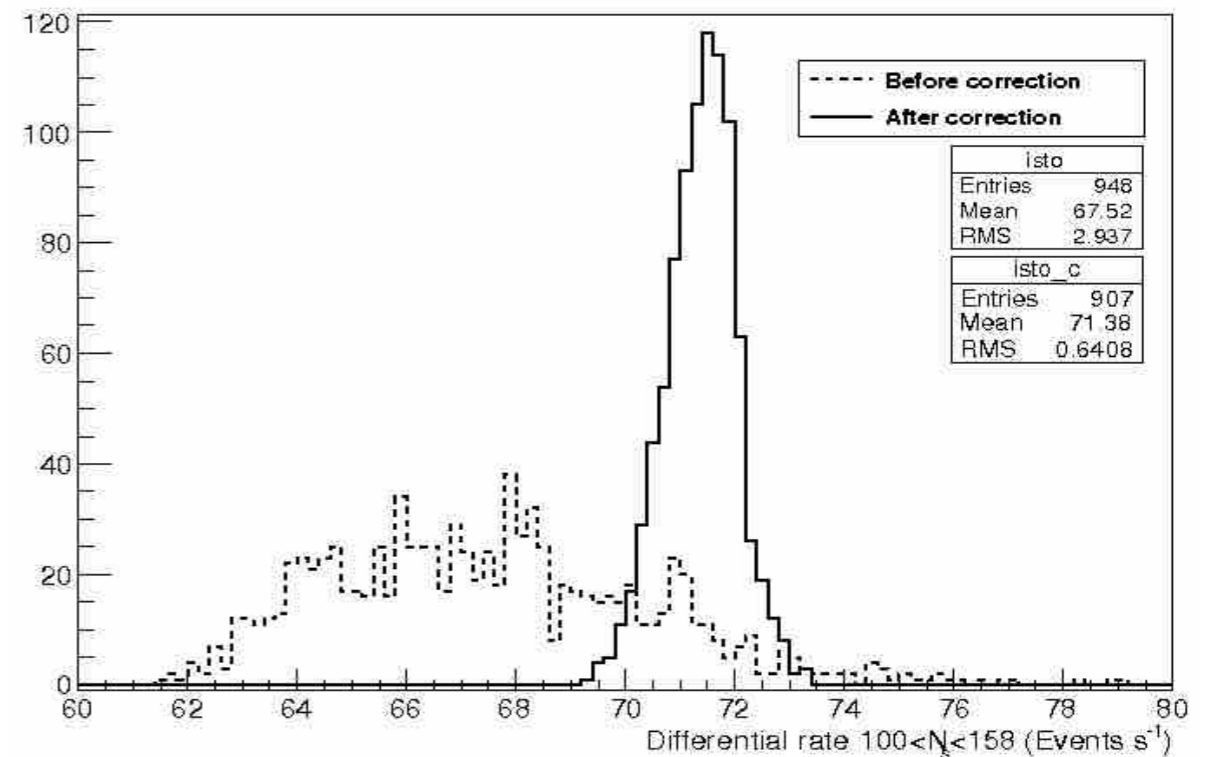
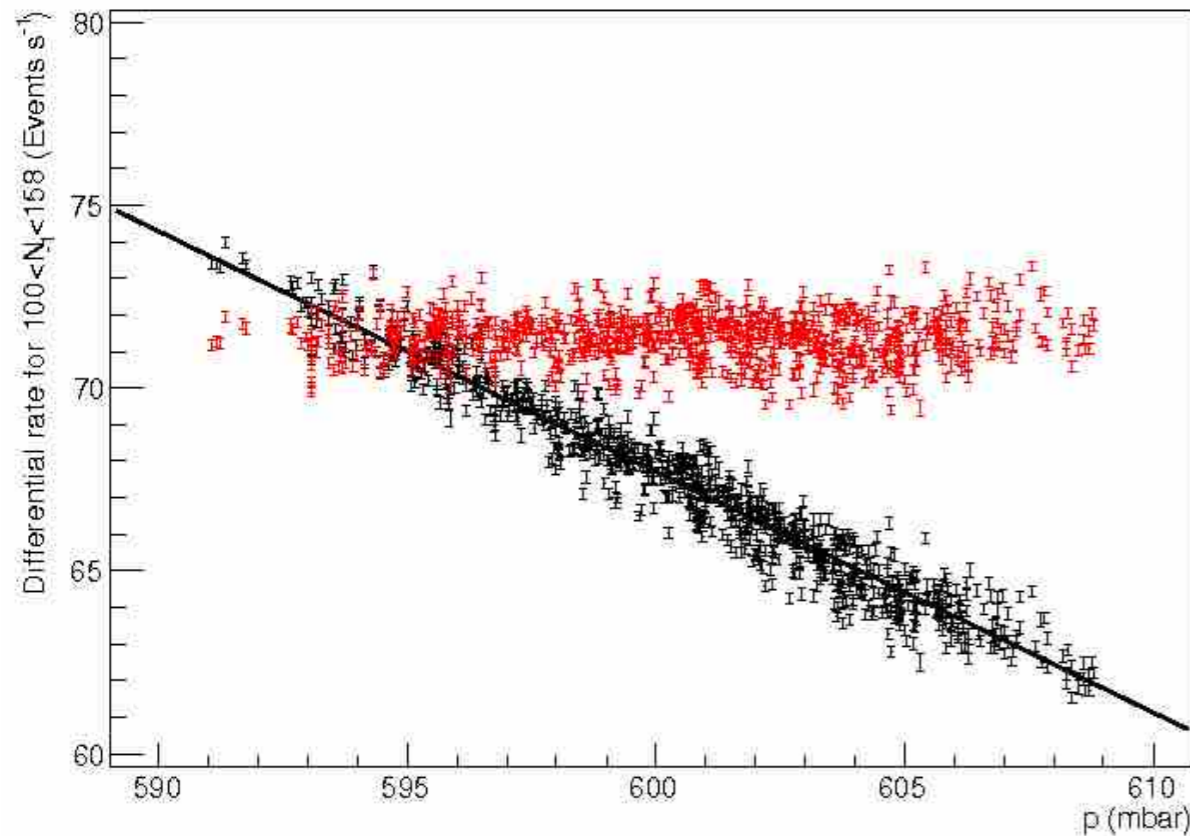
Correzione Effetto Barometrico

The value of the barometric coefficient β (%/mbar) is obtained correlating the pressure at the time t with the measured CR intensity I , following the relation

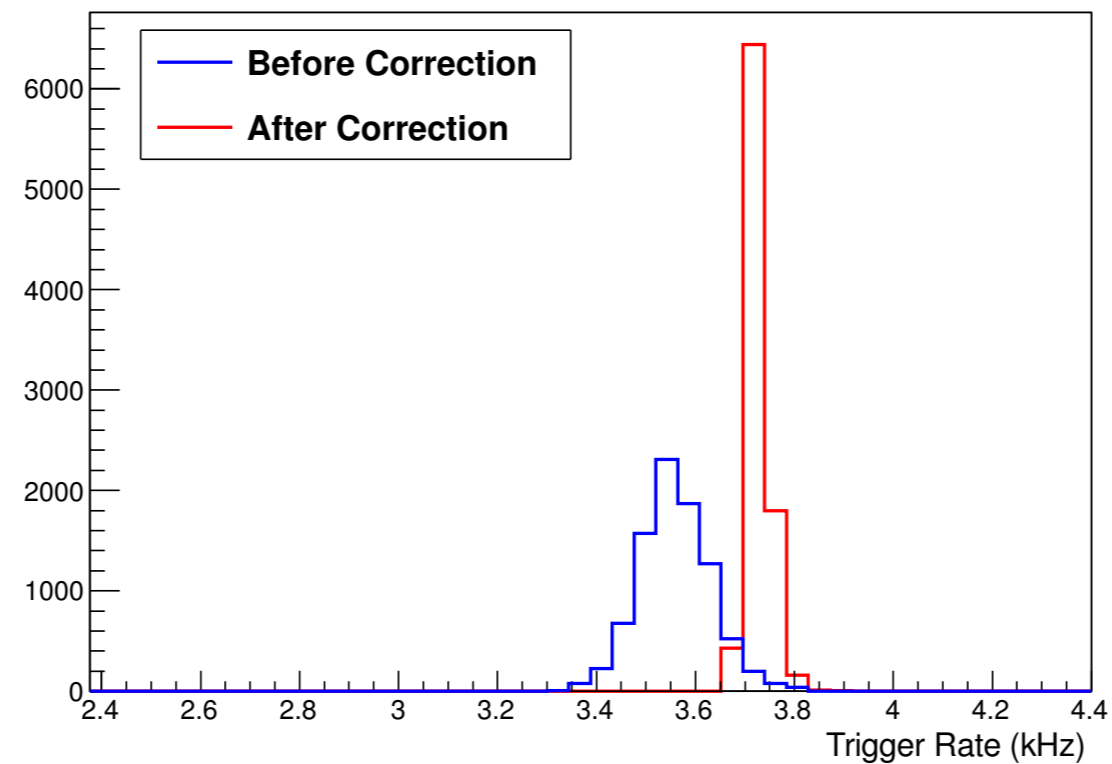
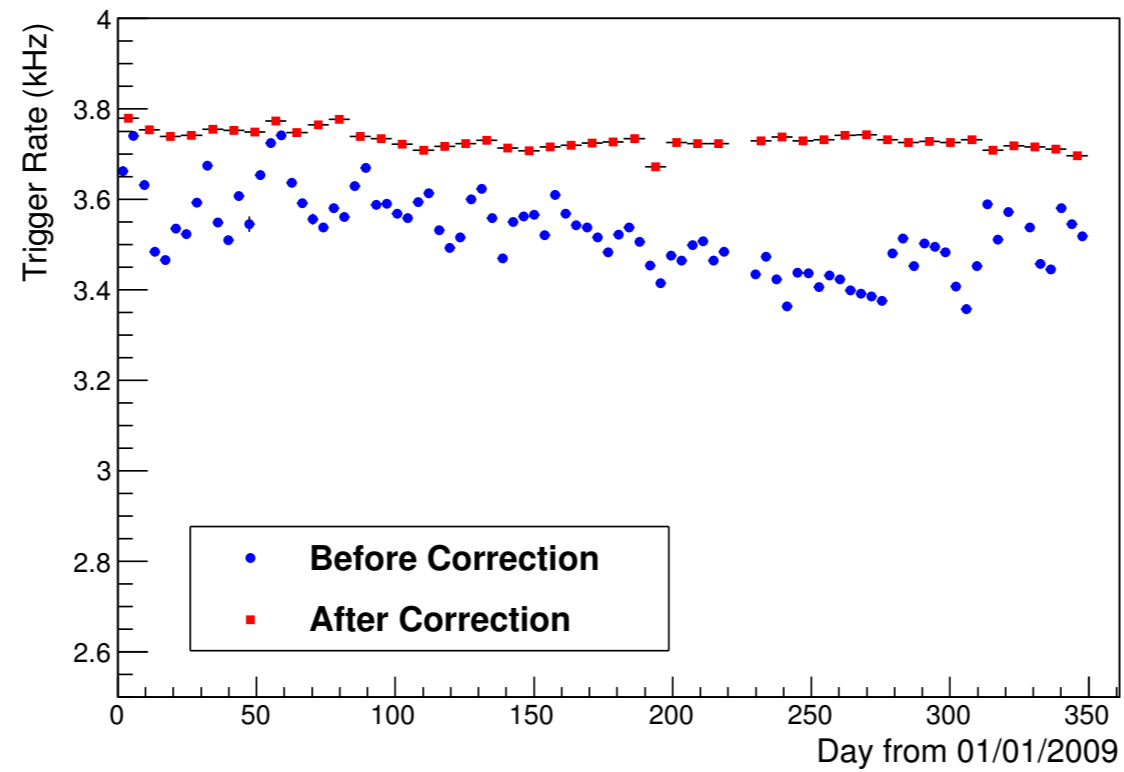
$$I = I_0 \exp [\beta (P - P_0)]$$

where P_0 (mbar) is the reference pressure and I_0 the intensity at the pressure P_0 .

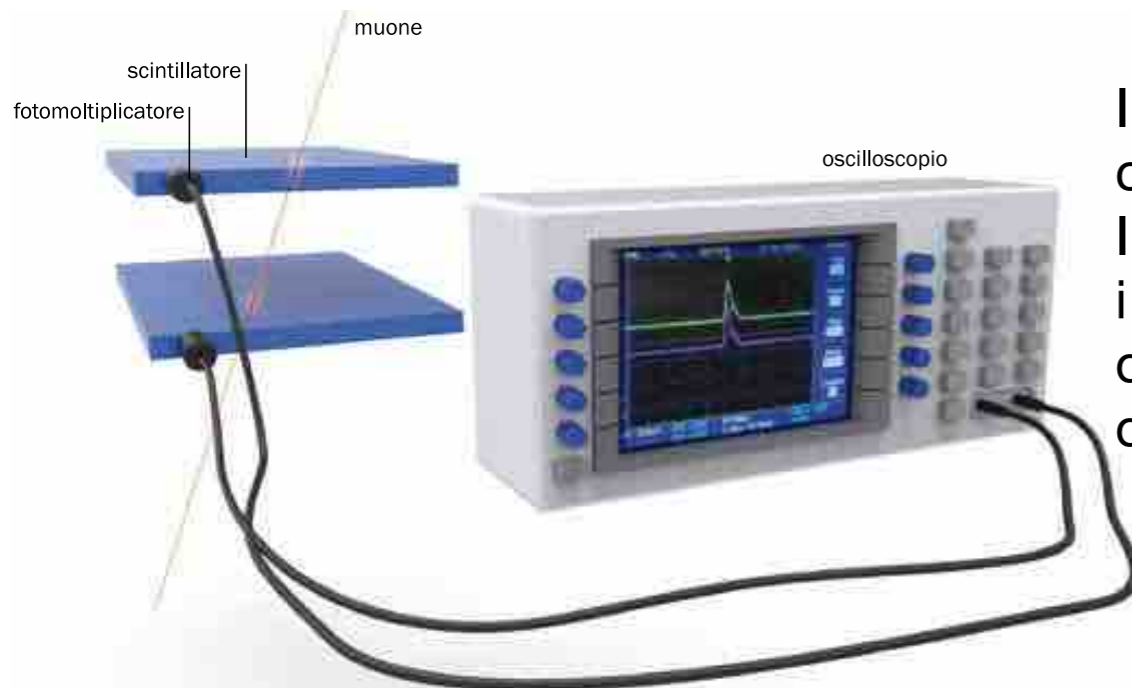
For small pressure changes a first-order approximation results in $\Delta I = \beta I \Delta P$.



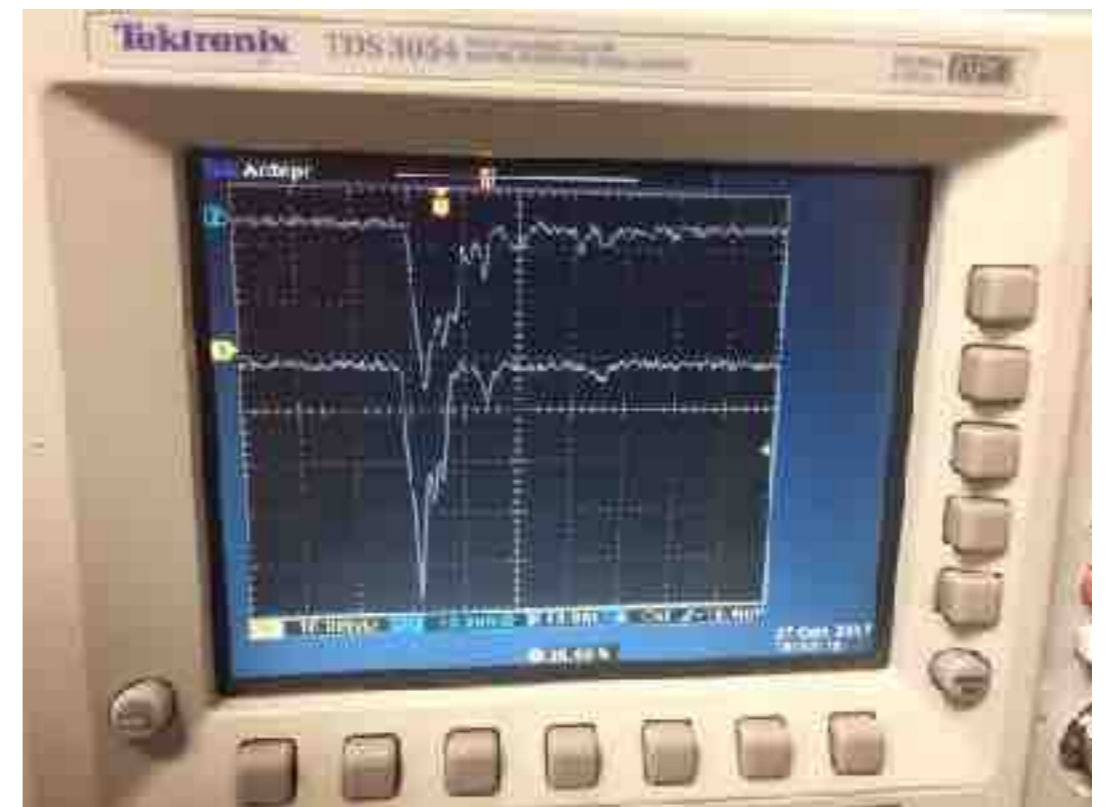
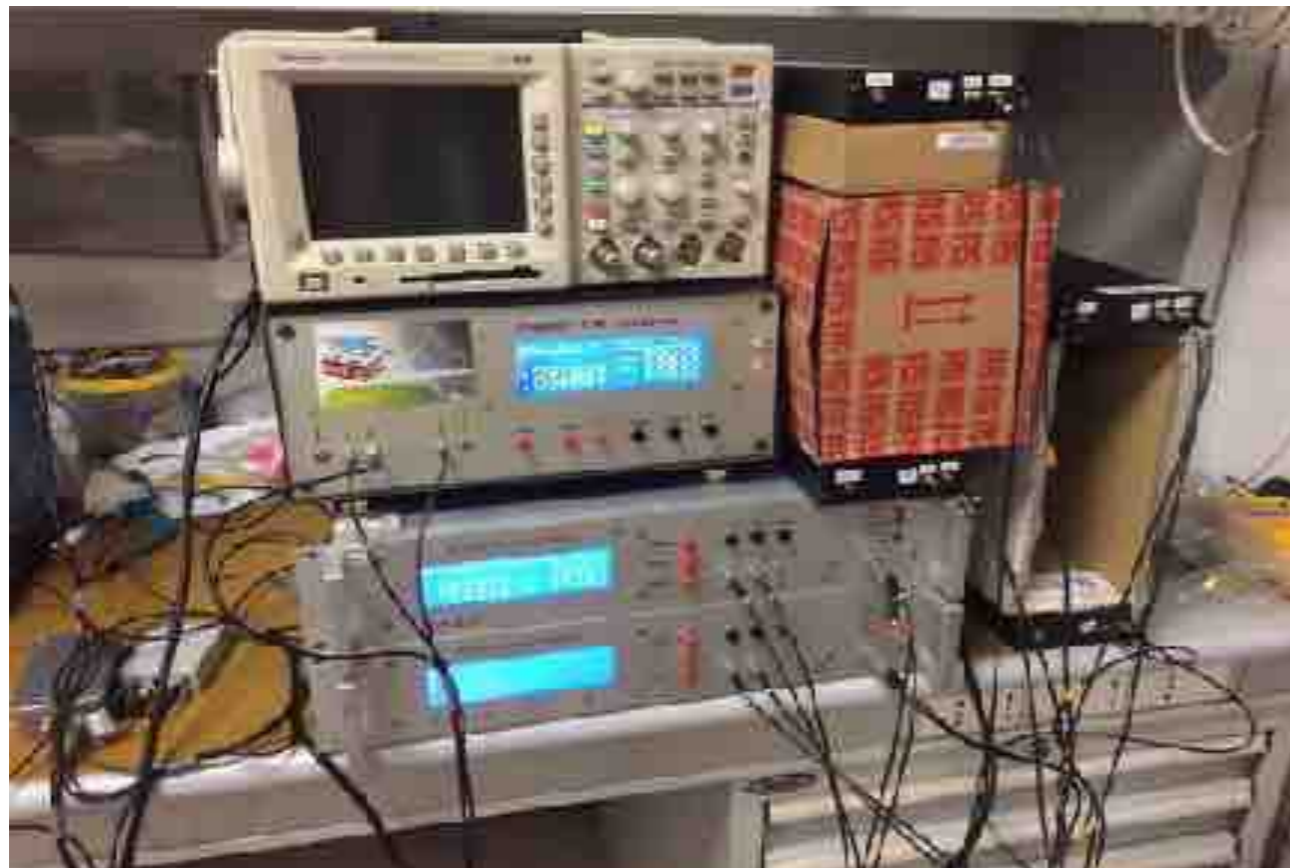
Correzione Effetto Barometrico



Rivelazione dei muoni



I muoni si possono rivelare con un semplice apparato di misura costituito da una coppia di scintillatori letti da fotomoltiplicatori. Imponendo una soglia sull'ampiezza del segnale e un opportuno intervallo di coincidenza temporale, nello schermo dell'oscilloscopio appaiono i segnali elettrici prodotti quando i due rivelatori sono attraversati dallo stesso muone cosmico.



I conteggi di singola

Un qualsiasi rivelatore acceso viene attraversato da particelle che, in un dato intervallo di tempo τ , daranno un conteggio $C_{\text{singola}} = R_{\text{singola}} \times \tau$, dove R_{singola} è il cosiddetto *rate di singola*, il conteggio nell'unità di tempo.

Il conteggio di singola dipende dal numero di particelle dovute ai raggi cosmici, dalla radioattività locale e dal rumore interno del rivelatore utilizzato.

Il numero di particelle dovute a raggi cosmici dipende naturalmente dall'altitudine alla quale ci si trova.

A livello del mare questo conteggio è dell'ordine di $150 \text{ particelle m}^{-2}\text{s}^{-1}$, mentre la radioattività dipende molto dal luogo.

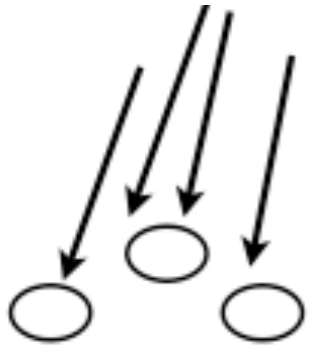
E' comunque ragionevole considerare che il *valor medio del conteggio di singola al livello del mare sia:*

$$R_{\text{singola}} \sim 300 - 400 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$$

Solo una piccola parte di questo conteggio è dovuto a raggi cosmici, la restante parte è frutto di eventi casuali non correlati fra loro (*'eventi non fisici'*). Essi vanno eliminati per poter registrare solo eventi che trasportano informazioni di fisica perché prodotti dai raggi cosmici che si vogliono studiare.

La tecnica di coincidenza ci fornisce un modo brillante per ridurli sensibilmente.

I conteggi casuali in singola



I conteggi accidentali (casuali) rappresentano gran parte dei dati raccolti ma non sono rilevanti *'dal punto di vista fisico'* e vanno quindi ridotti.

Problema: se ho N rivelatori accesi quale sarà il rate di eventi casuali su tutti i rivelatori in un intervallo di tempo Δt ?

$R_{singola}$ = rate di singola = numero di conteggi al secondo su un rivelatore sito al livello del mare $\approx 400 \text{ Hz/m}^2$

Δt = intervallo temporale entro il quale si conta = 100 ns

Conteggio di singola su tutti i rivelatori: $C_{singola} = R_{singola} \times \Delta t \times N$

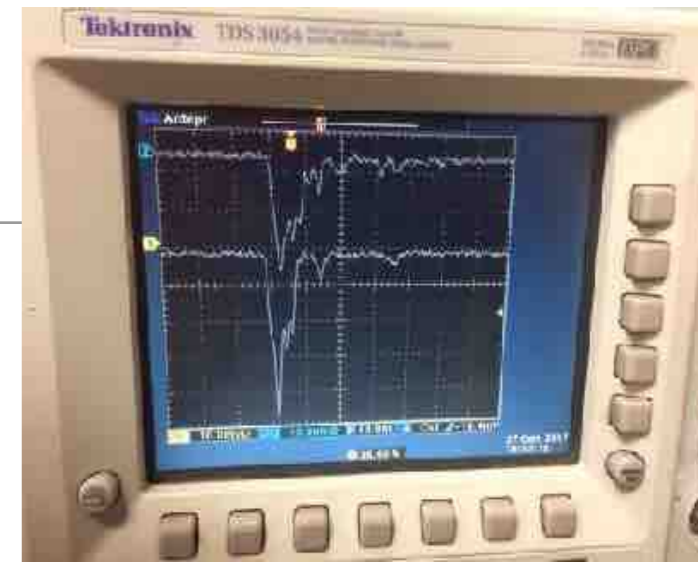
Il rate di eventi casuali in un intervallo di tempo Δt è dato da una **Poisson** con valor medio $C_{singola}$

La **Poisson** ci fornisce la probabilità di osservare n eventi indipendenti in un intervallo Δt se il counting rate è $R_{singola}$ ed il numero atteso di eventi in Δt è $R_{singola} \times \Delta t$.

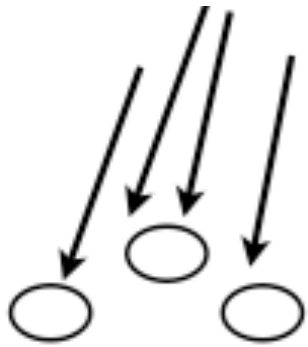
$$P_n(\Delta t) = \frac{(R_{singola} \Delta t)^n}{n!} \cdot e^{-R_{singola} \Delta t}$$

$$R = P_n(\Delta t) \cdot [R_{singola} \times \Delta t \times N]$$

Il rate di casuali in coincidenza



Diverso è il caso delle **coincidenze**: vogliamo sapere quante volte scattano n rivelatori casualmente entro un intervallo di tempo Δt (ad esempio doppia, tripla, etc), non quanti conteggi casuali ho su di essi.



In questo caso utilizziamo la **distribuzione binomiale**: si applica quando effettuando un numero n di prove esistono solo 2 possibilità: successo o fallimento.

La probabilità che n rivelatori su un totale di m scattino **casualmente in coincidenza** nell'intervallo τ (cioè n successi e $(m - n)$ fallimenti) sarà

$$P_n = \binom{m}{n} p^n (1 - p)^{m-n} = \frac{m!}{n!(m-n)!} \cdot p^n (1 - p)^{m-n}$$

$p = R_{\text{singola}} \times \tau$ è la probabilità di successo

$$R_n = \frac{P_n}{\tau}$$

Rate di n -tuple (n rivelatori scattati casualmente) entro un intervallo di tempo τ

Coincidenze casuali

DOPPIE:
$$R_2 = \frac{2}{\tau} \binom{m}{2} (R_{singola} \cdot \tau)^2 (1 - R_{singola} \cdot \tau)^{m-2} \sim \frac{2}{\tau} (R_{singola} \cdot \tau)^2 = 2R_{singola}^2 \cdot \tau$$

visto che $(R_{singola} \cdot \tau) \ll 1$

TRIPLE:
$$R_3 = \frac{3}{\tau} \binom{m}{3} (R_{singola} \cdot \tau)^3 (1 - R_{singola} \cdot \tau)^{m-3} \sim \frac{3}{\tau} (R_{singola} \cdot \tau)^3 = 3R_{singola}^3 \cdot \tau^2$$

In generale, il rate di casuali per una coincidenza n -tupla sarà

$$R_n = nR_{singola}^n \cdot \tau^{n-1}$$

Consideriamo dei rivelatori di area 1 m^2 con un rate di singola $R_{singola} = 300 \text{ Hz}$ messi in coincidenza in un intervallo temporale di $\tau = 400 \text{ ns} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ s}$.

Il numero di casuali per una doppia sarà: $R_2 = 2 \cdot (300)^2 \cdot 4 \cdot 10^{-7} = 7.2 \cdot 10^{-2} \text{ Hz}$. Per una tripla invece avremo: $R_3 = 3 \cdot (300)^3 \cdot (4 \cdot 10^{-7})^2 = 1.28 \cdot 10^{-7} \text{ Hz}$. Come si può vedere, aggiungendo un solo rivelatore in più in coincidenza, il rate di coincidenze casuali crolla di più di 5 ordini di grandezza!

Lo studio dell'Universo

Possiamo studiare l'Universo con due approcci

(1) Multi - frequenza



Ottico



Infrarosso



Radio



Raggi X

Si utilizzano *contemporaneamente* misure fatte a differenti lunghezze d'onda e se ne studiano le correlazioni.

(2) Multi - messaggero

Si utilizzano i diversi messaggeri cosmici emessi *contemporaneamente* dalla stessa sorgente

- **Fotoni**
- **Raggi Cosmici**
- **Neutrini**
- **Onde Gravitazionali**

Conclusioni

*Negli ultimi anni l'osservazione diretta dell'ultimo messaggero (le onde gravitazionali) e l'evidenza di emissioni correlate di fotoni di diversa lunghezza d'onda, neutrini ed onde gravitazionali dalla stessa sorgente apre **una nuova entusiasmante era nello studio dell'Universo!***

p
Cosmic rays



v
Neutrinos



**Multi-messenger
astrophysics**

SN 1987 A

TXS 0506+056 & IC-170922A



GW
Gravitational Waves

GW170817



γ
Gamma rays

Qualche lettura

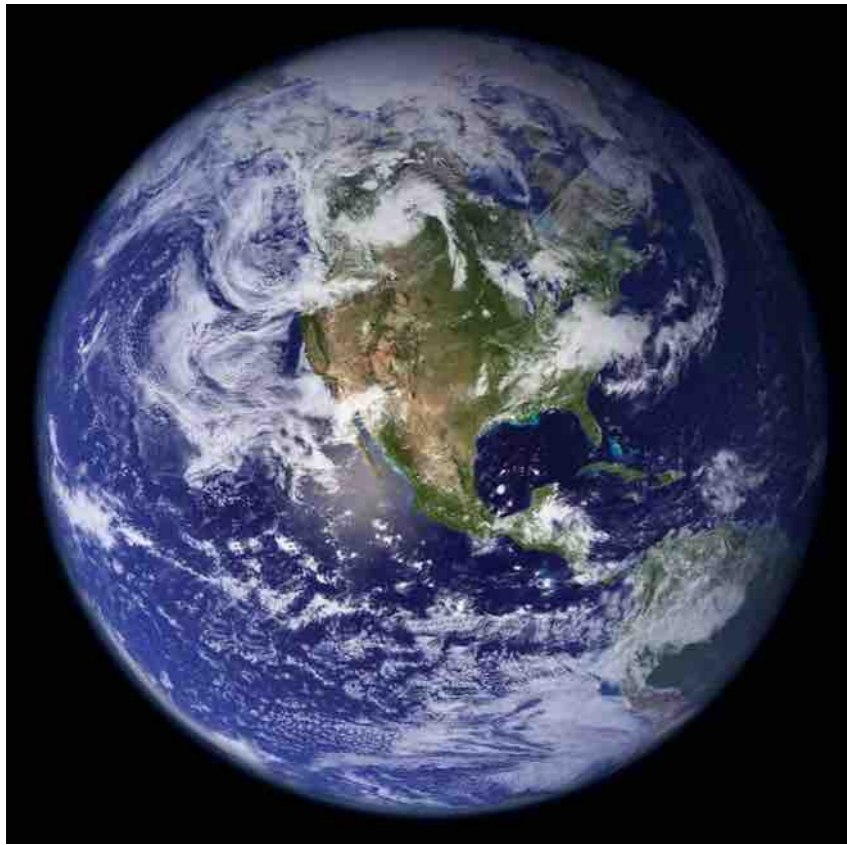
Bruno Rossi - *I Raggi Cosmici*, Einaudi (non più ristampato ma su Ebay)

Alessandro De Angelis - *L'Enigma dei Raggi Cosmici*, Springer

Gabriele Ghisellini - *Astrofisica per curiosi. Breve storia dell'universo*, HOEPLI (2019)

Brian Greene - *La trama del cosmo*, Einaudi (2018)

La materia visibile... e quella oscura!



Tutta la materia visibile è fatta da

- Protoni
- Neutroni
- Elettroni

Ma si ritiene che la *materia visibile* sia *solo il 5%* di tutto l'Universo.

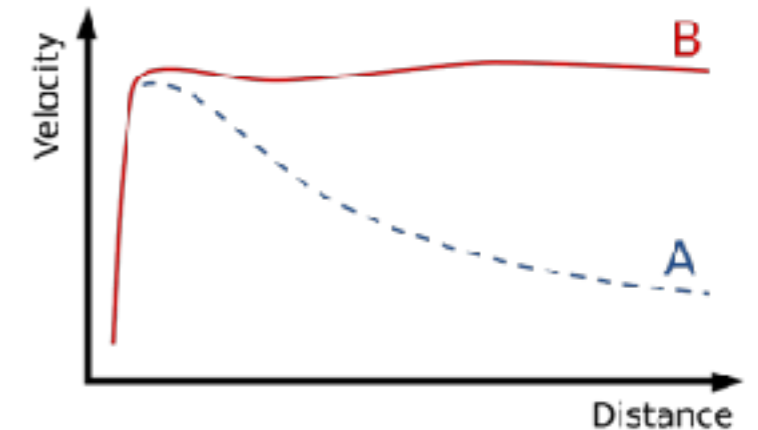
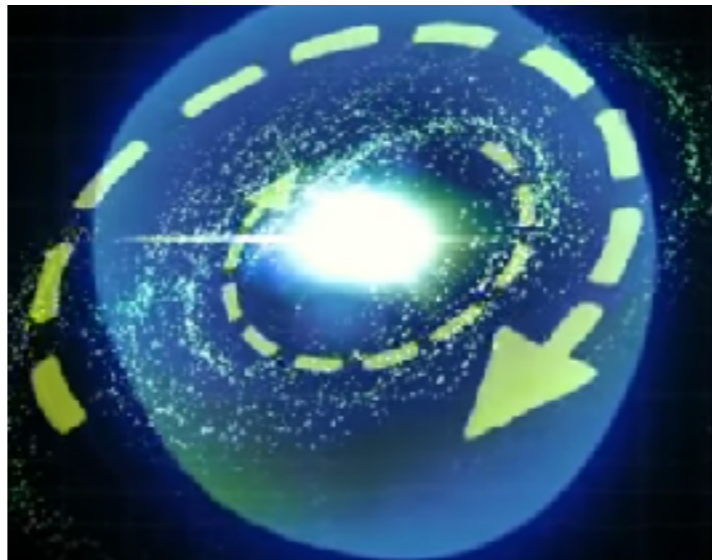
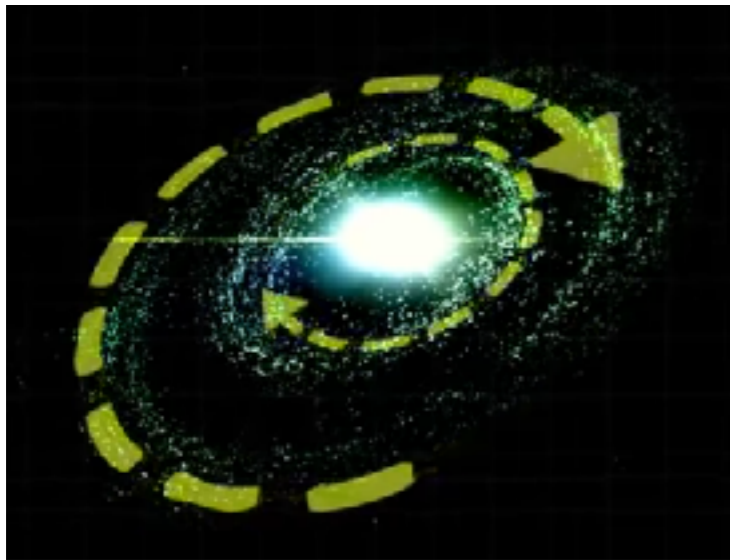
Dovrebbe esistere anche una *materia oscura (25%)* che attrae e serve a tenere in equilibrio le Galassie



La materia oscura

La necessità della materia oscura è fornita dalle *curve di rotazione* delle galassie a spirale. Queste galassie contengono una vasta popolazione di stelle poste su orbite quasi circolari attorno al centro galattico.

In base alla seconda legge di Keplero le stelle con orbite galattiche più grandi dovrebbero avere velocità orbitali minori.



Curva di rotazione della galassia:
(A) predetta, (B) osservata

Invece di diminuire a grandi raggi, le velocità orbitali rimangono con ottima approssimazione costanti. L'implicazione è che la massa racchiusa da orbite di raggio via via maggiore aumenti anche per stelle che sono apparentemente vicine al limite della galassia.

Considerando le stelle presso la periferia di una galassia spirale, con velocità orbitali osservate normalmente di *200 chilometri al secondo*, se la galassia fosse composta solo dalla materia visibile queste stelle l'abbandonerebbero in breve tempo, dato che *le loro velocità orbitali sono quattro volte più grandi della velocità di fuga dalla galassia*.

La composizione dell'Universo



Ingredienti che formano il nostro Universo.

Noi conosciamo qualcosa di circa il 5%.

Il restante 95% sembra ancora oscuro, sia perché non emette luce, sia perché non sappiamo cosa sia !

Nel 1998 si scoprì che l'espansione dell'Universo, lungi dal diminuire, sta aumentando.

L'Universo accelera !

Fu uno shock !

Com'è possibile ? Cosa lo fa accelerare ?

Ci deve essere un elemento sconosciuto che provoca questa accelerazione. Noi a questo elemento diamo il nome di *energia oscura*, energia perché, a differenza della massa che attrae, spinge e favorisce l'espansione.