

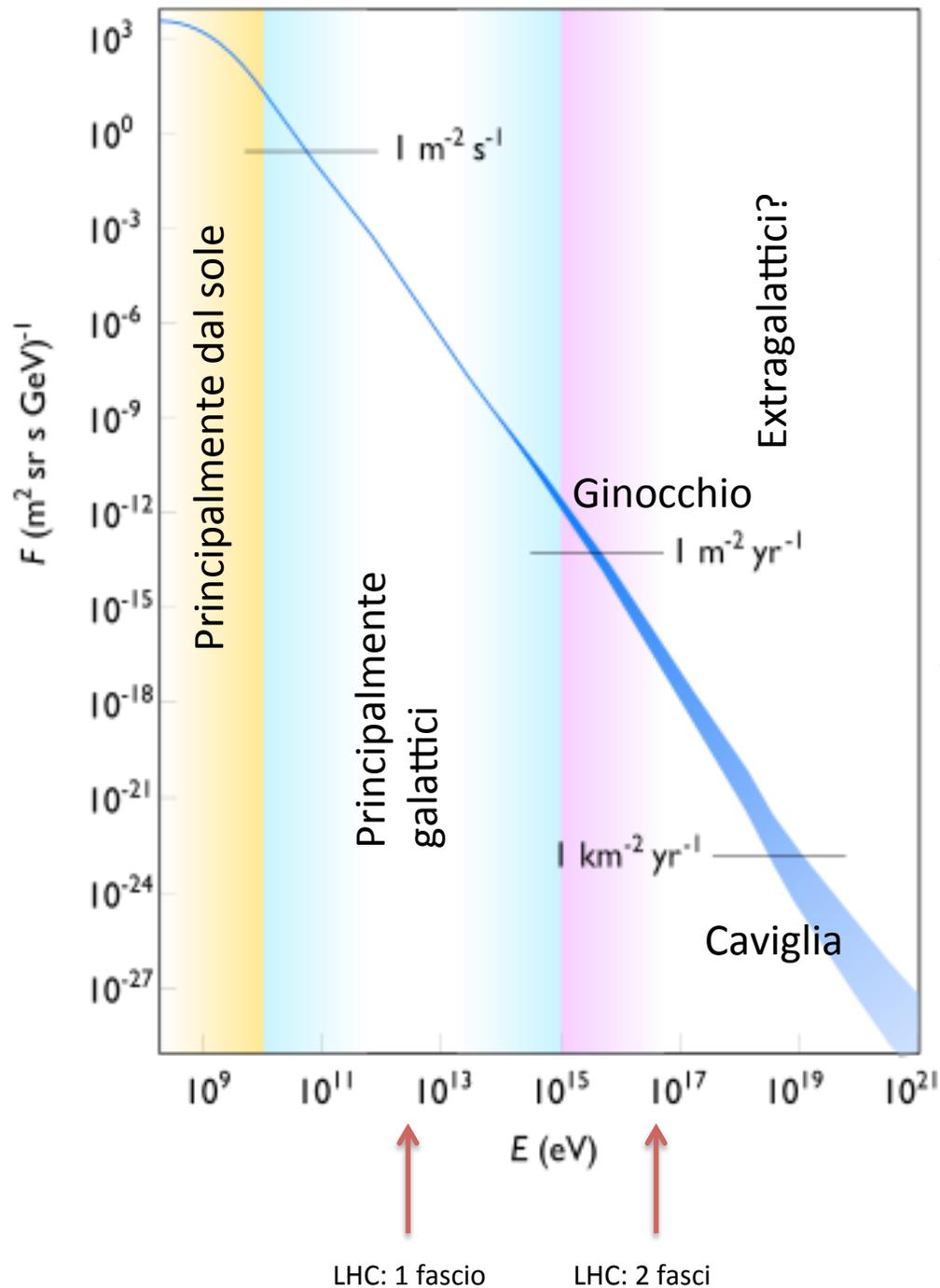
La vera storia dei raggi cosmici

A. De Angelis, "L'enigma dei raggi cosmici", Springer 2012
A. De Angelis, Le Scienze, Agosto 2012

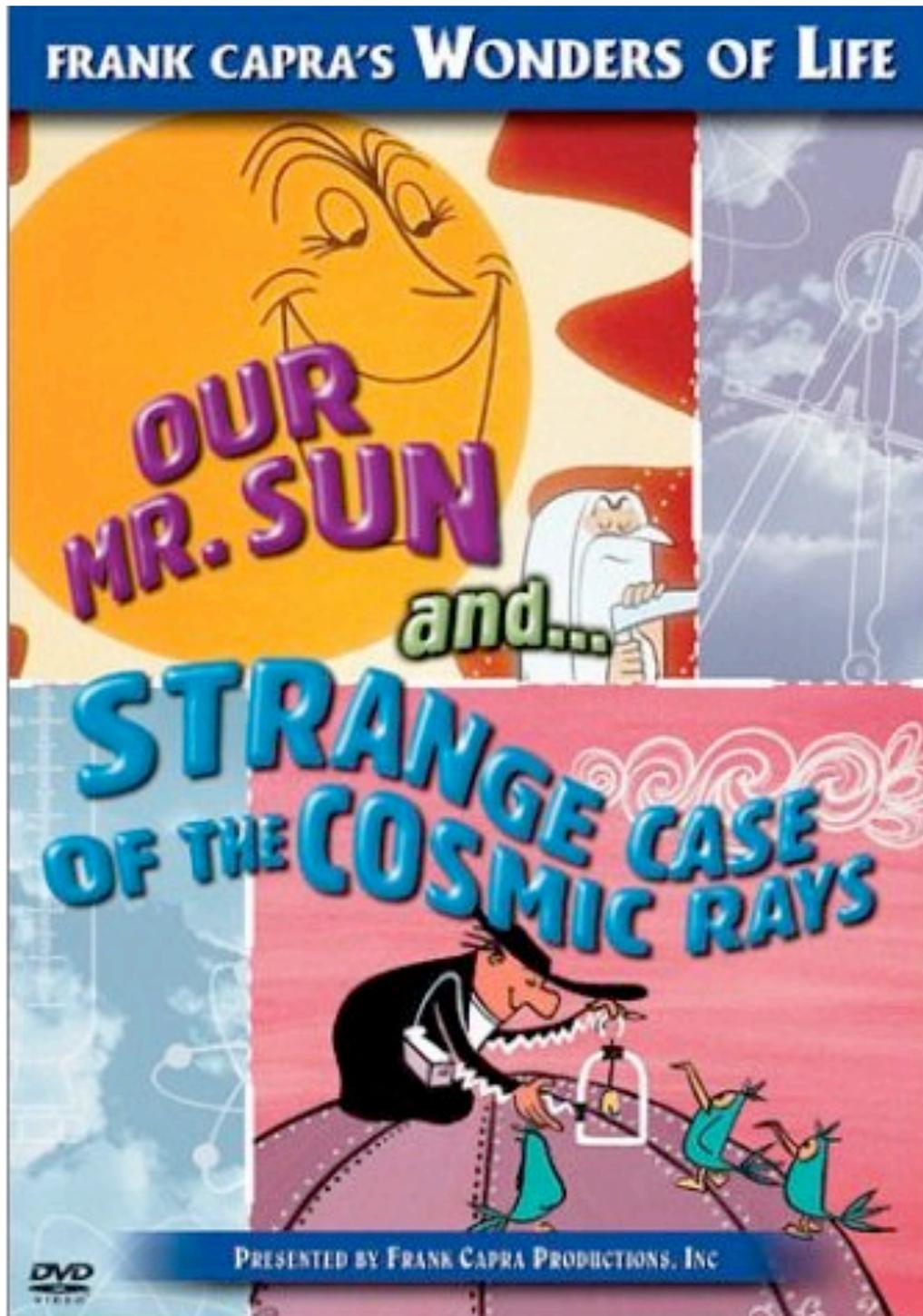
Alessandro De Angelis (alessandro.de.angelis@cern.ch)

Univ. Udine INFN, INAF & LIP/IST
Bologna, Novembre 2013

Che cosa sono i raggi cosmici?



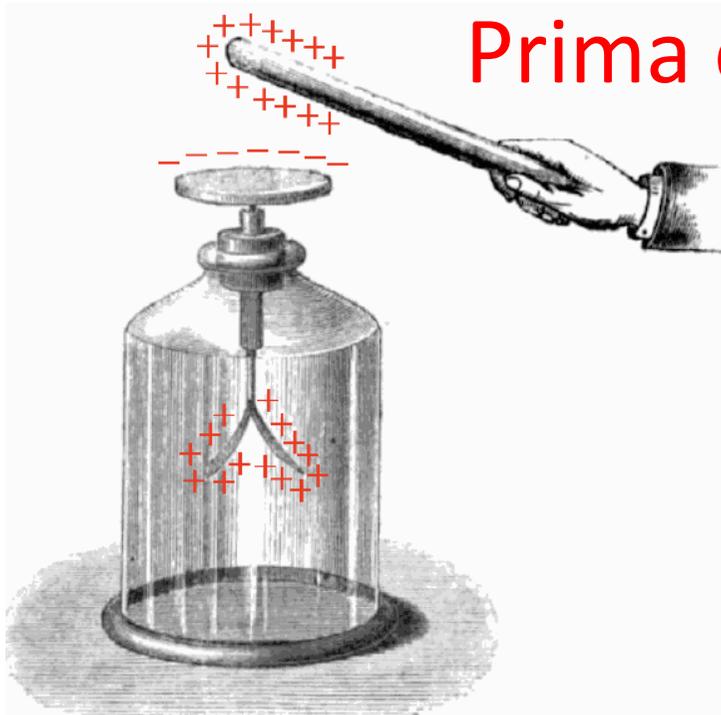
- Sono particelle subatomiche che arrivano sulla Terra
 - Perlopiù (~90%) protoni
 - Nuclei di elio (~9%);
 - Gli elettroni sono ~1%;
 - ~0.1% sono raggi gamma
- Il flusso diminuisce rapidamente all'aumentare dell'energia
 - Una volta al secondo arriva sulla Terra una particella con la stessa energia di una pallina da tennis
 - Le più alte energie in astrofisica
 - Oltre 100 milioni di volte più grandi delle energie che riusciamo a produrre sulla Terra (LHC)



Come abbiamo imparato tutto questo?
Un'indagine lunga un secolo...

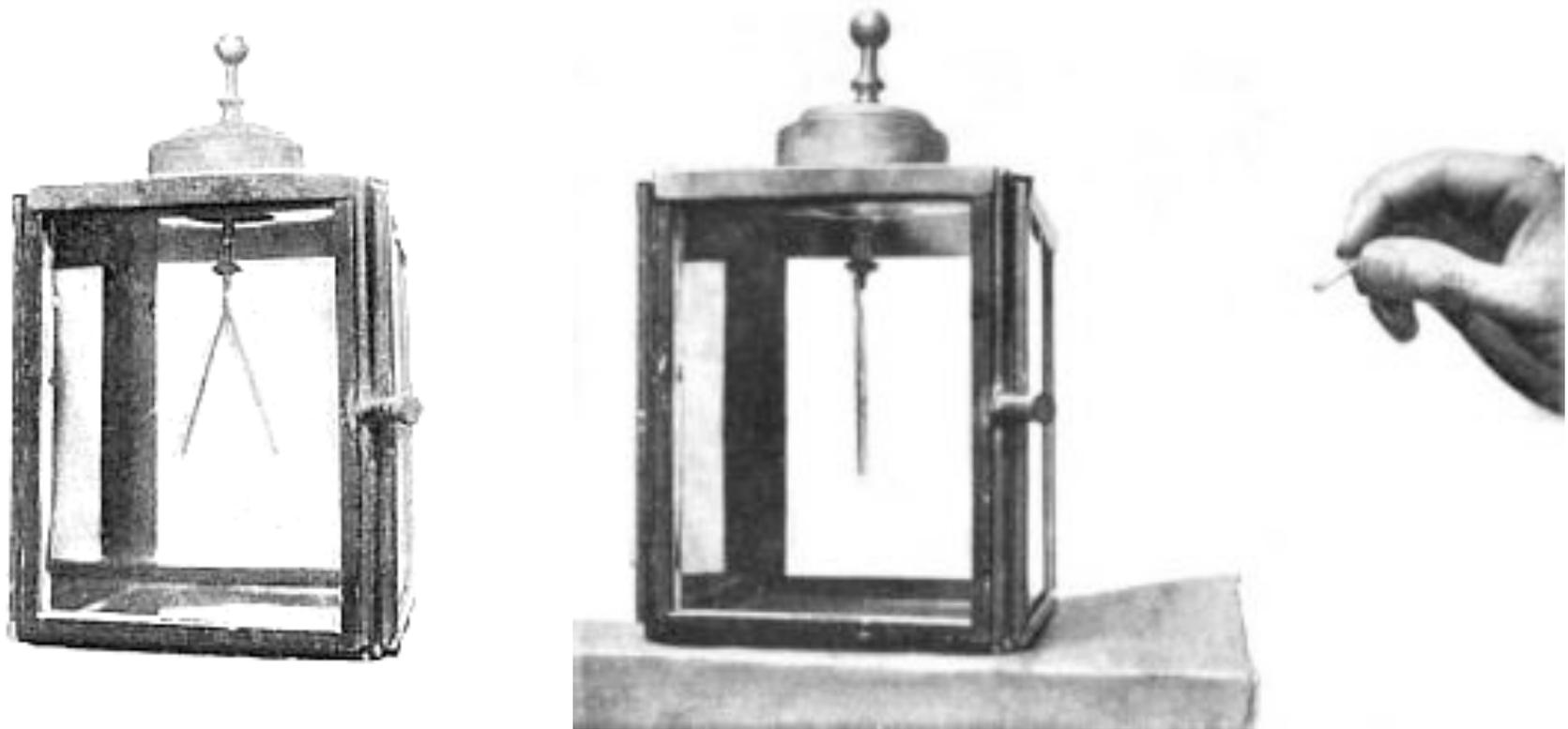
(Film prodotto da F. Capra/W. Disney nel 1957)

Prima osservazione: un elettroscopio si scarica spontaneamente



- 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
 - L'elettroscopio viene utilizzato come radiometro
- **Da dove viene questa radioattività?**
 - Dal suolo?
 - Dal Sole?
 - Dall'atmosfera?
 - Dallo spazio?
- **Nel primo decennio del '900 l'opinione dominante era che venisse dal suolo**

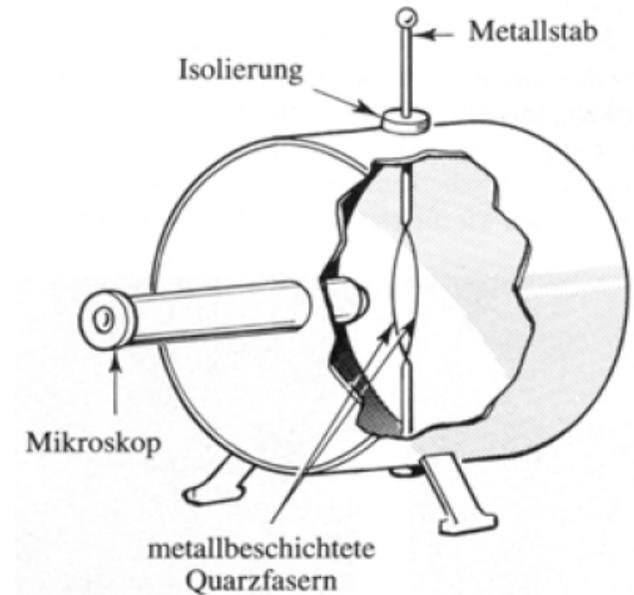




Un elettroscopio si scarica avvicinandogli una sbarretta radioattiva (Duncan 1902)

Le misure di Wulf (1909-1910)

- Theodor Wulf, gesuita tedesco professore in Olanda e a Roma, perfezionò l'elettroscopio rendendolo trasportabile.
- 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 $e^{-h/\lambda}$
- 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: viene dal suolo

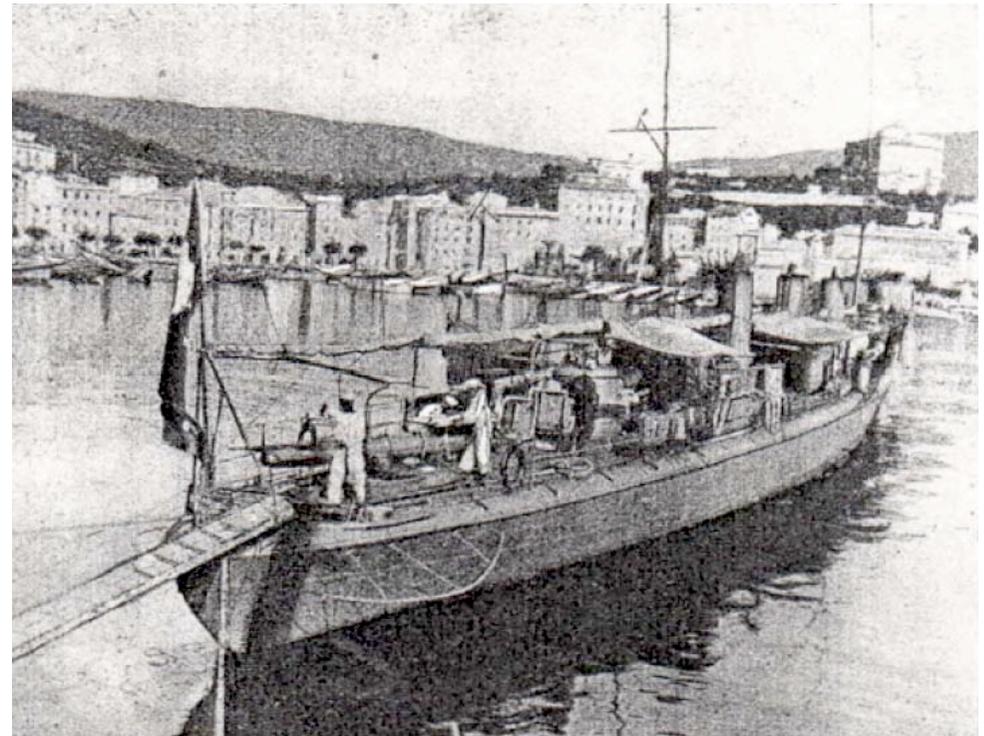




L'opinione dominante non venne accettata da Domenico Pacini, giovane fisico che lavorava all'Università di Roma e all'Istituto di Meteorologia e Geodinamica (IMG)

Chi era Domenico Pacini?

- Nasce a Marino nel 1878 e si laurea a Roma nel 1902
- Dal 1908 ha a disposizione un importante strumento: il cacciatorpediniere "Fulmine", messo a disposizione dalla Regia Marina
- Fra il 1908 e il 1910 confronta le misure sulla spiaggia con quelle al largo, e con quelle registrate in precedenza a Forme, a Sestola e sul monte Velino

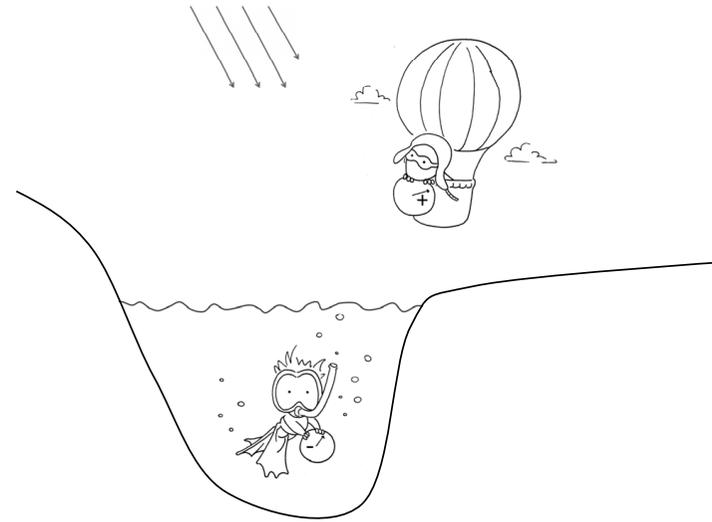


Giugno/Ottobre 1911: l'esperimento decisivo

- Nel giugno 1911 l'idea geniale: confrontare la radioattività alla superficie del mare con quella misurata sott'acqua (è l'inizio della fisica sottomarina)
 - Se parte della radioattività non viene dalla Terra, dev'essere assorbita in profondità: sarà quindi minore nelle profondità marine
- 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.”*

E' la scoperta dei raggi cosmici.

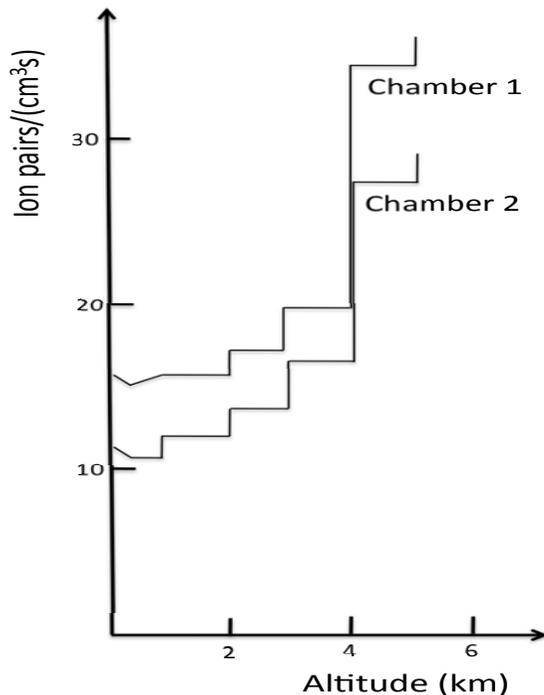
Hess e le misure in mongolfiera



- L'austriaco Victor Hess (1883-1964), che lavorava a Vienna, migliorò l'elettroscopio di Wulf e studiò le proprietà di assorbimento delle radiazioni
- In 1911, salì in mongolfiera fino a 1300 m con due elettroscopi in contenitori di spessore diverso, ma non misurò l'aumento che si aspettava nell'ipotesi extraterrestre



L'ultimo volo di Hess



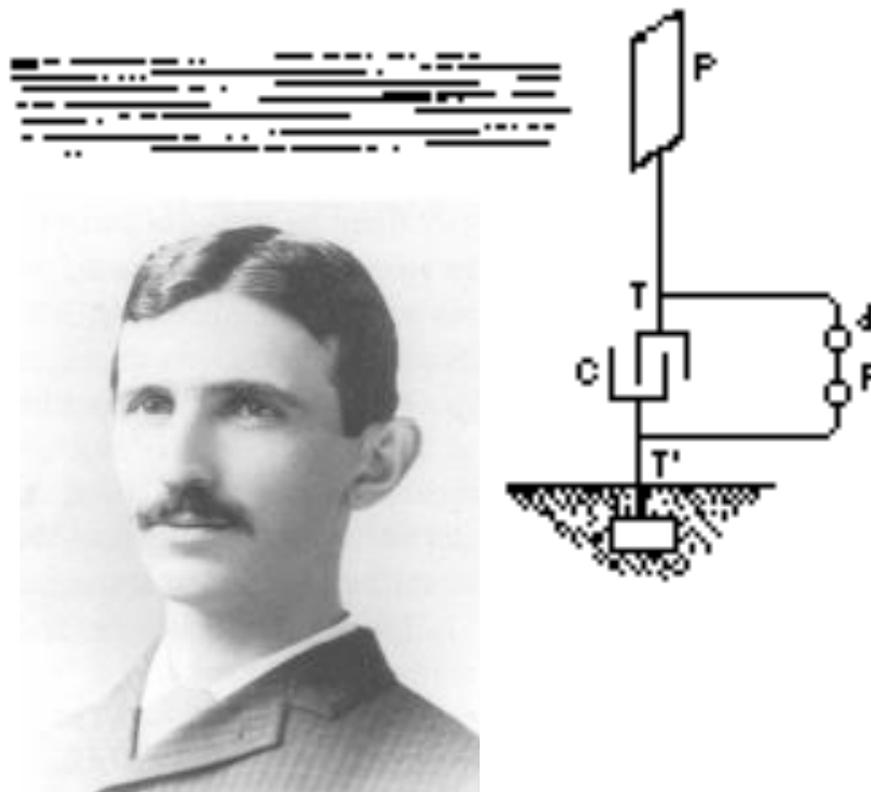
- Nel 1912 ascese ancora 7 volte. Nel volo finale, nell'agosto 1912, raggiunse i 5300 metri
 - I risultati mostrano che la radioattività cresce rapidamente oltre i 3000 metri
 - Hess conclude che parte della radiazione viene dal suolo, e parte dall'alto (fuori dalla Terra)
- Il lavoro è pubblicato nel Novembre 1912; non cita l'ultimo e decisivo lavoro di Pacini.

- Nel 1901, a dibattito appena iniziato, Nikola Tesla aveva brevettato (US patent #685,957/8) 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 CR” (aggiunta di Tesla nel 1933)

Intuizioni



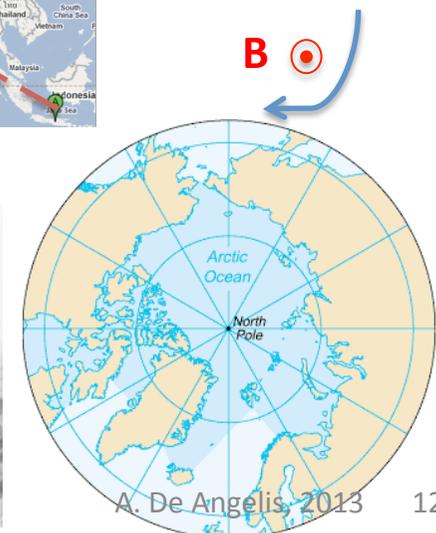
- Potrebbe funzionare?
 SI'
- Quanta potenza puo' generare?
 $P < 3 \text{ GeV} \times 10000 \text{ CR/sm}^2$
 $\Rightarrow P < 5 \mu\text{W/m}^2$

(Energia solare: $\sim 200 \text{ W/m}^2$)

La storia continua dopo gli anni dei pionieri...

Dopo la guerra il baricentro delle ricerche si sposta negli Stati Uniti; 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)
- 1934: **Anderson** individua tra i raggi cosmici l'antimateria



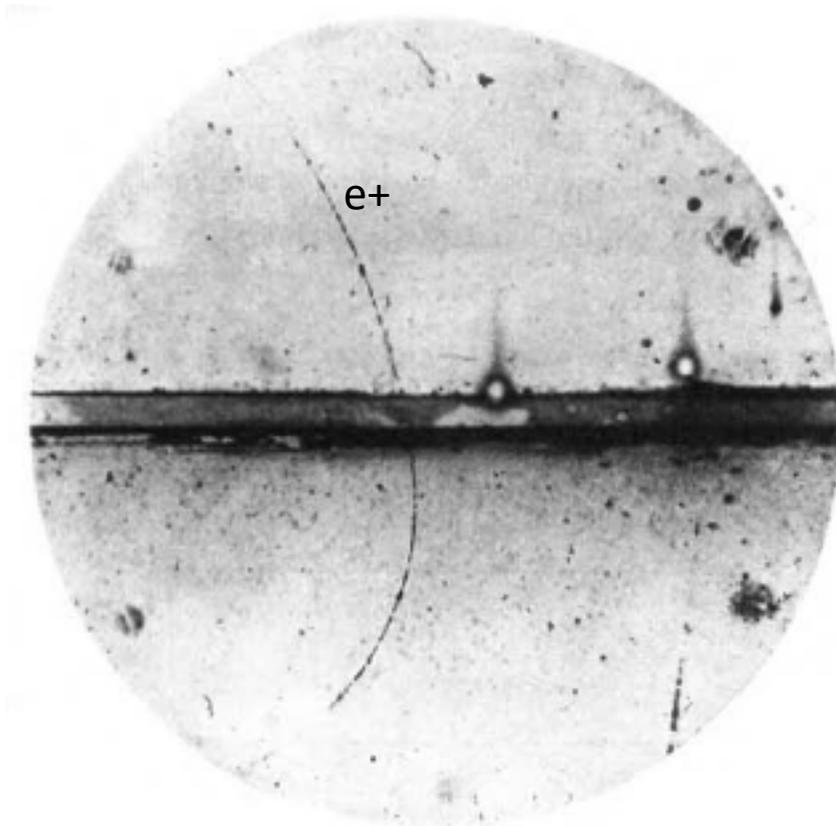
Bruno Rossi (Venezia 1905- Cambridge, MA, 1993)

- Laureato a Bologna, inizia a lavorare ad Arcetri, e nel 1932 vince la cattedra a Padova
 - Fonda l'Istituto di Fisica
 - Sviluppa rivelatori a coincidenza, idea l'esperimento che consente di dimostrare che i raggi cosmici sono prevalentemente positivi, scopre gli sciame elettromagnetici
- 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



Antimateria

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



- Fotografia scattata da Anderson nel 1932: 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!

1936: Il premio Nobel per i raggi cosmici

Finalmente nel '36 (Pacini era morto da 2 anni) 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.”

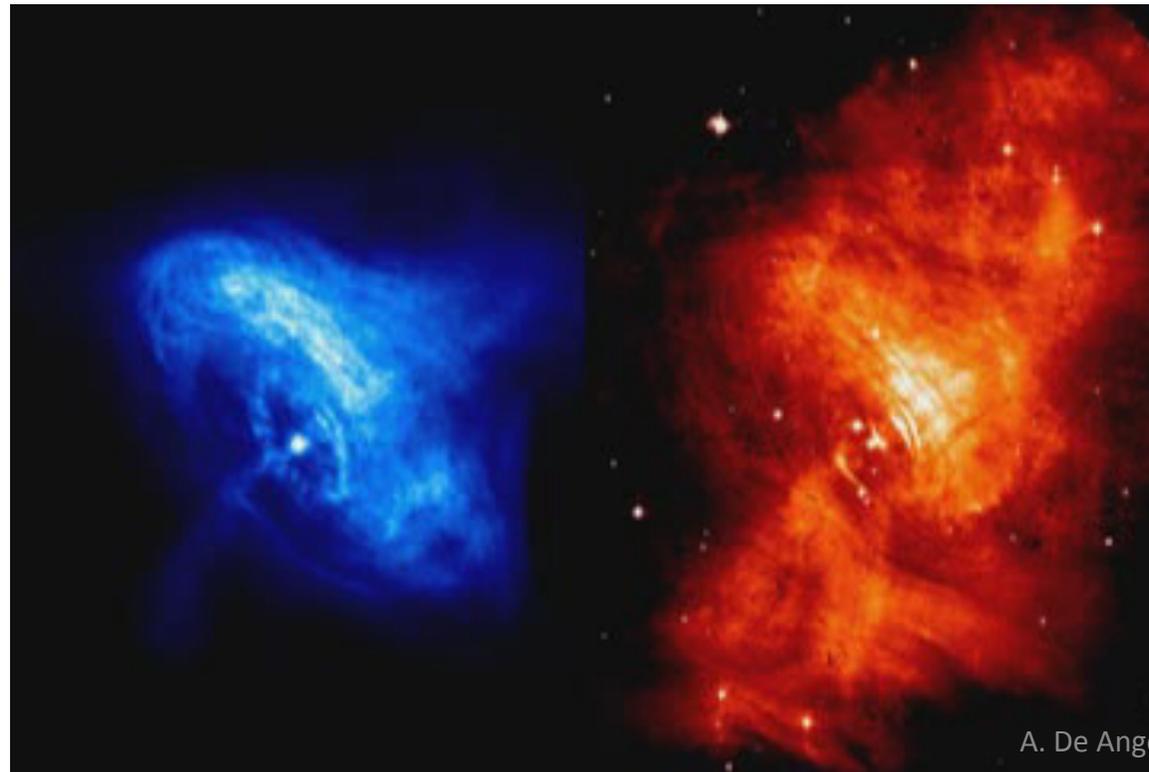


Nuove teorie...



(Zwicky nel 1930)

- Insieme a Baade, Zwicky formula intorno al 1935 tre congetture sulle super-novae:
 1. Stelle abbastanza pesanti collassano alla fine della loro vita in super-novae
 2. Le implosioni producono esplosioni di raggi cosmici
 3. Lasciano dietro di se' stelle di neutroni



Molte nuove scoperte dai raggi cosmici

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

Nel frattempo, la tecnologia degli acceleratori di particelle

Dalle conclusioni di Leprince-Ringuet:

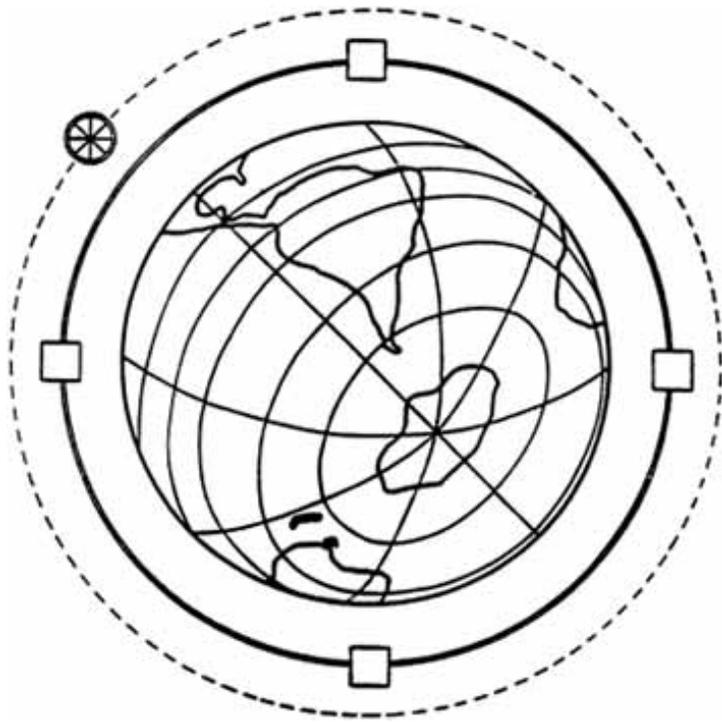
“What is the future of cosmic rays? Should we continue to struggle for a few new results or would it be better to turn to the machines?”

One can no doubt say that that the future of cosmic radiation in the domain of nuclear physics depends on the machines [...]. But probably this point of view should be tempered by the fact that we have the uniqueness of some phenomena for which the energies are much larger.”



L'acceleratore massimo di Fermi

- Meccanismo di accelerazione (Fermi 1949)



La massima energia raggiungibile da un acceleratore sulla Terra e' ~ 5000 TeV (1954)

iblu

Alessandro De Angelis

L'enigma dei raggi cosmici

Le più grandi energie dell'universo

 Springer

“La lettura di questo libro [fa] capire come procede la scienza, come ogni scoperta avvenga col contributo di molte persone” (M. Hack)

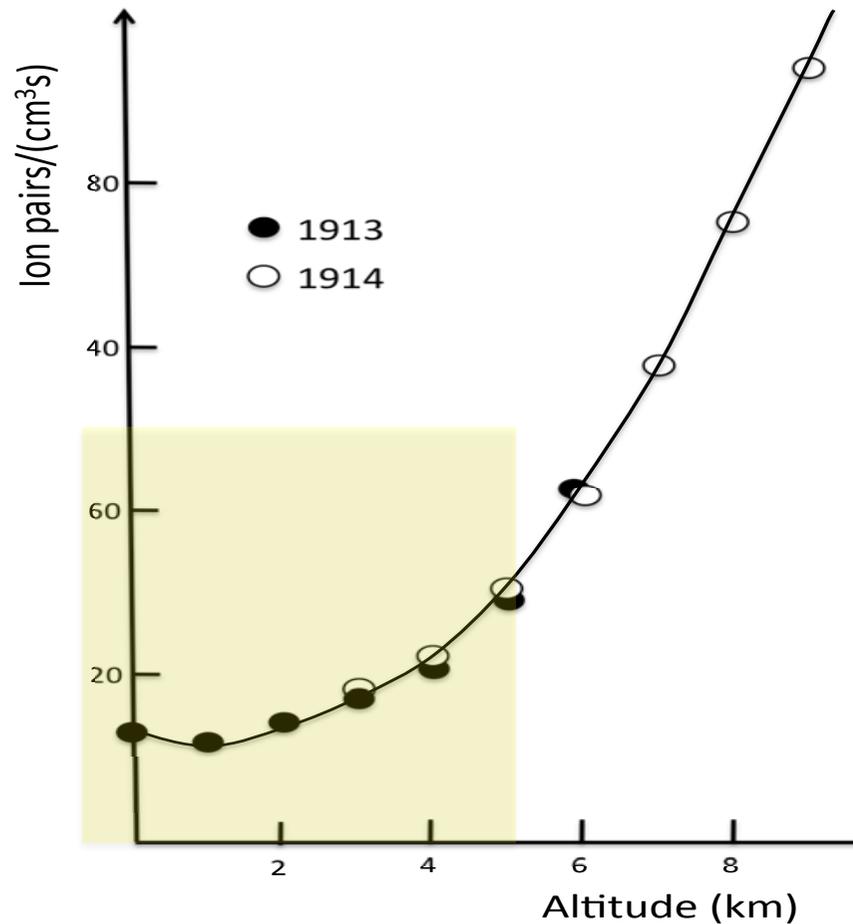
Remake dell'esperimento di Pacini nel 2011

(G. Batignani et al., Giornale di Fisica, Settembre 2011)



BACKUP

Kolhörster e la conferma finale



- Conferme dei risultati di Hess nel 1913/14 (esperimento chiave il 28 giugno 1914, giorno dell'attentato di Sarajevo). Pacini e' assente dalla discussione scientifica.

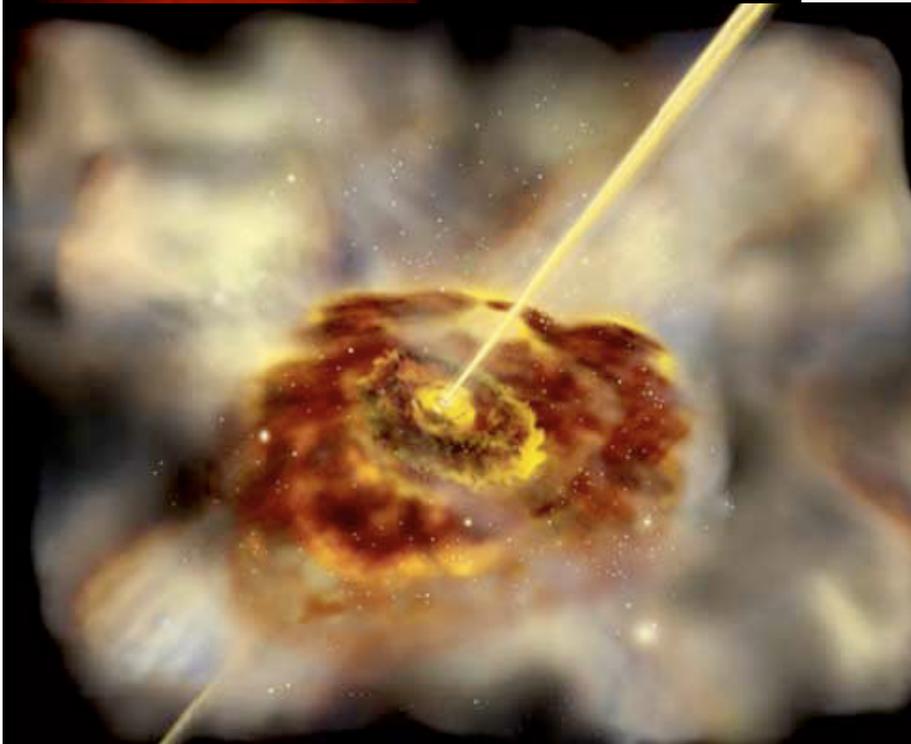
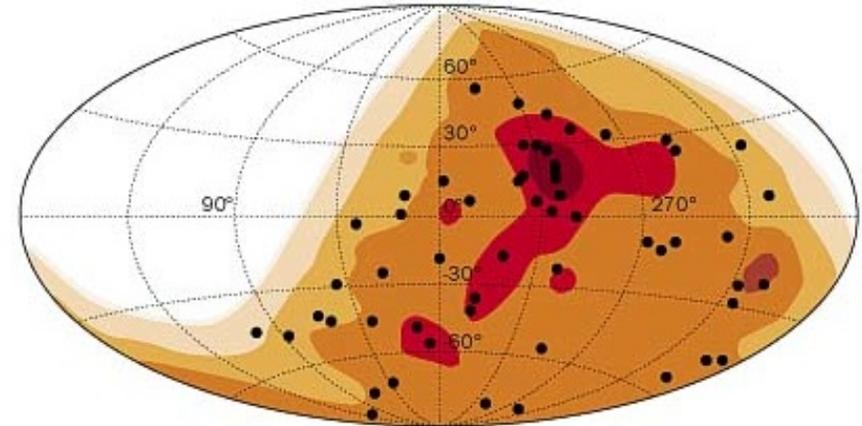


Energie

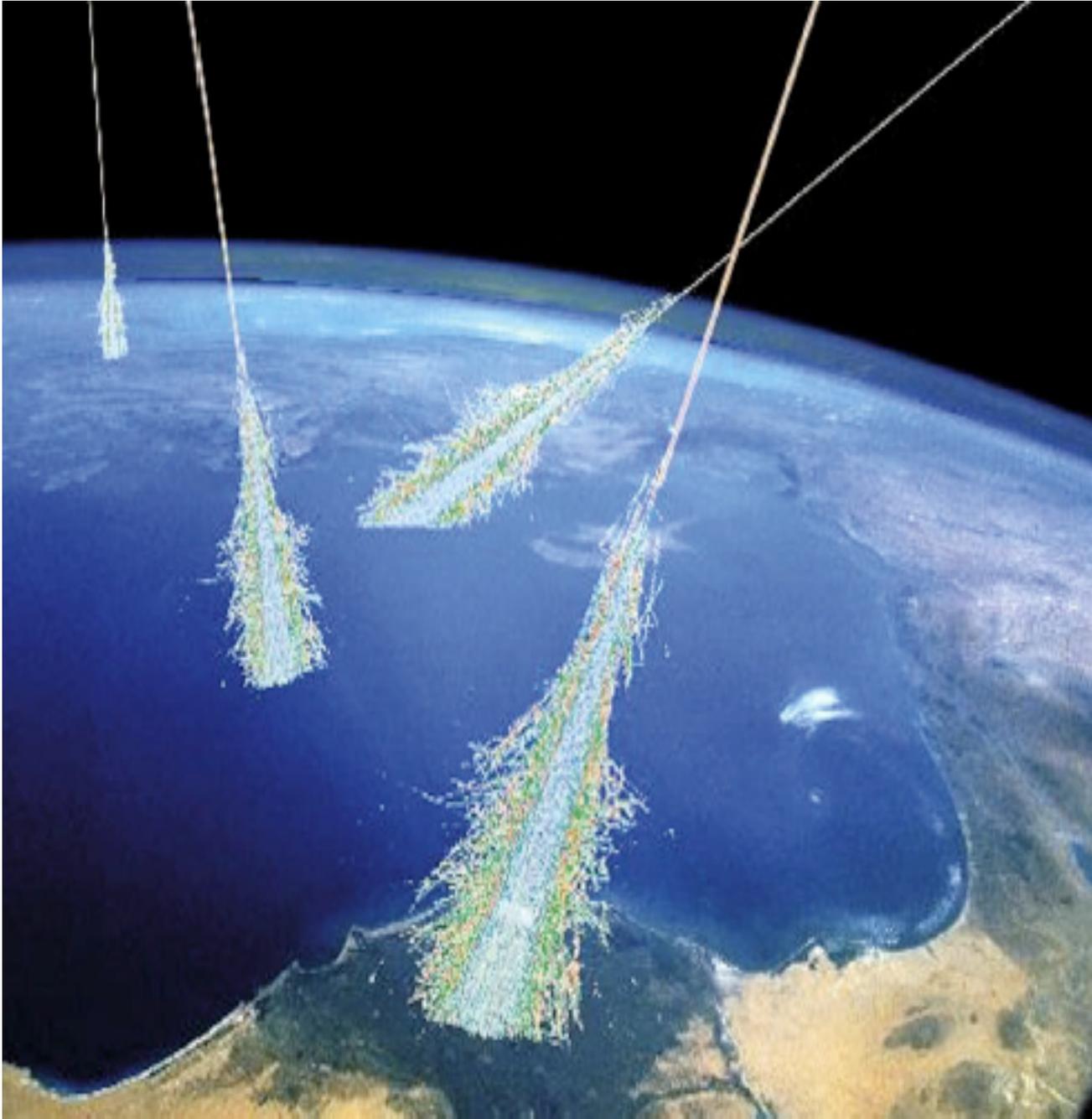
- $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$: energia che serve a creare un protone (relazione di Einstein $E=mc^2$)
- $4000 \text{ GeV} = 4 \text{ TeV}$: energia di un protone accelerato in un fascio di LHC (energia cinetica di una zanzara)
- $6 \cdot 10^{18} \text{ eV} = 1 \text{ joule}$: energia cinetica di una massa di 100 grammi che cade da un metro
- 10^{21} eV : energia cinetica di una palla da tennis ben lanciata (sono le piu' grandi energie mai misurate in una particella singola, quasi un miliardo di volte piu' alte delle energie dei fasci di LHC)



- 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)



- Quando i raggi cosmici entrano nell'atmosfera, sono assorbiti, generando sciame di particelle
- L'atmosfera ci protegge da questa radioattività (a cui è molto esposto chi vive in alta montagna e chi viaggia spesso in aereo)

June-October 1911 (100 years ago) the key experiment

- In June 1911, the winning idea: immersing an electroscope 3m deep in the sea at Livorno (and later in Bracciano's lake) Pacini finds a significant (20% at 4.3σ) reduction of the ionization

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 cm^3 al 1".

Coll'apparecchio immerso:

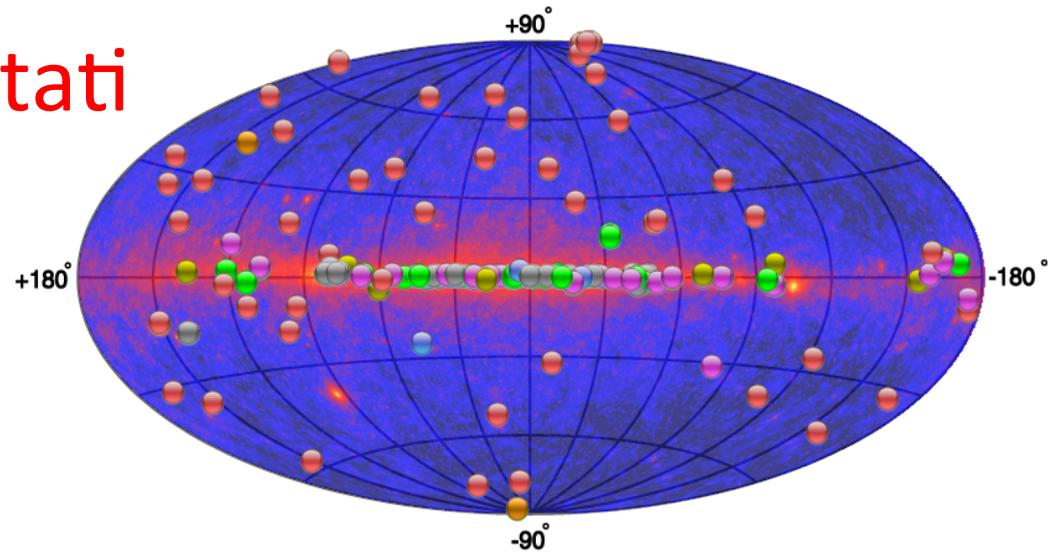
10,2 — 10,3 — 10,3 — 10,1 — 10,0 — 10,6 — 10,6.

media 10,3 equivalente a ioni 8,9 per cm^3 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.

Alcuni tra gli altri risultati



- Radiazione cosmica di fondo (1964)
- Emissione di raggi X
 - Razzi (1962) e satelliti (Uhuru 1970, ...)
- Emissione di raggi gamma
 - Telescopi MAGIC, HESS e Fermi 2004-2008: scoperto che alcuni resti di supernova sono sorgenti di raggi cosmici fino a 1 milione di GeV
- Raggi cosmici di energia estremamente alta ($> 1J$)
 - 1962 a Volcano Ranch; Pierre Auger Obs. in Argentina
 - 1966: il limite GZK
- Buchi neri
- 2011: condensazione nubi al CERN

