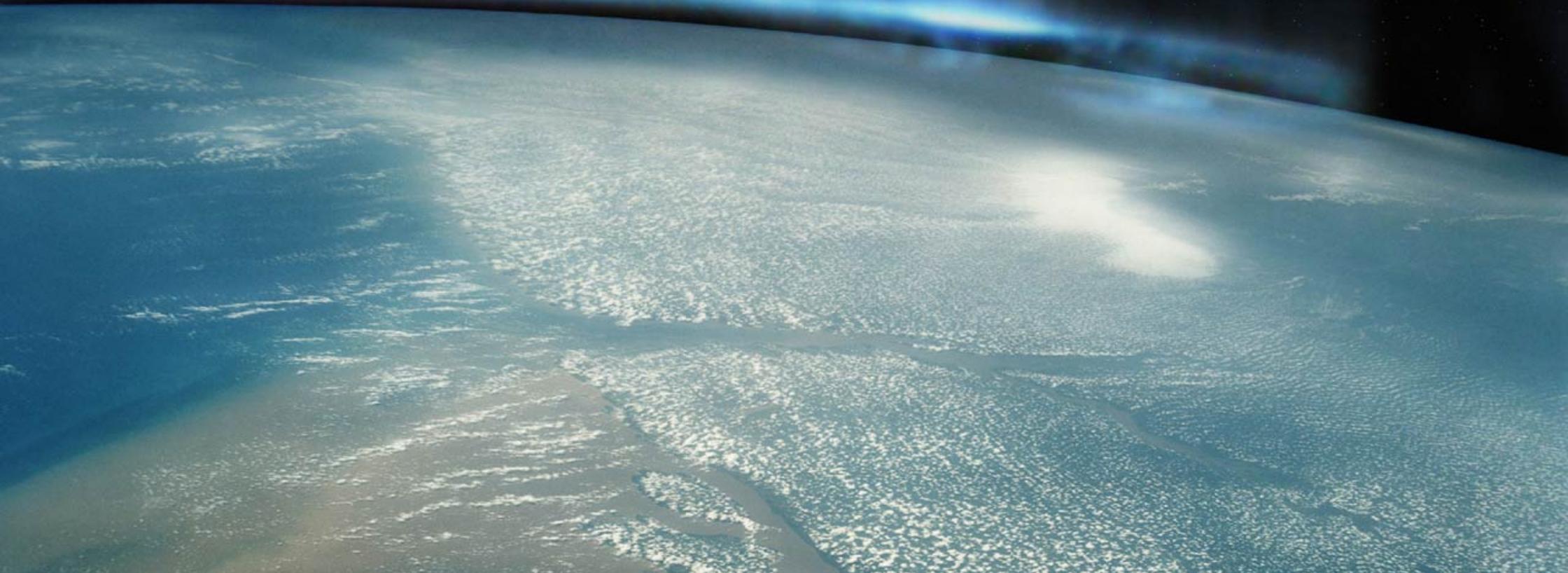


I RAGGI COSMICI

Riccardo Rando
Dip. di Fisica e Astronomia
Università di Padova
&
INFN – Sezione di Padova



Cosa sono i raggi cosmici?

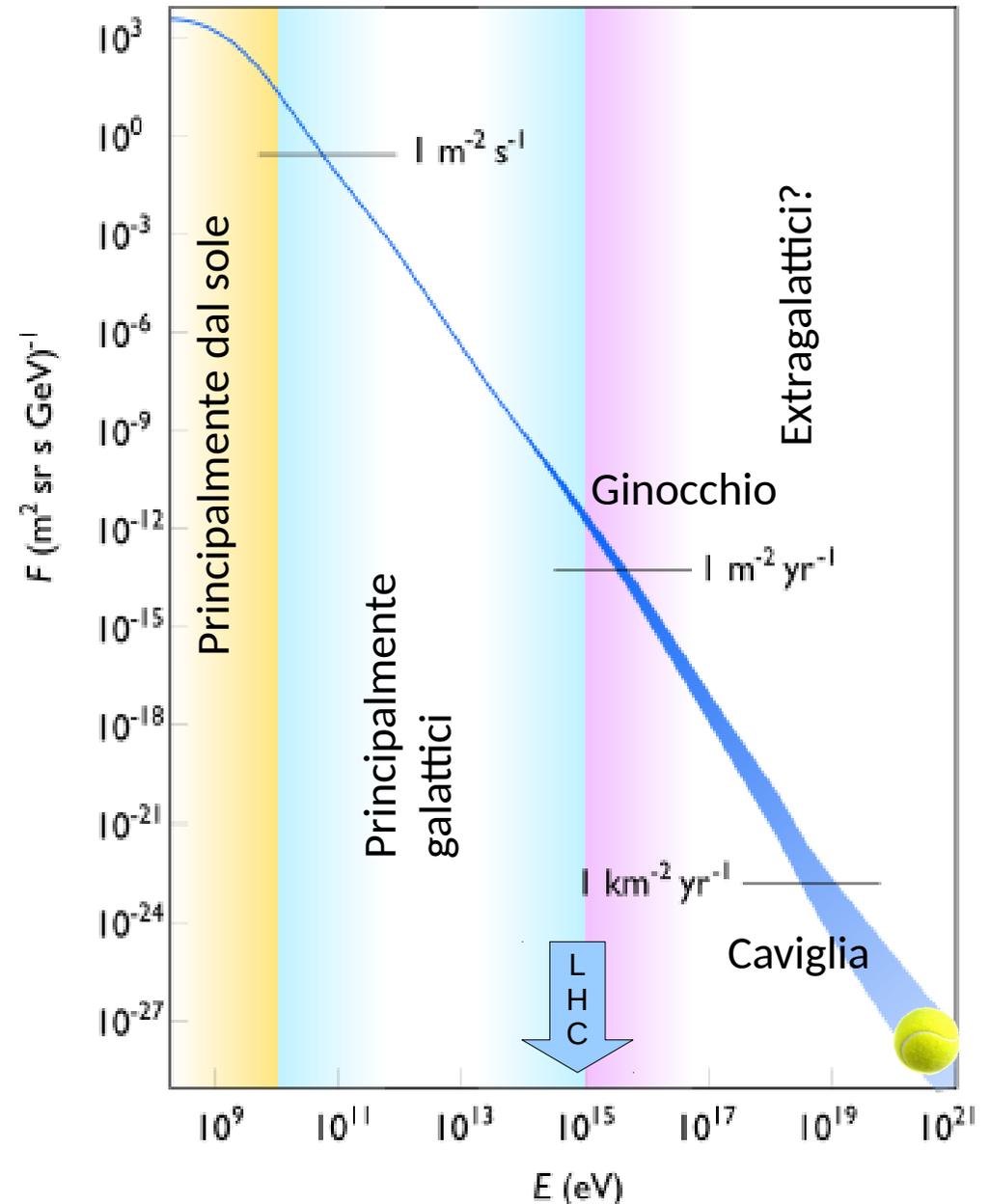
Sono particelle atomiche/subatomiche che arrivano sulla Terra

- principalmente **protoni** (~90%)
- nuclei di **elio** (~9%)
- **elettroni** (~1%)
- **raggi gamma** (~0.1%)

Il flusso diminuisce rapidamente all'aumentare dell'energia

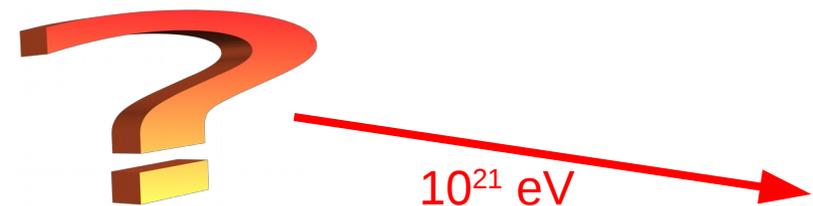
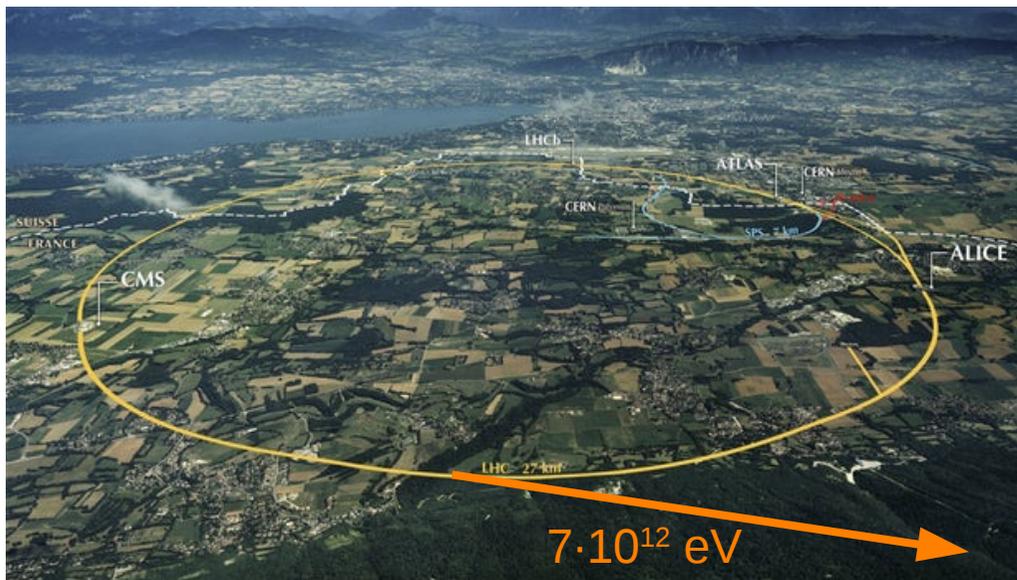
Una volta al secondo arriva sulla Terra una particella con la stessa energia di una pallina da tennis ben lanciata.

- Energie 100 milioni di volte più grandi delle energie che riusciamo a produrre sulla Terra (ex: al CERN)



Energie

- **1 GeV = 10^9 eV** : energia minima per creare un **protone** (relazione di Einstein $E=mc^2$)
- **7000 GeV = $7 \cdot 10^{12}$ eV = 7 TeV** : energia di un **protone accelerato** in un fascio di LHC (energia cinetica di una zanzara)
- **$6 \cdot 10^{18}$ eV = 1 Joule** : energia cinetica di una massa di 100 grammi che cade da un metro
- **10^{21} eV**: energia cinetica di una palla da tennis ben lanciata (sono le più grandi energie mai misurate in una particella singola, oltre cento milioni di volte più alte delle energie dei fasci di LHC al CERN)



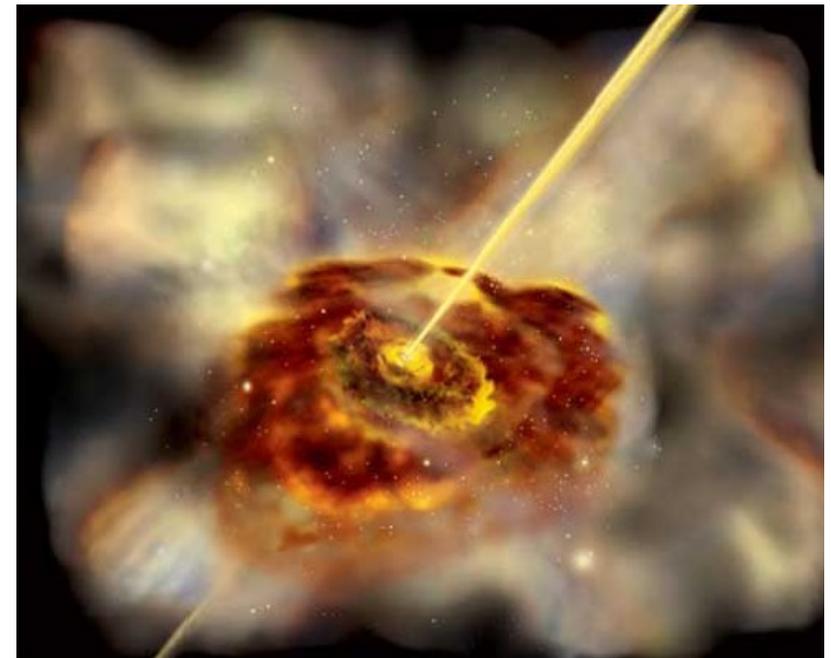
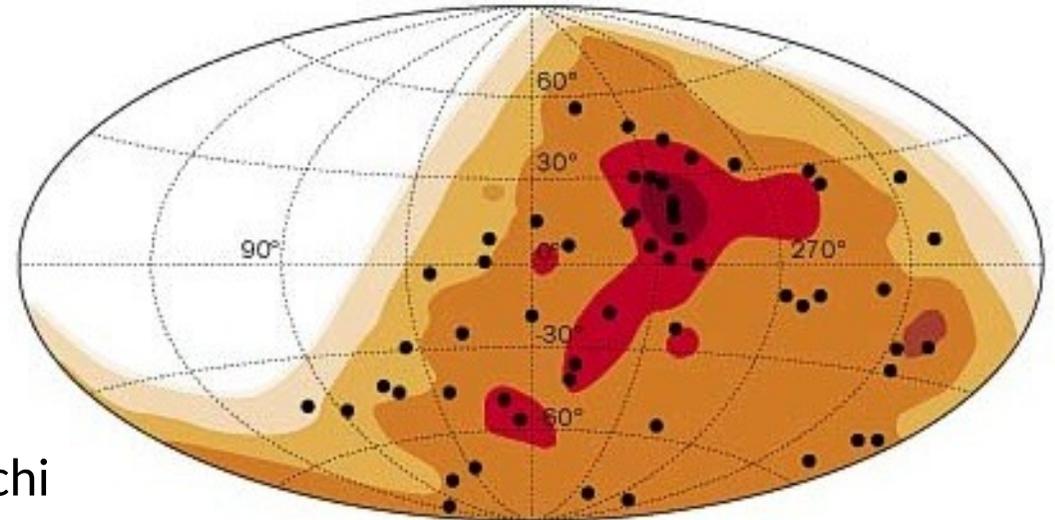
Origine

I raggi cosmici non sembrano arrivare da una particolare direzione (a parte piccoli effetti)

Abbiamo capito che le loro energie sono prodotte da collassi gravitazionali:

Meno di 1 millijoule: probabilmente galattici (resti di supernova)

Sopra 1 mJ: probabilmente extragalattici (buchi neri supermassicci al centro delle galassie)

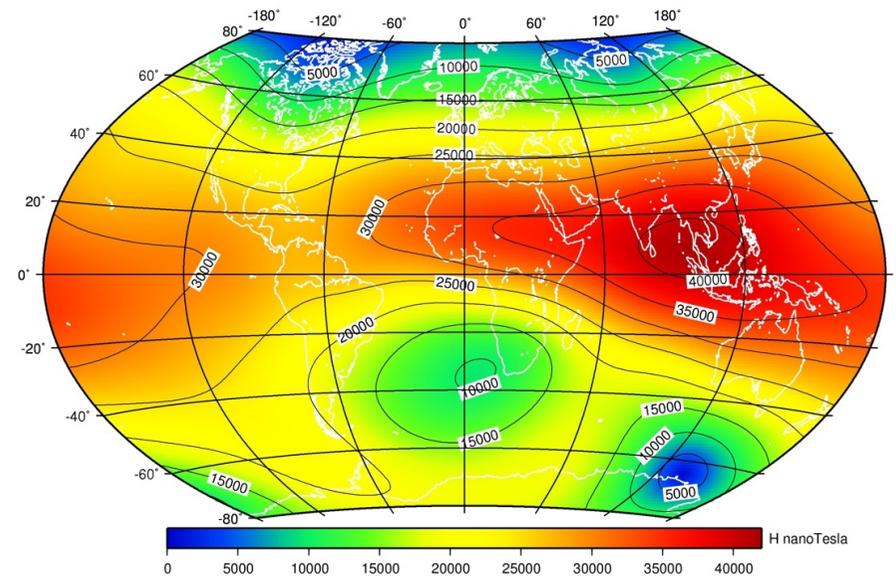
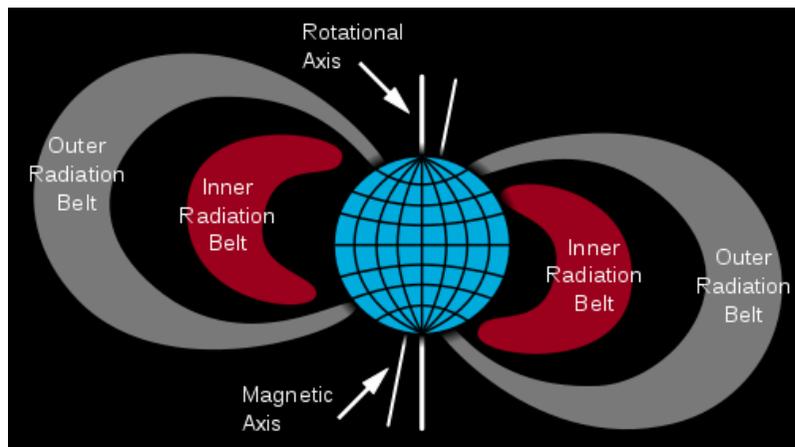
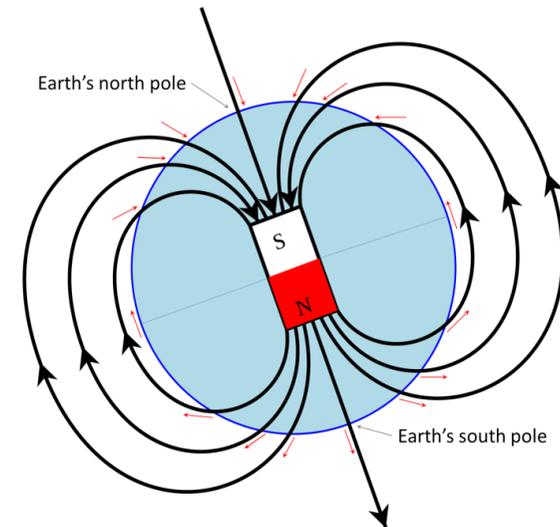


Schermo magnetico

Il campo magnetico terrestre è simile a quello generato da una barra magnetizzata (inclinato e spostato rispetto il centro)

- Alcune particelle cariche verranno respinte (a bassa energia, o meglio *rigidità*)
- Alcune rimangono intrappolate (“fascie radioattive”)
- Alcune riusciranno a passare e a raggiungere l’atmosfera

Dipende dall’intensità del campo: dipendera da dove mi trovo



NB: 90% dell’atmosfera entro 16 km

Atmosfera

Quando i raggi cosmici entrano nell'atmosfera, sono assorbiti, ma generando particelle secondarie

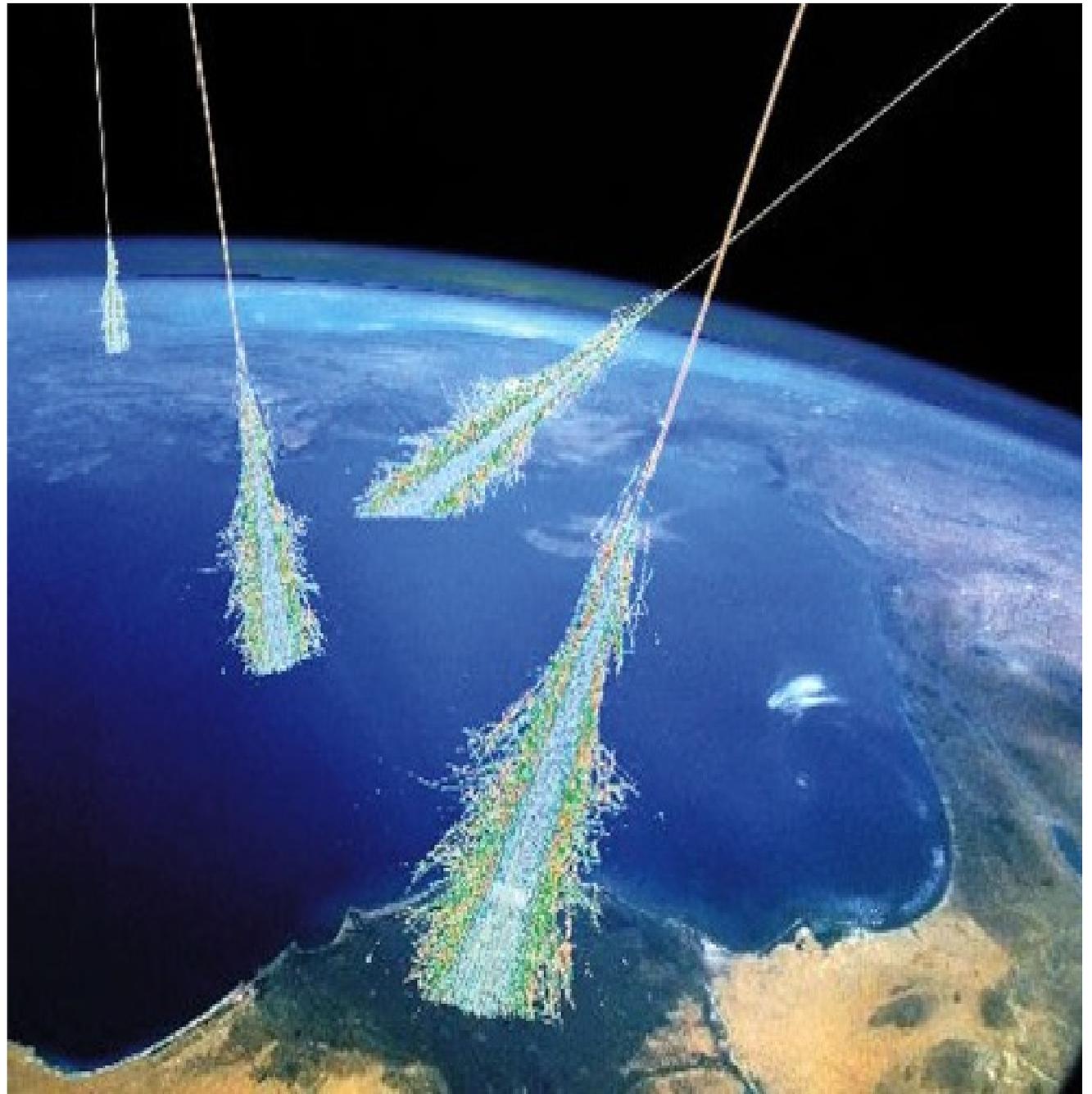
Queste a loro volta sono assorbite e ne producono altre, fino a che le energie scendono abbastanza per avere assorbimento senza produzione

Si formano sciami nella parte superiore dell'atmosfera

L'atmosfera ci protegge da questa radioattività (a cui è più esposto chi vive in alta montagna e chi viaggia spesso in aereo)

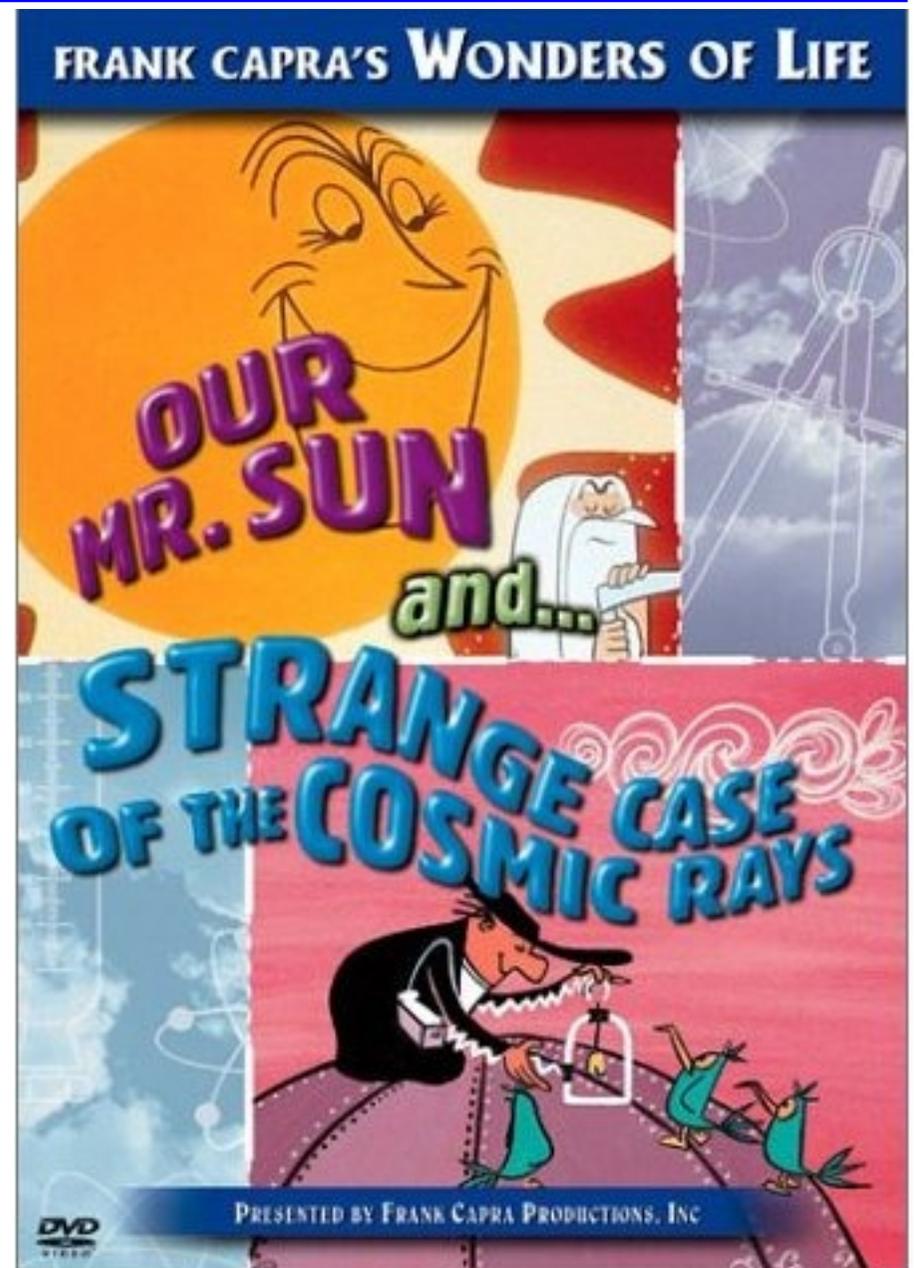
Giungono fino al livello del mare principalmente particelle secondarie

Riccardo Rando - ICD - Padova 30/11/2017

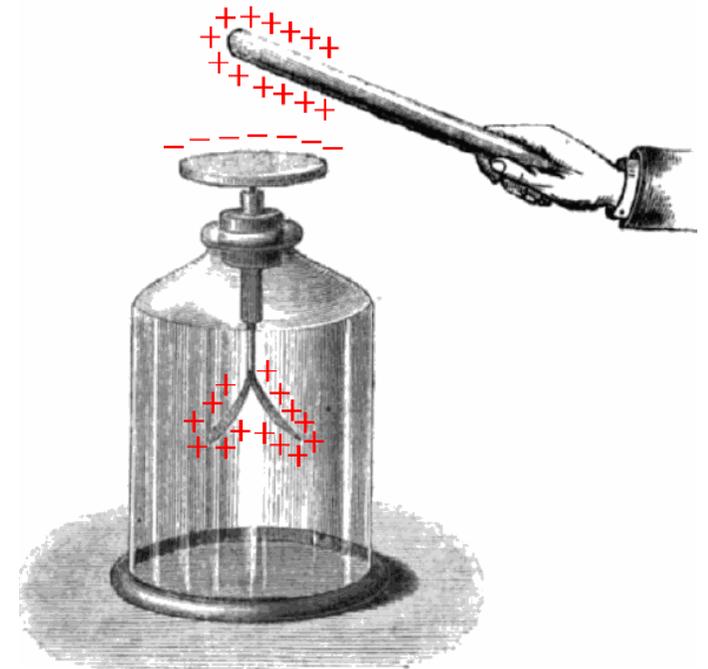


Un'indagine lunga un secolo

*(Film prodotto da
F. Capra/W. Disney
nel 1957)*



Scarica spontanea di un elettroscopio

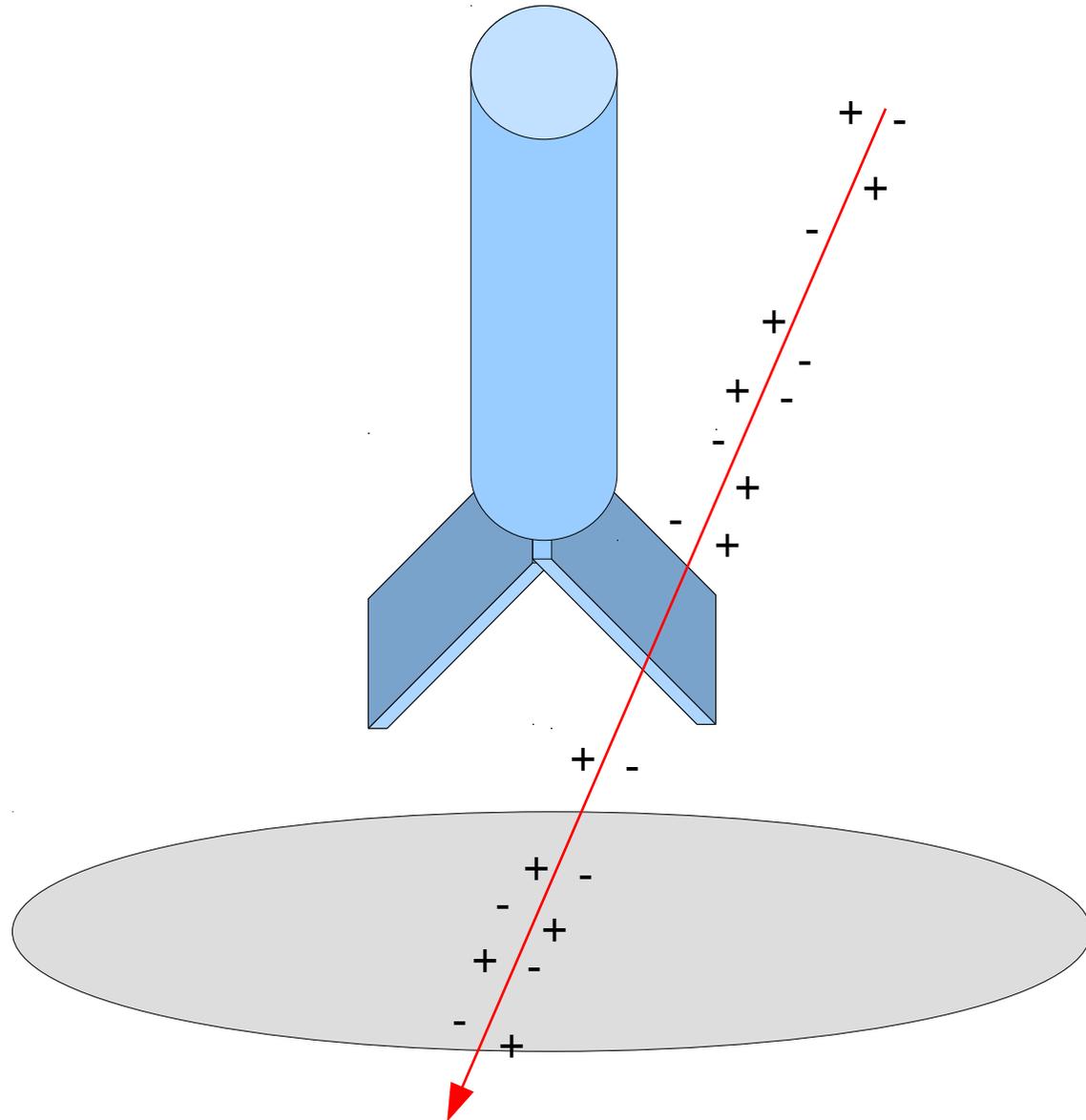


1785: Coulomb scoprì che un elettroscopio carico, anche se perfettamente isolato, si scarica

1900: Le scoperte di Marie (33 anni) e Pierre Curie consentono di concludere che questa scarica spontanea è dovuta alla radioattività naturale



Scarica

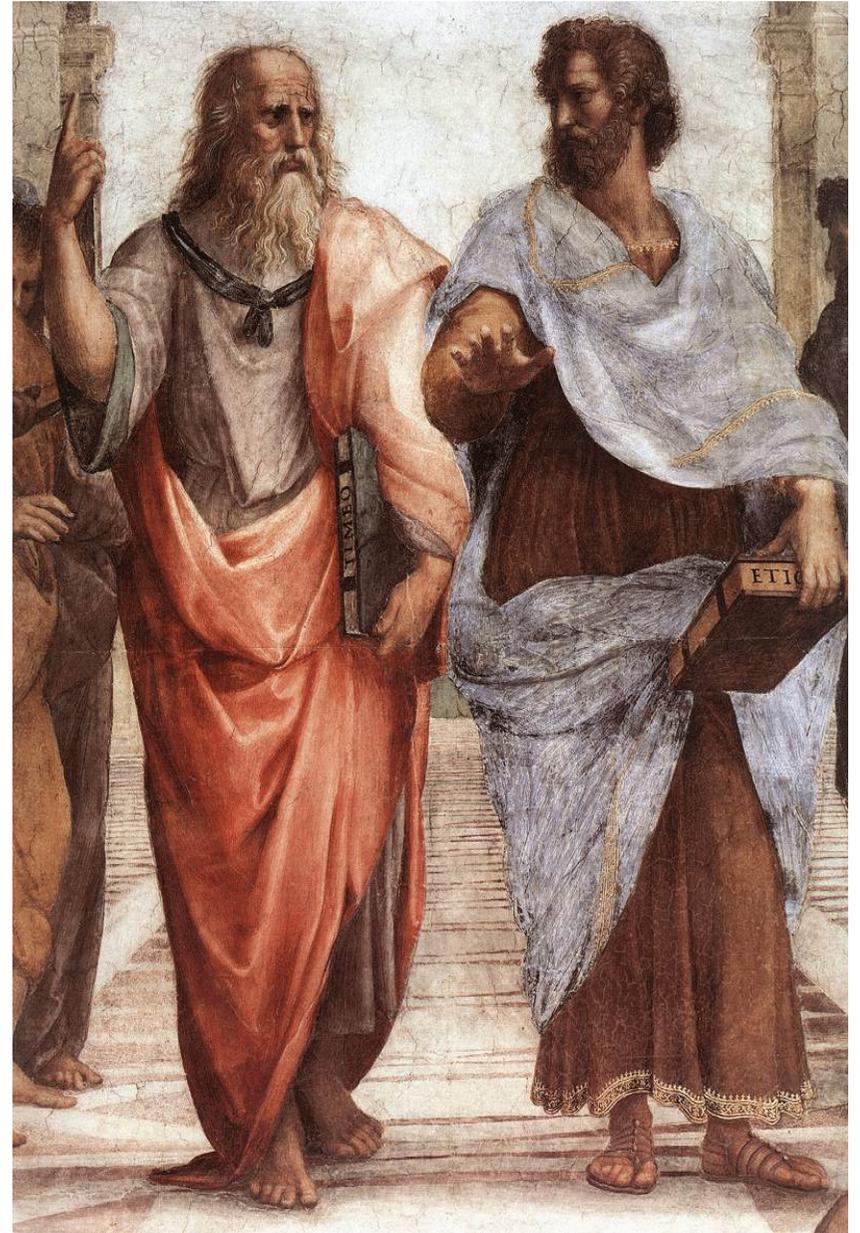


Ipotesi sulla provenienza

Da dove viene questa radioattività naturale?

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

Nel primo decennio del '900
l'opinione dominante era che
venisse dal suolo



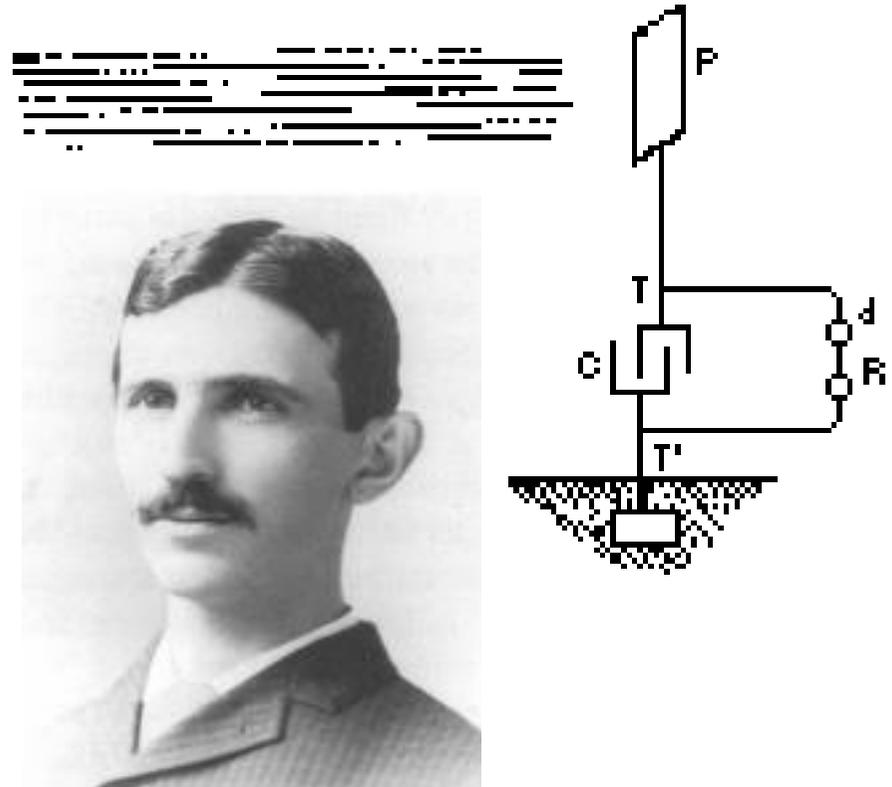
Nikola Tesla: un'intuizione

Nel 1901, a dibattito appena iniziato, Nikola Tesla aveva brevettato un “*Apparatus for the Utilization of Radiant Energy*”

“These radiations are generally considered to be ether vibrations of extremely small wave lengths [...]

This phenomenon, I believe, is best explained as follows: the sun as well as other sources of radiant energy throw off minute particles of matter positively electrified, which [...] communicate an electrical charge”

che poteva utilizzare come fonti energetiche “*the Sun, as well as other sources of radiant energy, like cosmic rays*” (aggiunta di Tesla nel 1933)



- Potrebbe funzionare?
SI'
- Quanta potenza puo' generare?
 $P < 3 \text{ GeV} \times 10000 \text{ CR/sm}^2$
 $P < 5 \mu\text{W/m}^2$
(Energia solare: $\sim 200 \text{ W/m}^2$)

Padre Wulf (~1910)

Ebbe l'idea di misurare la radioattività sulla torre Eiffel e confrontarla con il suolo

- Misura decisiva nelle vacanze di Pasqua del 1910

Se la radioattività viene dal suolo ci si attende una riduzione esponenziale $e^{-h/L}$

- Radiazione dimezza salendo di ~330 m
- Ci si aspettava che dimezzasse ogni ~80 m
- I risultati non sono conclusivi

Nota: all'epoca si era convinti che la radioattività fosse costituita da raggi gamma

Interpretato come conferma dell'opinione prevalente: la radioattività viene dal suolo



~300 m

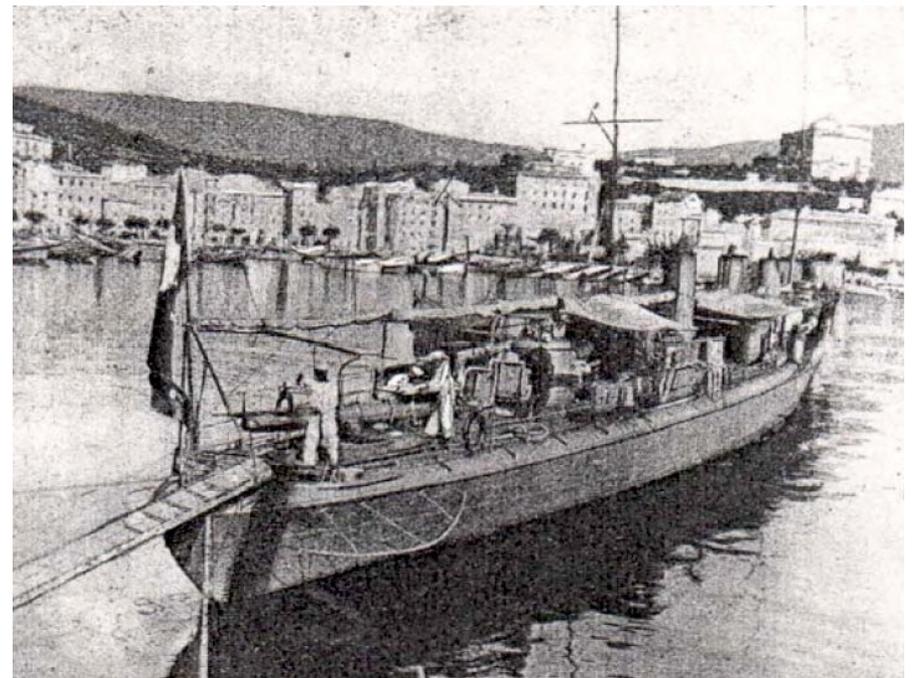
Domenico Pacini (1908-1912)

L'idea di Pacini: confrontare la radioattività alla superficie del mare con quella misurata sott'acqua lontano dal suolo

Dal 1908, Pacini ha a disposizione il cacciatorpediniere "Fulmine", messo a disposizione dalla Regia Marina su richiesta del Direttore dell'IMG

A 3 metri di profondità a Livorno (e poi in ottobre a Bracciano) Pacini riscontra, in accordo con la sua ipotesi, una riduzione del 20% della radioattività

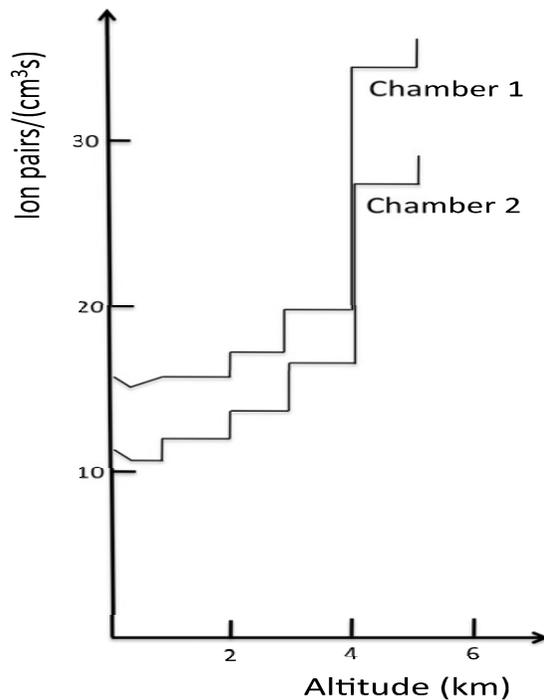
Nel febbraio 1912 scrive sul Nuovo Cimento che esiste *"una sensibile causa ionizzante, con radiazioni penetranti, indipendente dall'azione diretta delle sostanze radioattive del terreno."*



Victor Hess (~1912)

L'austriaco Victor Hess propone una misura complementare: la radiazione aumenta o diminuisce in quota?

Nel 1912 Hess fa 7 voli. Nel volo finale, nell'agosto 1912, raggiunge i 5300 metri



I risultati mostrano che la radioattività cresce rapidamente oltre i 3000 metri

Hess conclude che parte della radiazione viene dal suolo, e parte dall'alto (fuori dalla Terra)

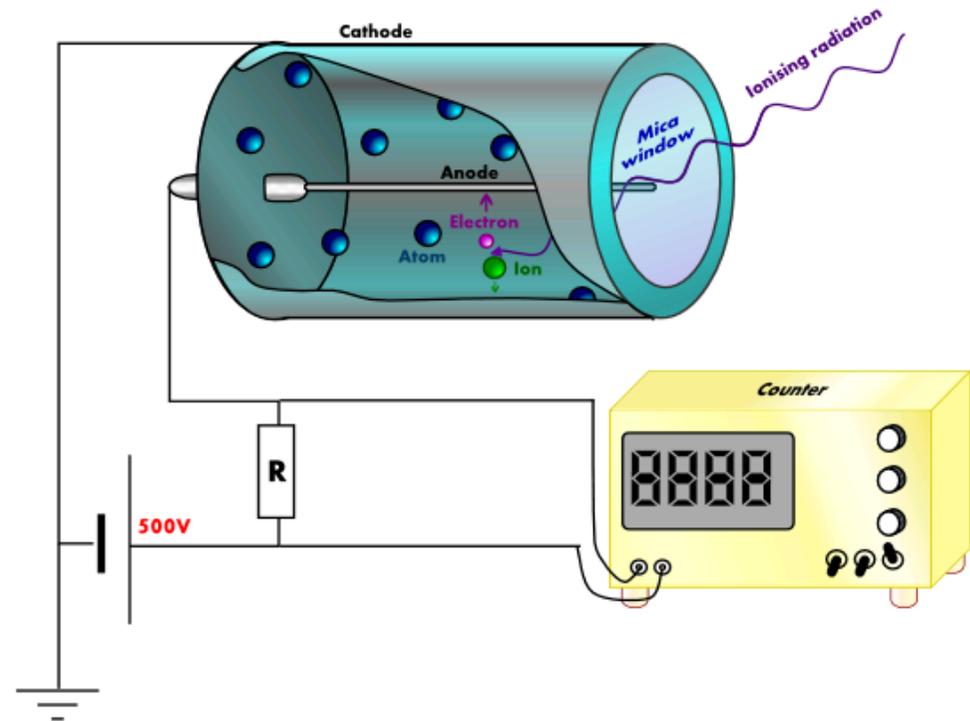
Il lavoro e' pubblicato nel Novembre 1912; non cita l'ultimo e decisivo lavoro di Pacini.

Contatore Geiger

Alla fine degli anni '20 i tubi contatori di Geiger entrano in scena

- misure piu' facili
- risposta piu' veloce (possibilita' di costruire coincidenze)

Beppo Occhialini: "the Geiger-Muller counter was like the Colt in the Far West: a cheap instrument usable by everyone on one's way through a hard frontier."



Bruno Rossi

Inizia a lavorare ad Arcetri, e nel 1932 vince la cattedra a Padova

- fonda l'Istituto di Fisica; **progetta l'edificio in cui ci troviamo** e lo inaugura
- sviluppa il circuito di coincidenza, progetta l'esperimento che consente di dimostrare che i raggi cosmici sono prevalentemente positivi, **scopre (in questo giardino) gli sciami di particelle**

Nel 1938 e' costretto ad allontanarsi dall'Italia per le leggi razziali

- Copenhagen, GB, USA; Progetto Manhattan, astrofisica X, ...

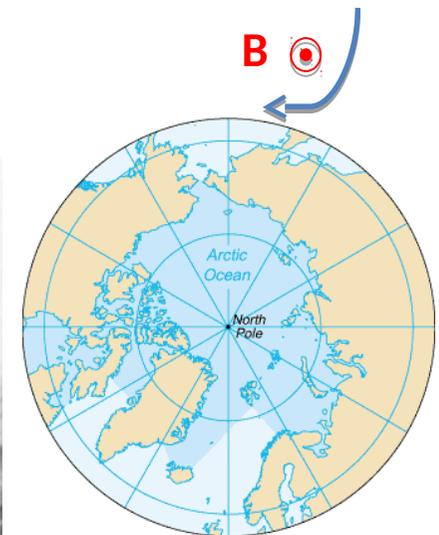
Probabilmente un genio come Fermi, penalizzato anche da un carattere non incline a compromessi



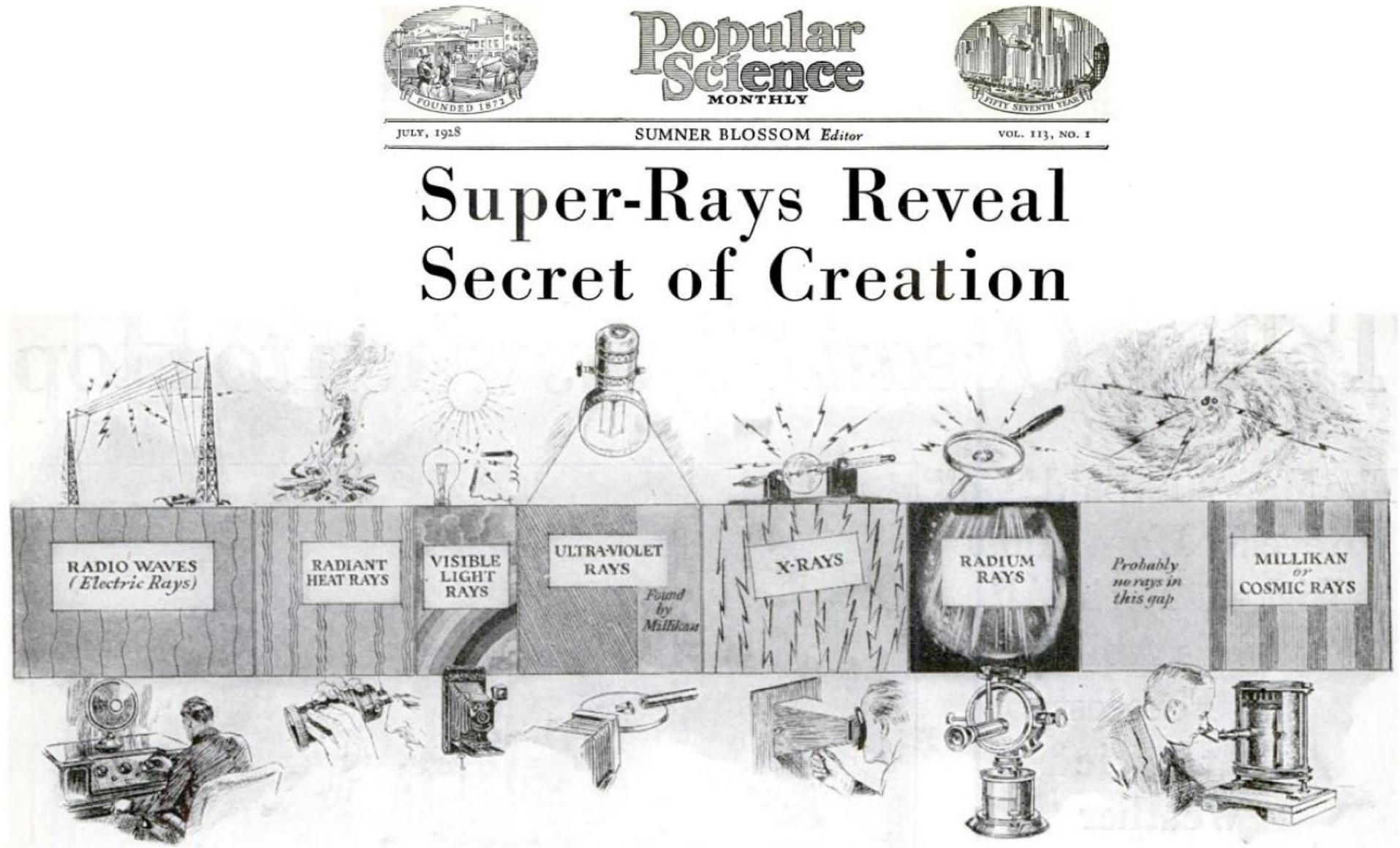
“Nuove” scoperte

Dopo la guerra il baricentro delle ricerche si sposta negli Stati Uniti; all’inizio gli americani “riscoprono tutto” senza citare gli europei

- 1925: **Millikan** conferma l’esperimento di Pacini
- 1928: **Clay** dimostra che i raggi cosmici sono prevalentemente carichi (effetto geomagnetico)
- 1933: **Alvarez e Compton** scoprono che sono prevalentemente positivi (effetto est-ovest, previsto da Rossi)
- 1933: **Rossi** scopre che entrando nell’atmosfera producono sciami di particelle (Padova/Asmara)

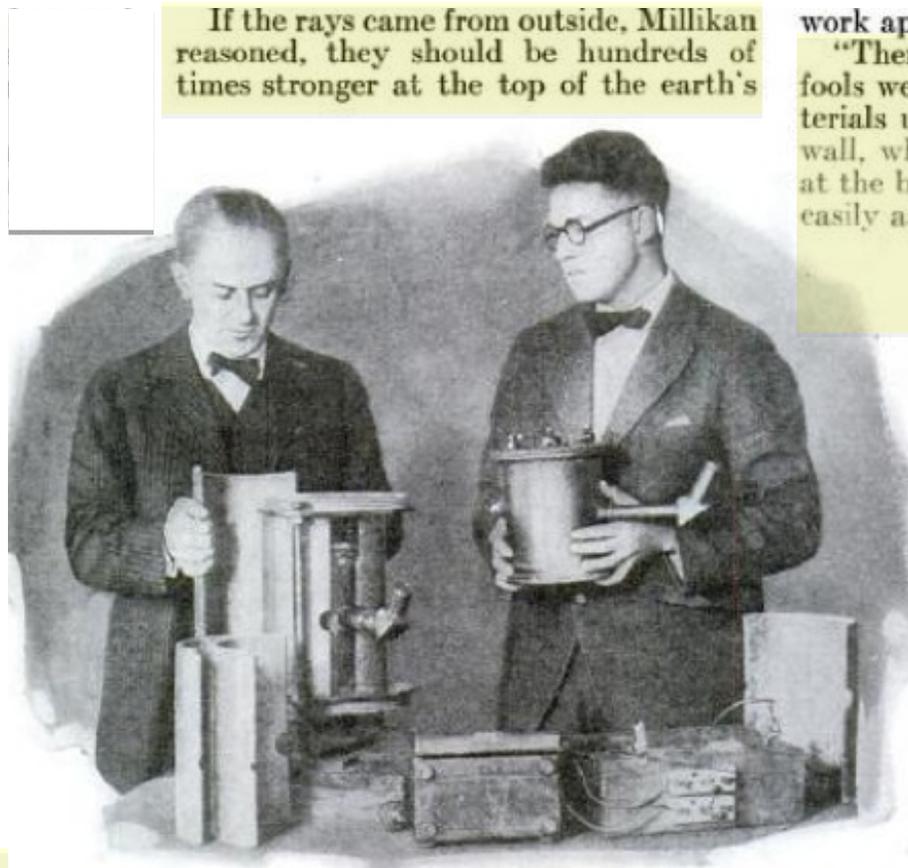


Una buona campagna pubblicitaria



1928... 6 anni dopo Pacini e Hess

From the lips of Dr. Millikan in Washington, I heard the thrilling story of his discovery. I found him a vital, dynamic man of sixty, whose handshake crushed my fingers and whose simple words carried the assurance of authority. That story was one of years of fruitless experiment, bitter disappointment, physical hardship, and final triumph. He told of struggles up rugged mountains on two continents to find and measure the elusive rays—then of a flash of inspiration only a few weeks ago that proved the rays the actual messengers of creation.



Dr. Millikan (left) and Dr. G. Harvey Cameron with electroscopes they sank in California and Bolivia mountain lakes to detect cosmic rays. The instruments were raised and examined through the eyepiece

air than at the bottom. He resolved to send a sounding balloon with instruments to record them clear to the top of the atmosphere.

work apparently wasted.

“Then,” said Millikan, “we saw what fools we had been to carry building materials up that mountain. Why build a wall, when you can bury an electroscopes at the bottom of a mountain lake just as easily as you can hide it behind a lead screen, and the water of the lake will serve as the equivalent of many feet of lead. The next thing to do was to go at it sensibly. We would climb to the top of 15,000-foot Mount Whitney, in southern California—the highest mountain in the United States—and there, under its brow, would sink our electroscopes in the pure, snow-fed waters of Muir Lake.”

With Dr. Cameron and a couple of students, Millikan toiled up Mount Whitney in August, 1925, and found the secret of the stars.

Two thousand feet from the top, they had to shoulder the boats, lumber to build rafts, and instruments their mules had carried.

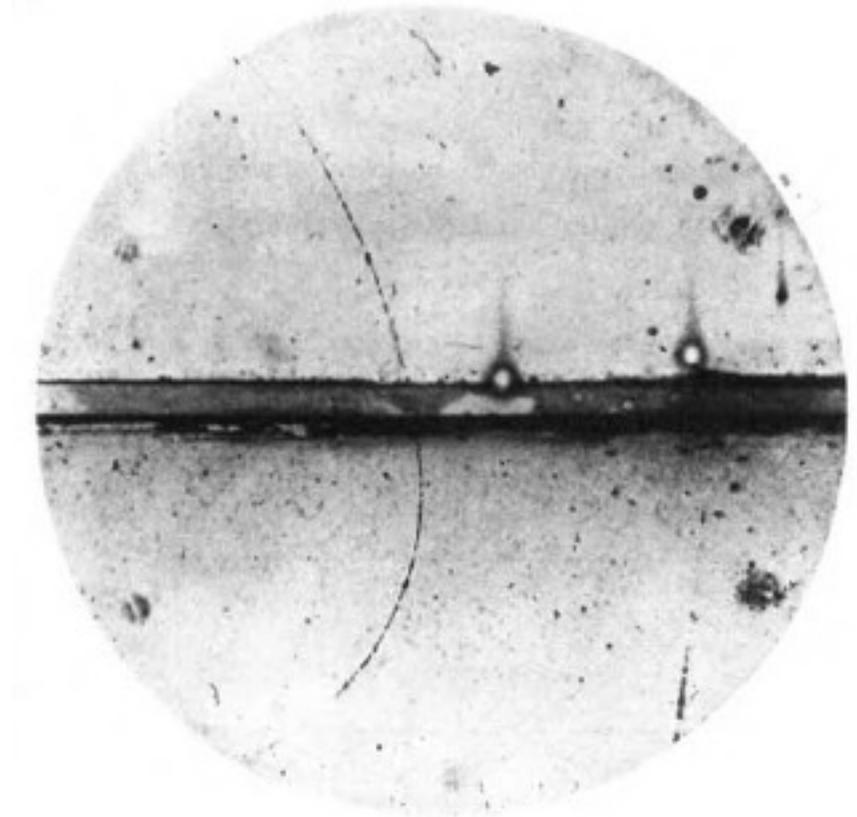
Anxiously they sank their electroscopes. A cry of triumph echoed through the frosty air. There were cosmic rays—rays that pierced the water for fifty feet, downward, and then stopped!

Una sorpresa: antimateria

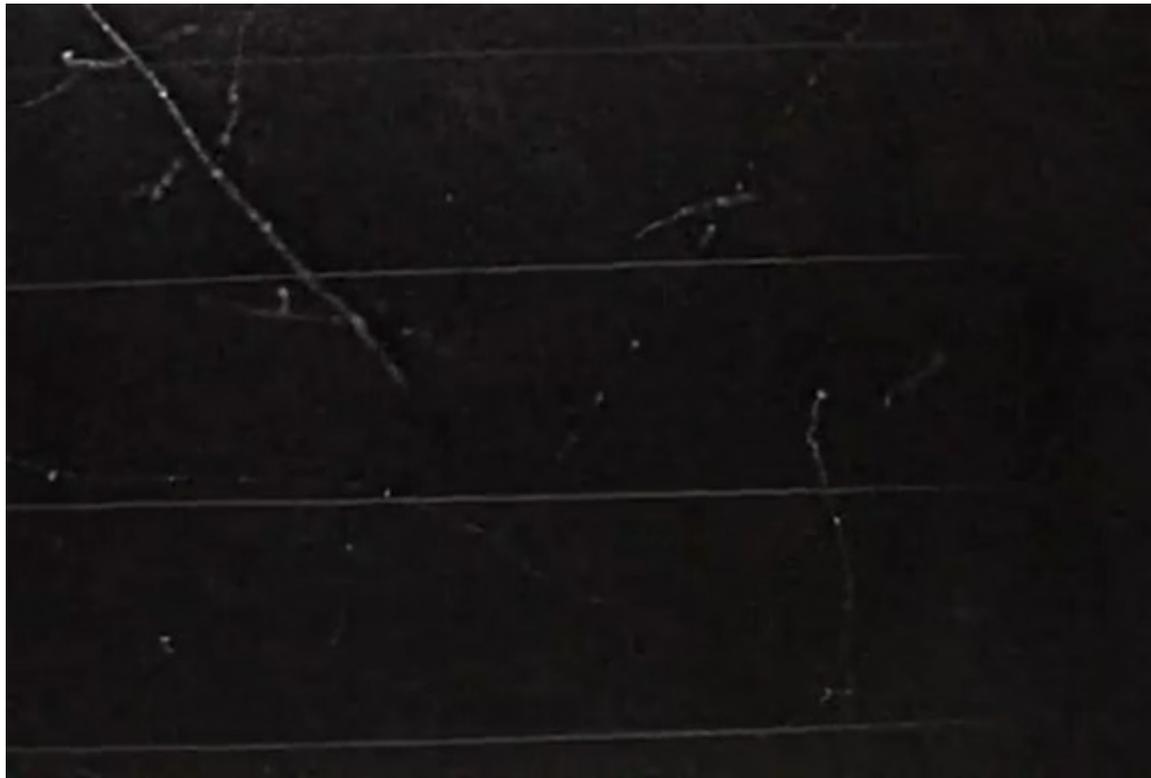
Fotografia scattata da **Anderson** in una **camera a nebbia**: un raggio cosmico anomalo

- Dalla direzione di curvatura in campo magnetico si conclude che la particella ha carica positiva
- La massa e' quella dell'elettrone
- E' un elettrone positivo! (1934)

L'equazione di Dirac (1927-28) ne prediceva l'esistenza...



Camera a nebbia



YouTube

Search



How to build a Cloud Chamber

136,983 views

1K 10 SHARE ...

USLHC
Published on 20 Jan 2015

SUBSCRIBE 1.9K

Nobel (1936)

Finalmente nel '36 i successi delle ricerche sui raggi cosmici vengono riconosciuti. Premio Nobel a Hess e Anderson. Hess era stato nominato da Compton:

“E’ arrivato il momento in cui possiamo dire che quelli che chiamiamo raggi cosmici vengono da regioni dello spazio lontane dalla Terra e che l’uso di questi raggi ha portato a risultati di tale importanza che possono essere considerati una scoperta di prima grandezza. Credo sia corretto dire che Hess per primo ha stabilito che la ionizzazione cresce con l’altezza, e che è stato il primo a poter concludere con sicurezza che parte della ionizzazione è di origine extraterrestre.”



Molte nuove scoperte con i raggi cosmici

- 1937: Il muone, o leptone mu (Neddermeyer+)
- 1947: Il pione (o mesone p), il primo mesone, scoperto da Lattes, Occhialini & Powell (previsto da Yukawa nel 1935)
- 1947: Il kaone (o mesone K), la prima particella strana, Rochester & Butler
- 1951: Λ , il primo barione strano (Armenteros+)
- 1954: Violazione della simmetria di parità (G-stack, la prima collaborazione Europea)
 - L'Universo visto allo specchio si comporta in un modo differente

Il dopoguerra

- Voli su pallone e laboratori sulle montagne
- Roma, immediatamente dopo la guerra: laboratorio al Plateau Rosa
- Padova, primi anni '50: il laboratorio del Fedaia (sotto la diga che raccoglie l'acqua di disgelo della Marmolada)
 - Strumentazione di Rossi, Bassi, Someda
 - Primo elettromagnete per la misura di quantità di moto dalla curvatura (lo vedete qui fuori in giardino)
 - Visite di Fermi, Blackett, Powell

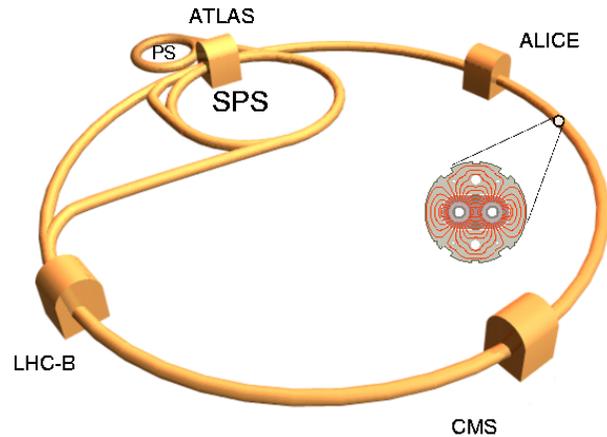
Poi inizia l'era degli acceleratori,
e uno zoo di particelle...

LABORATORIO RAGGI COSMICI



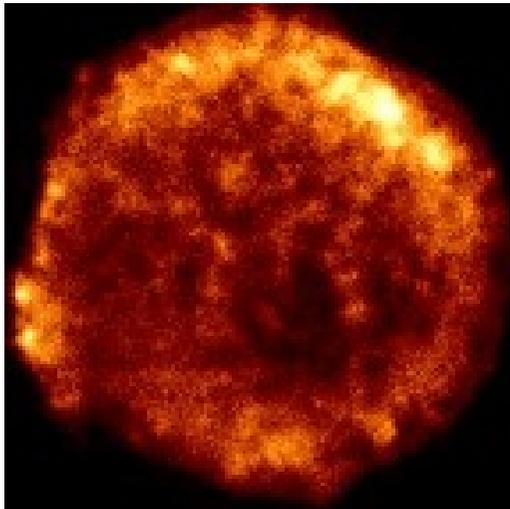
L'era degli acceleratori

Large Hadron Collider

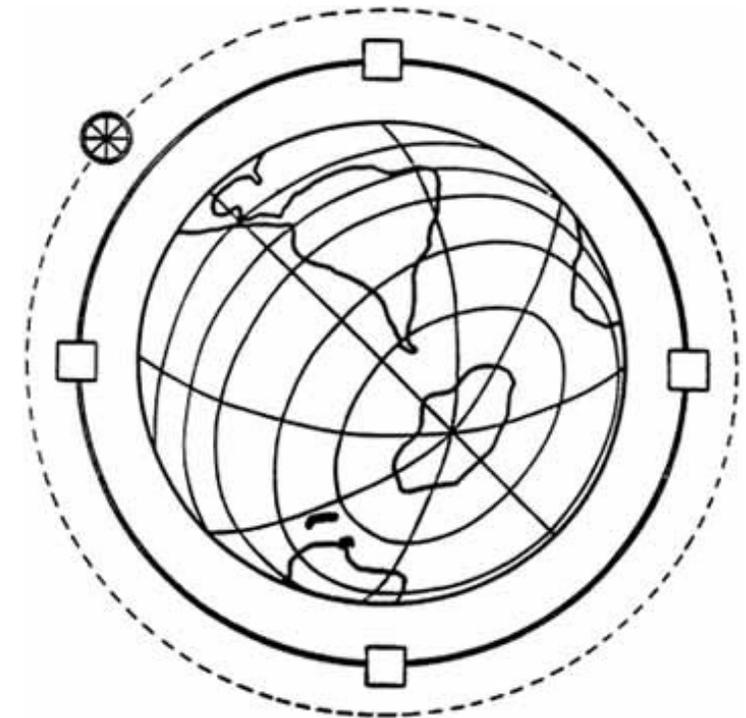


$R \sim 10 \text{ km}$, $B \sim 10 \text{ T}$
 $E \sim 10 \text{ TeV}$

Tycho SuperNova Remnant



$R \sim 10^{15} \text{ km}$, $B \sim 10^{-10} \text{ T}$
 $E \sim 1000 \text{ TeV}$



$R \sim 6000 \text{ km}$, $B \sim 2 \text{ T}$
 $E \sim 5000 \text{ TeV}$

Acceleratore massimo per protoni
(Fermi 1954):

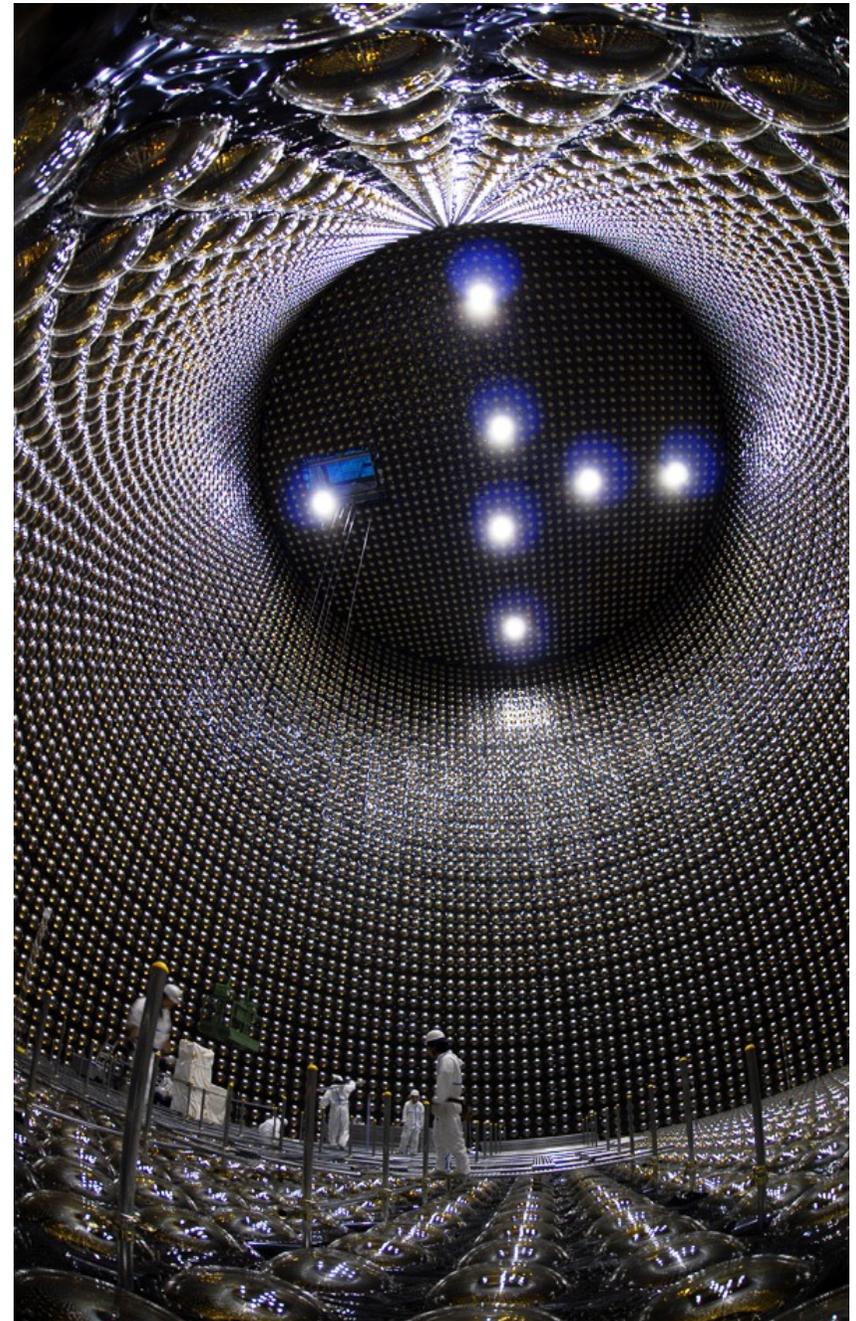
La massima energia raggiungibile da
un acceleratore sulla Terra è $\sim 5000 \text{ TeV}$ 25

La storia continua

In considerazione dei limiti fondamentali degli acceleratori terrestri, **i raggi cosmici sono ancora alla frontiera della fisica delle alte energie.**

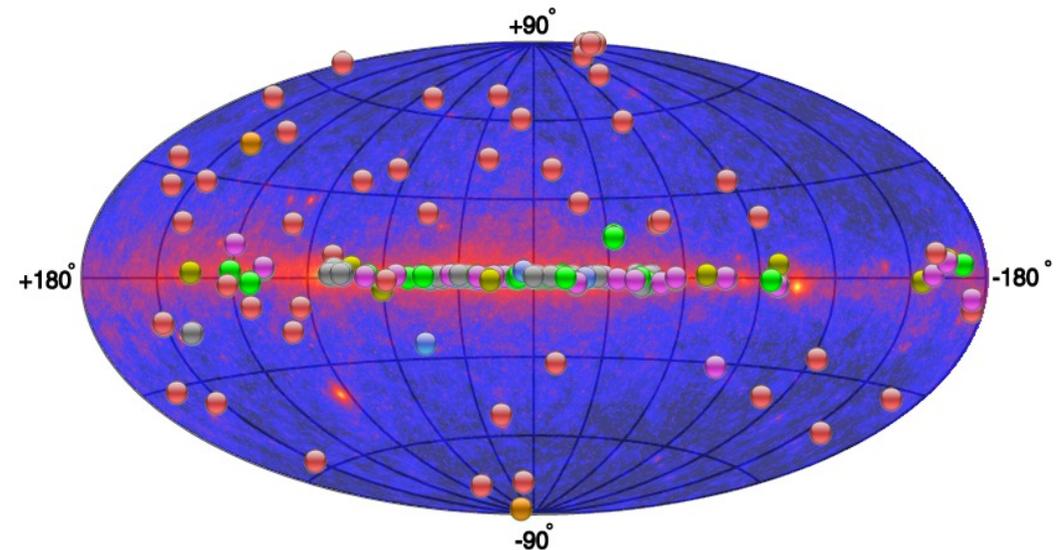
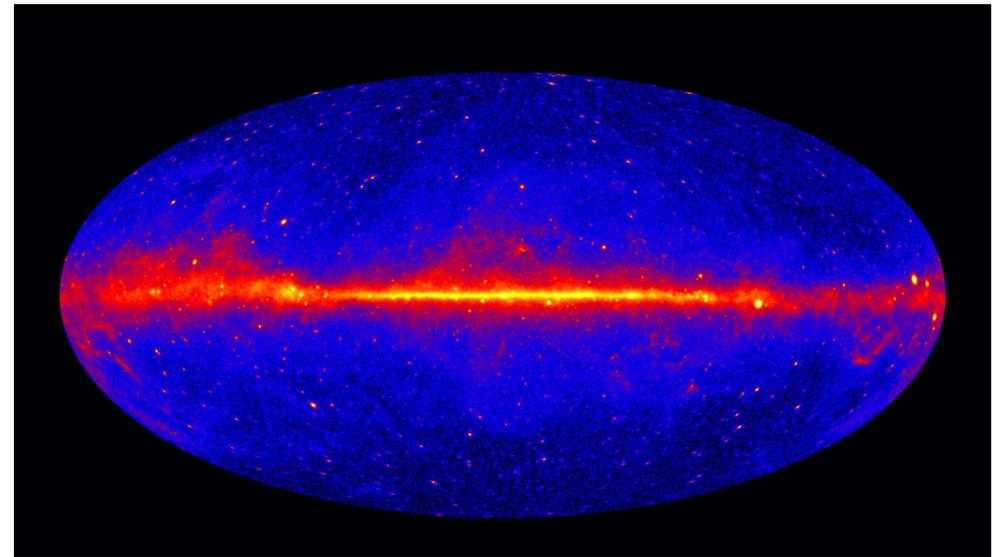
Il risultato più importante (a parere di molti) della fisica delle particelle elementari negli ultimi anni è venuto dai raggi cosmici: il neutrino ha una massa diversa da zero.

Nel 1998, il rivelatore Super-K in Giappone osserva l'oscillazione fra i tipi diversi di neutrini cosmici, un risultato che richiede una massa diversa da zero



Altri risultati

- Radiazione cosmica di fondo (1964)
- Emissione di raggi X
 - Razzi (1962) e satelliti (Uhuru 1970, ...)
- Emissione di raggi gamma
 - SAS2 ('72), COS-B ('75), GGRO ('91)
 - Telescopi MAGIC, HESS e Fermi: scoperto che alcuni resti di supernova sono sorgenti di raggi cosmici fino a 1000 TeV
- Particelle cariche
 - AMS, PAMELA, ...
- Raggi cosmici di energia estremamente alta ($> 1\text{J}$)
 - 1962 a Volcano Ranch; Pierre Auger Obs. in Argentina



Astrofisica “multi-messenger”

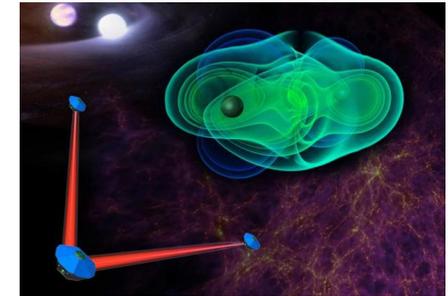
Sfida del 21° secolo: osservare contemporaneamente varie particelle provenienti dallo stesso oggetto

Enfasi su quello che non viene deviato dai campi magnetici (terrestre e galattico)

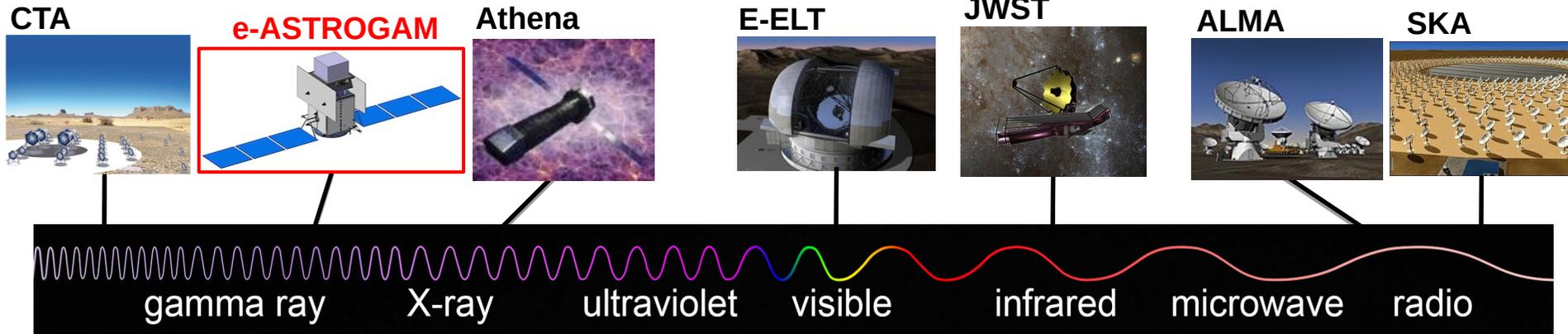
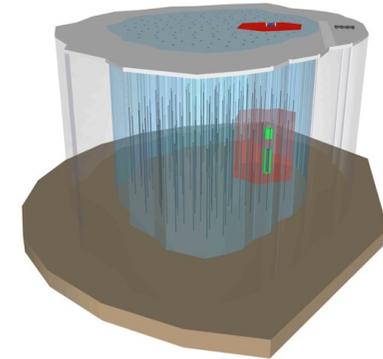
- Fotoni (da radio a gamma)
- Neutrini
- Onde gravitazionali

Grandi successi per i telescopi della generazione attuale, grandi aspettative per quelli della prossima

eLISA - Gravitational waves



Km3Net/IceCube-Gen2 - n



Conclusioni

Ogni secondo più di cento particelle di alta energia attraversano ciascuno di noi. Sono i raggi cosmici, hanno energie spesso molto maggiori di quelle che noi umani riusciamo a produrre, e provengono da sorgenti extraterrestri. Sono stati scoperti cent'anni fa grazie a un lavoro geniale e spesso oscuro.

La scoperta dei raggi cosmici ha coinvolto scienziati di tutto il mondo e si è svolta in un periodo caratterizzato da mancanza di comunicazione e dal nazionalismo causato principalmente dal clima pre- e post- guerra.

I raggi cosmici sono all'origine di grandi risultati in fisica fondamentale e in astrofisica, e a cent'anni dalla loro scoperta sono ancora la scienza di frontiera, piena di enigmi e di possibilità