

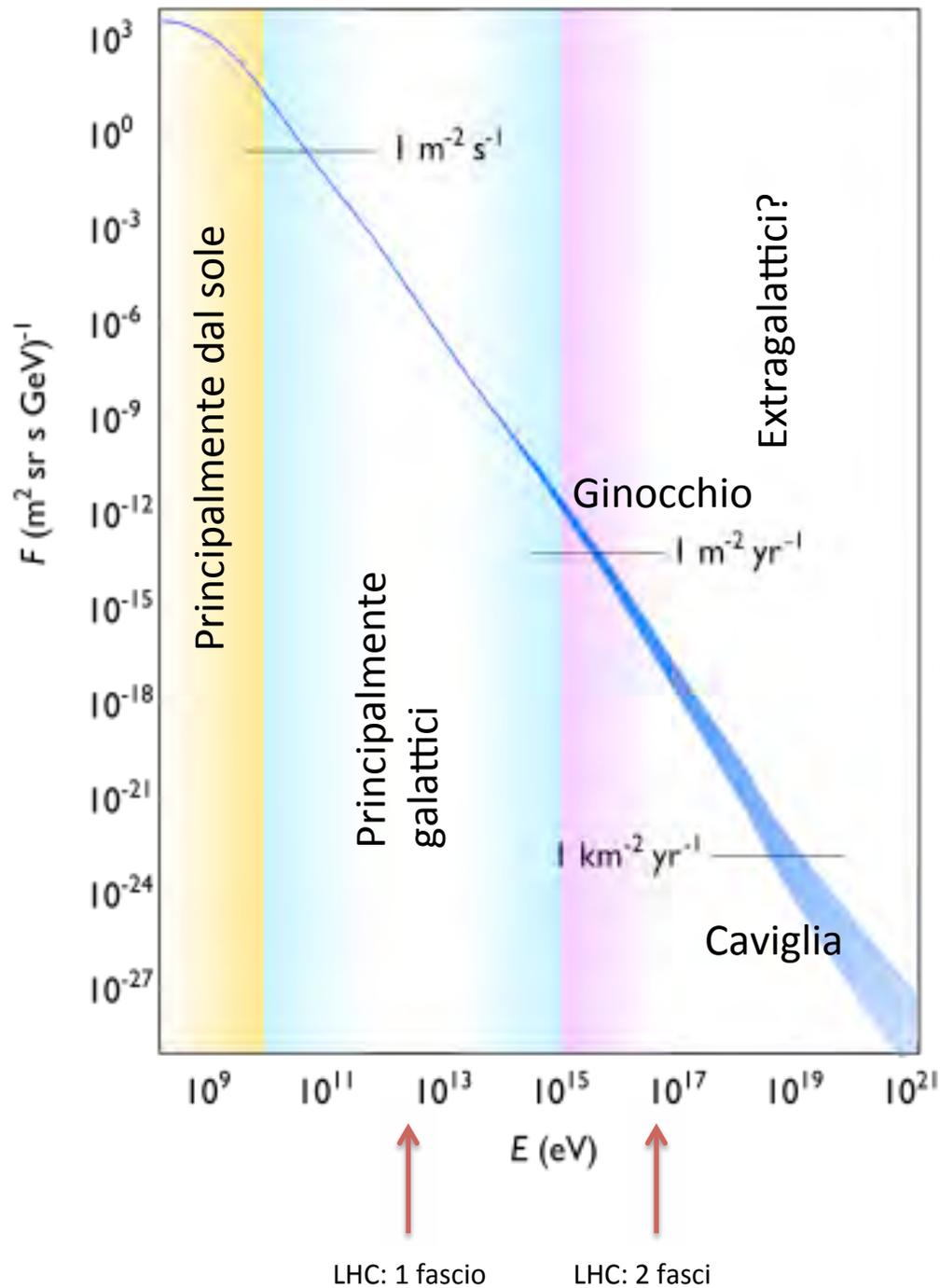
# I RAGGI COSMICI

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

A. De Angelis, Le Scienze, Agosto 2012

Alessandro De Angelis

INFN & INAF Padova, Univ. Udine, LIP/IST Lisboa  
Padova, Novembre 2016



## Che cosa sono i raggi cosmici?

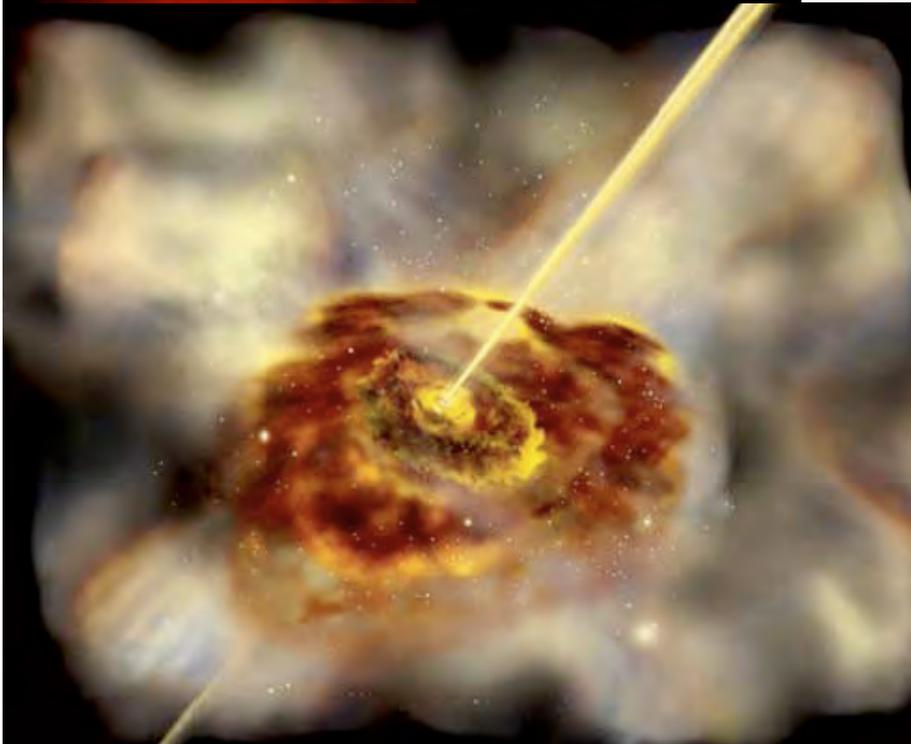
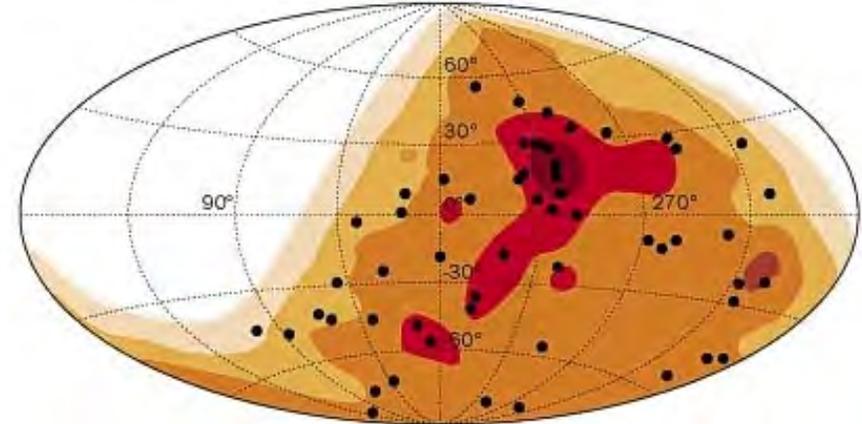
- Sono particelle subatomiche che arrivano sulla Terra
  - Perlopiù (~90%) protoni
  - Nuclei di elio (~9%);
  - Gli elettroni sono ~1%;
  - ~0.1% sono raggi gamma
- Il flusso diminuisce rapidamente all'aumentare dell'energia
  - Una volta al secondo arriva sulla Terra una particella con la stessa energia 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)

# Energie

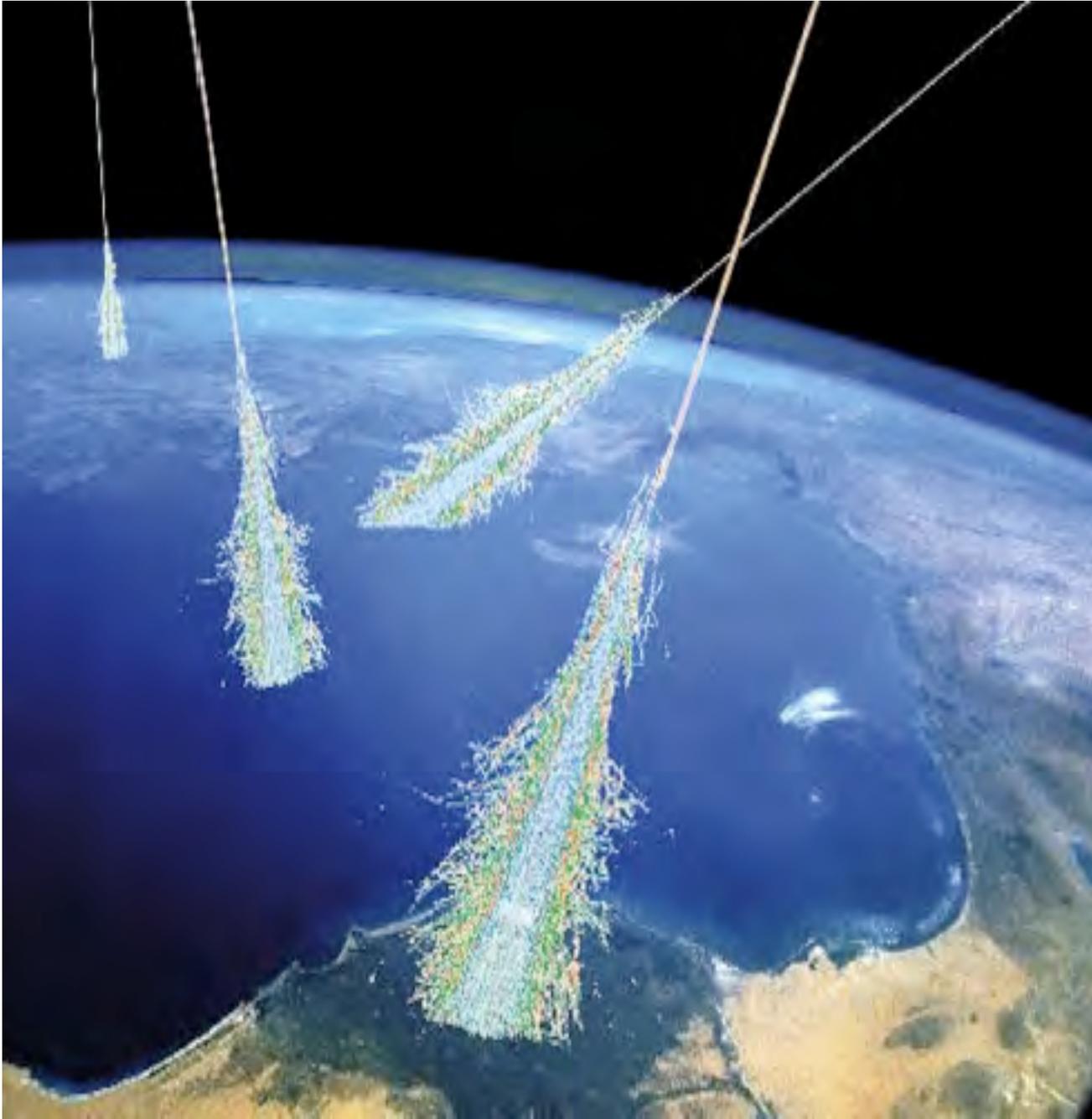
- $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$  : energia che serve a creare un protone (relazione di Einstein  $E=mc^2$ )
- $7000 \text{ GeV} = 7 \text{ TeV}$  : energia di un protone accelerato in un fascio di LHC (energia cinetica di una zanzara)
- $6 \cdot 10^{18} \text{ eV} = 1 \text{ joule}$  : energia cinetica di una massa di 100 grammi che cade da un metro
- $10^{21} \text{ eV}$ : 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)



- 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)



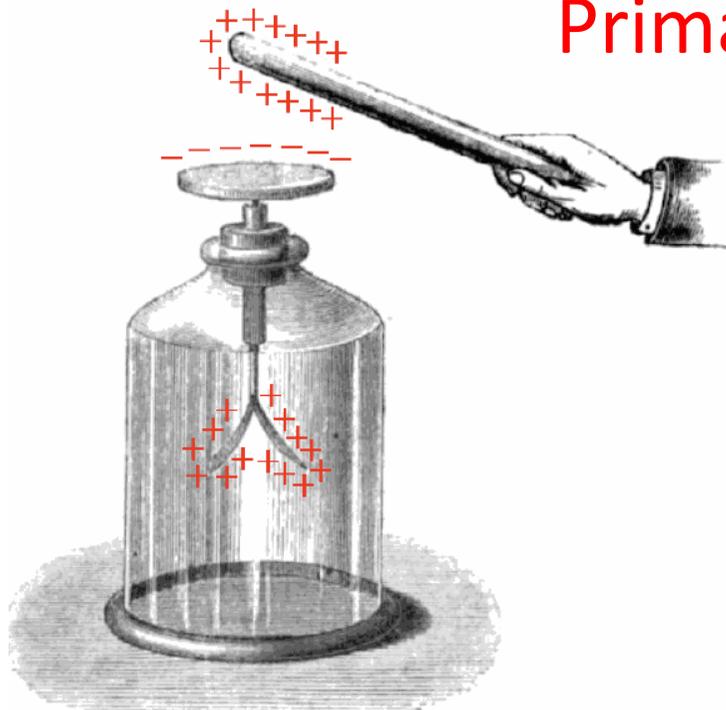
- Quando i raggi cosmici entrano nell'atmosfera, sono assorbiti, generando sciame di particelle
- L'atmosfera ci protegge da questa radioattività (a cui è molto esposto chi vive in alta montagna e chi viaggia spesso in aereo)



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

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

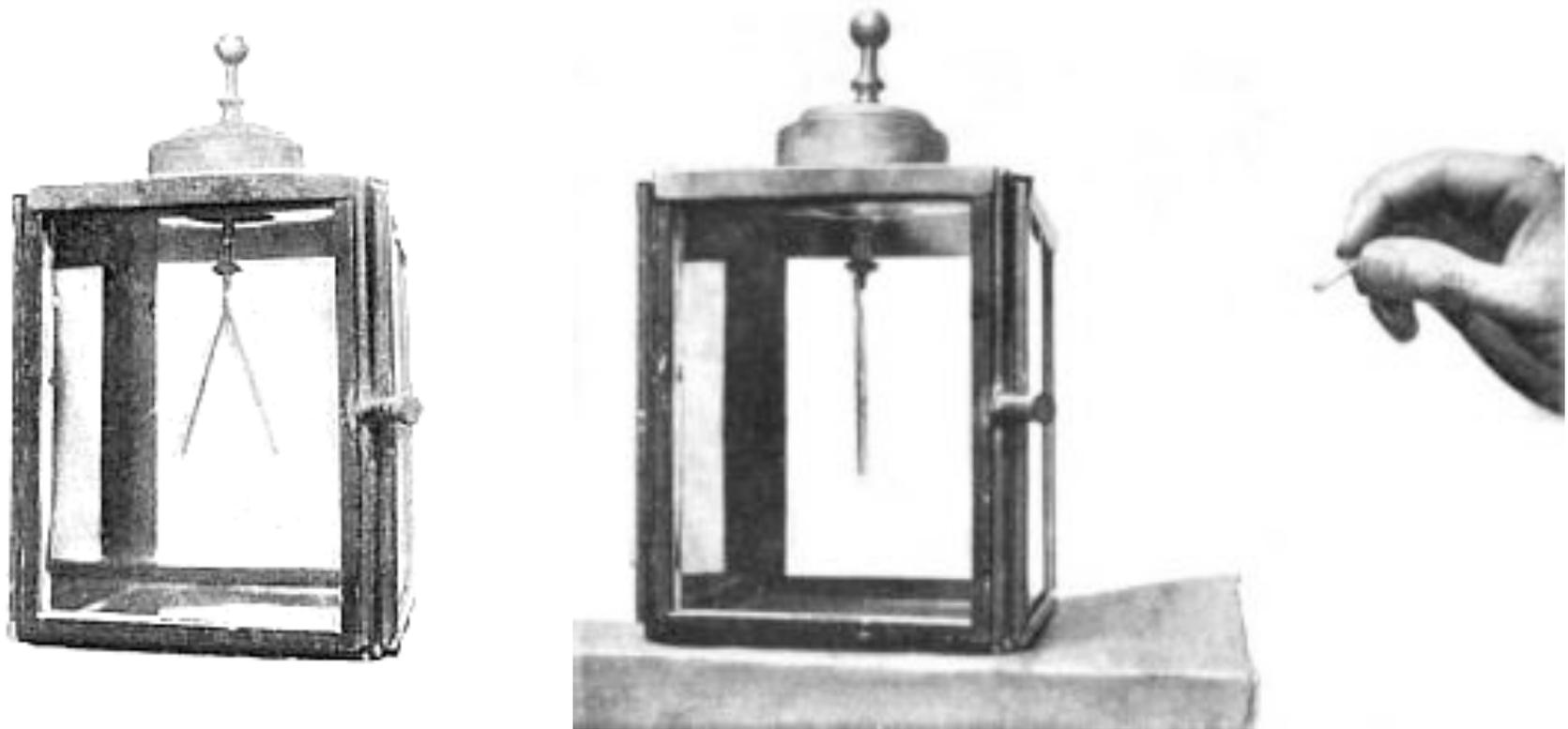
## Prima osservazione: un elettroscopio si scarica spontaneamente



- 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

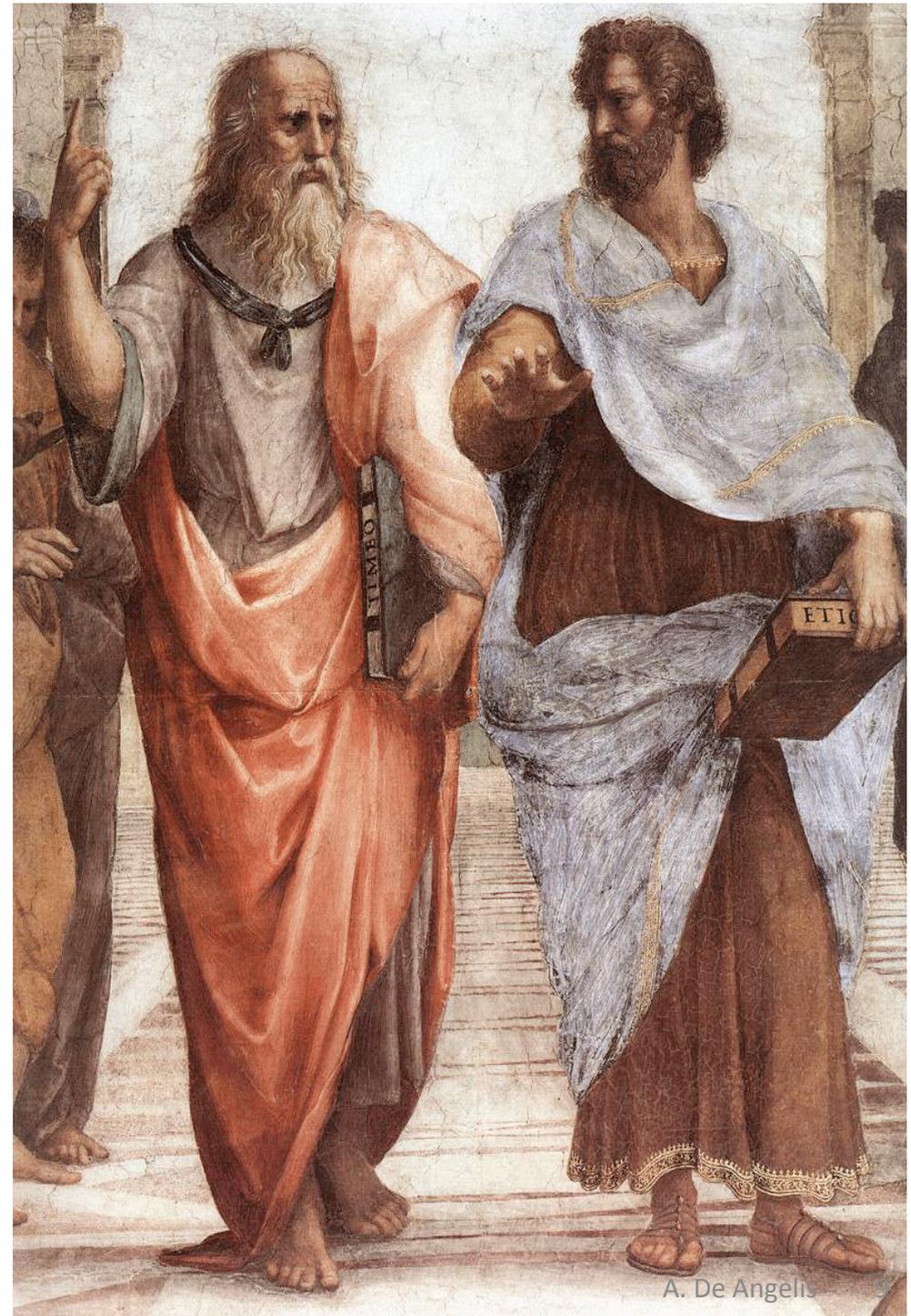


(4 premi Nobel in questa foto)



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

- 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



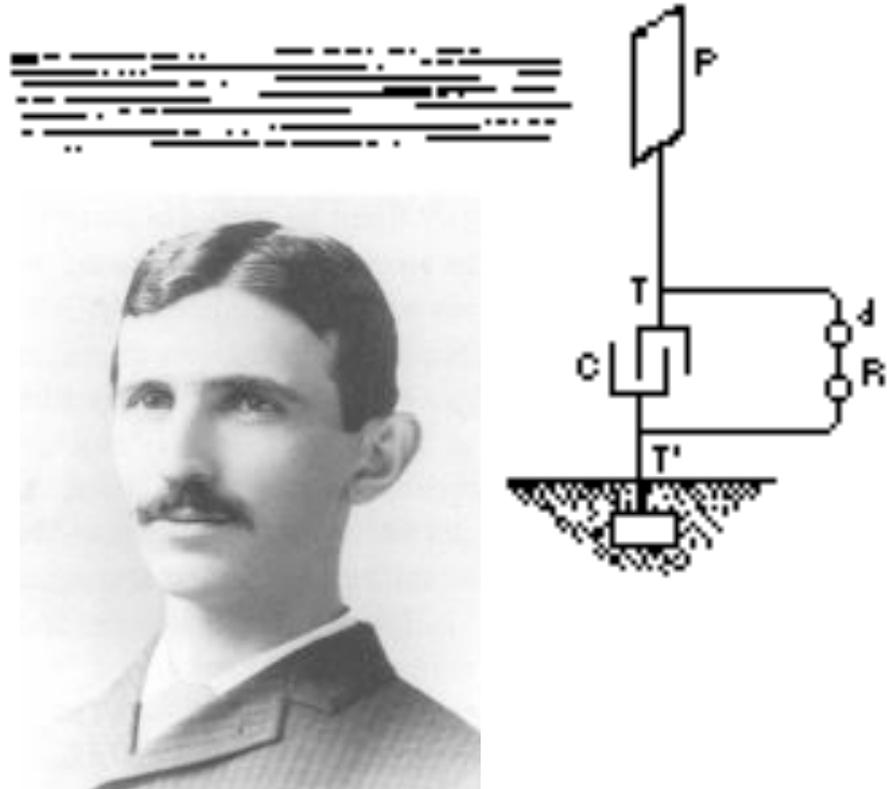
A. De Angelis

- 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:  $\sim 200 \text{ W/m}^2$ )*

## Le misure di Padre Wulf (1909-1910)

- 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  $e^{-h/\lambda}$
- 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



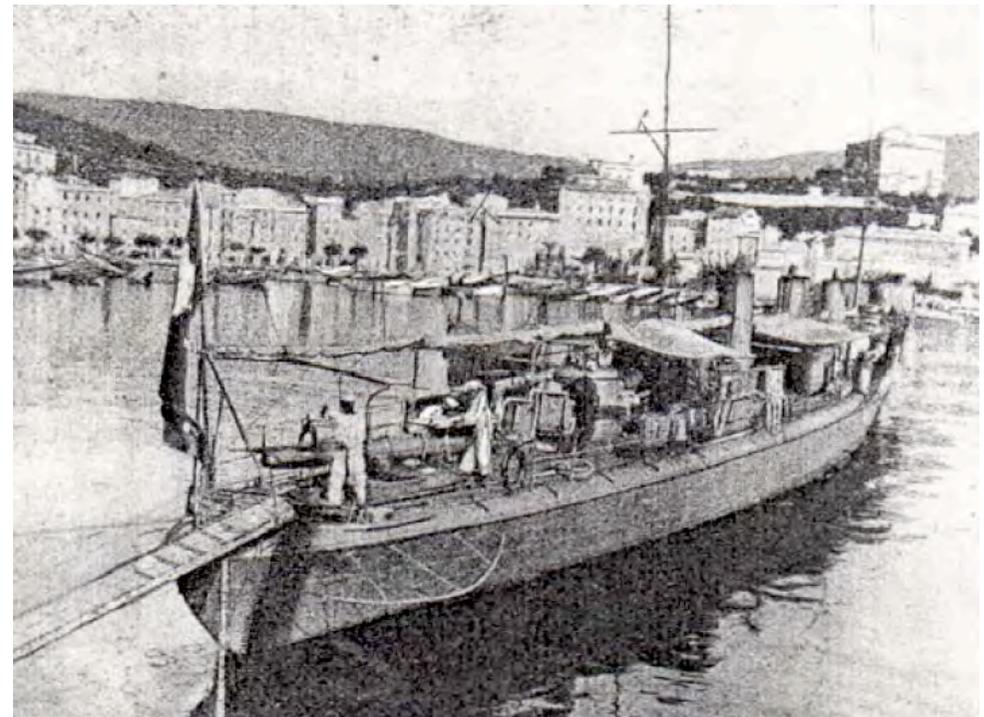


L'opinione dominante non venne accettata da Domenico Pacini, giovane fisico che lavorava all'Università di Roma

L'idea di Pacini: confrontare la radioattività alla superficie del mare con quella misurata sott'acqua (è l'inizio della fisica sottomarina)

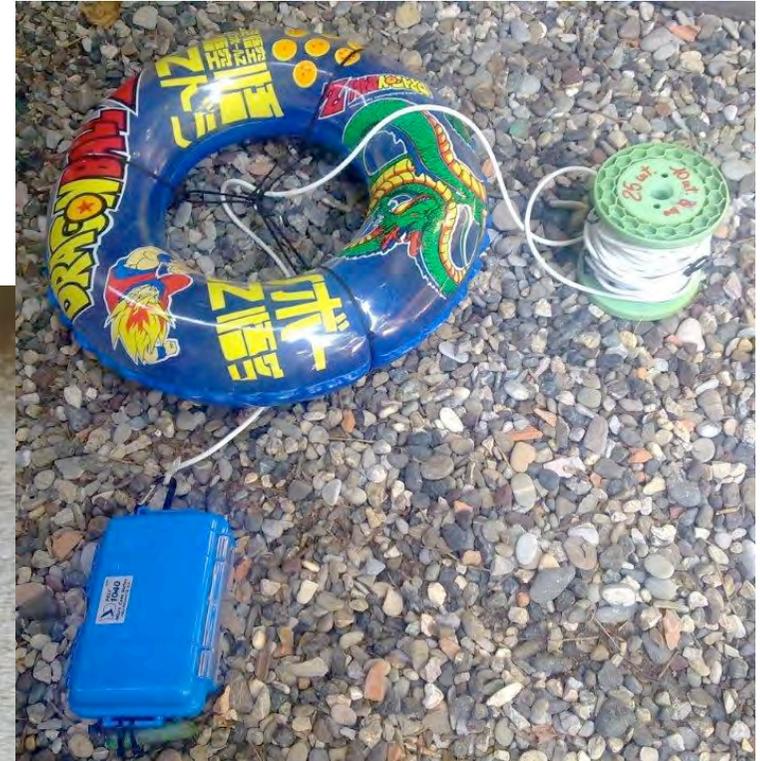
Dal 1908, Pacini ha a disposizione il cacciatorpediniere "Fulmine", messo a disposizione dalla Regia Marina su richiesta del Direttore dell'IMG

- Se parte della radioattività non viene dalla Terra, dev'essere assorbita dall'acqua: 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."*



# Remake dell'esperimento di Pacini nel 2011

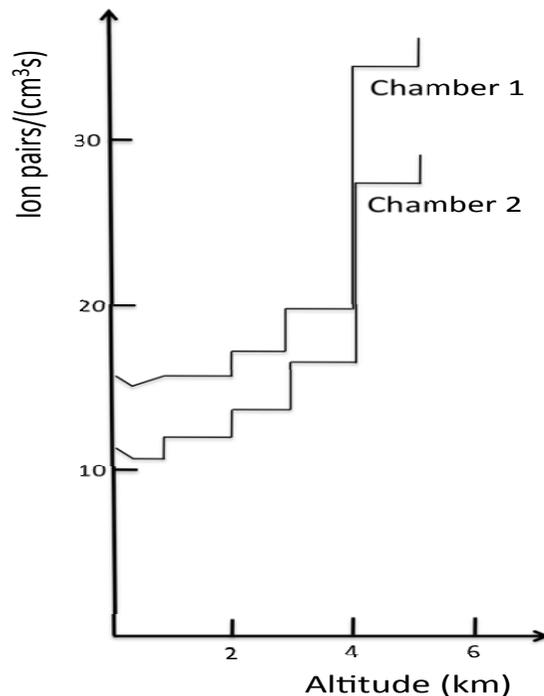
(G. Batignani et al., Giornale di Fisica, Settembre 2011)



## Il volo di Hess



L'austriaco Victor Hess (1883-1964), che lavorava a Vienna, propone una tecnica complementare: la radiazione aumenta 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 è pubblicato nel Novembre 1912; non cita l'ultimo e decisivo lavoro di Pacini.

# Nel frattempo (fine degli anni '20) I tubi contatori di Geiger entrano in scena



(Hans Geiger nel 1928)

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.”

- Misure piu' facili
- Risposta piu' veloce  
(possibilita' di costruire **coincidenze**)



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

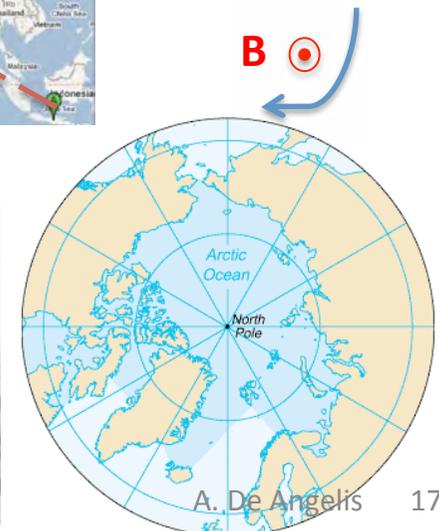
- Inizia a lavorare ad Arcetri, e nel 1932 vince la cattedra a Padova
  - Fonda l'Istituto di Fisica; **progetta l'edificio in cui ci troviamo e lo inaugura**
  - Sviluppa il **circuito di coincidenza**, idea l'esperimento che consente di dimostrare che i raggi cosmici sono prevalentemente positivi, 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



# La storia continua dopo gli anni dei pionieri...

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 sorpresa dai raggi cosmici: l'antimateria

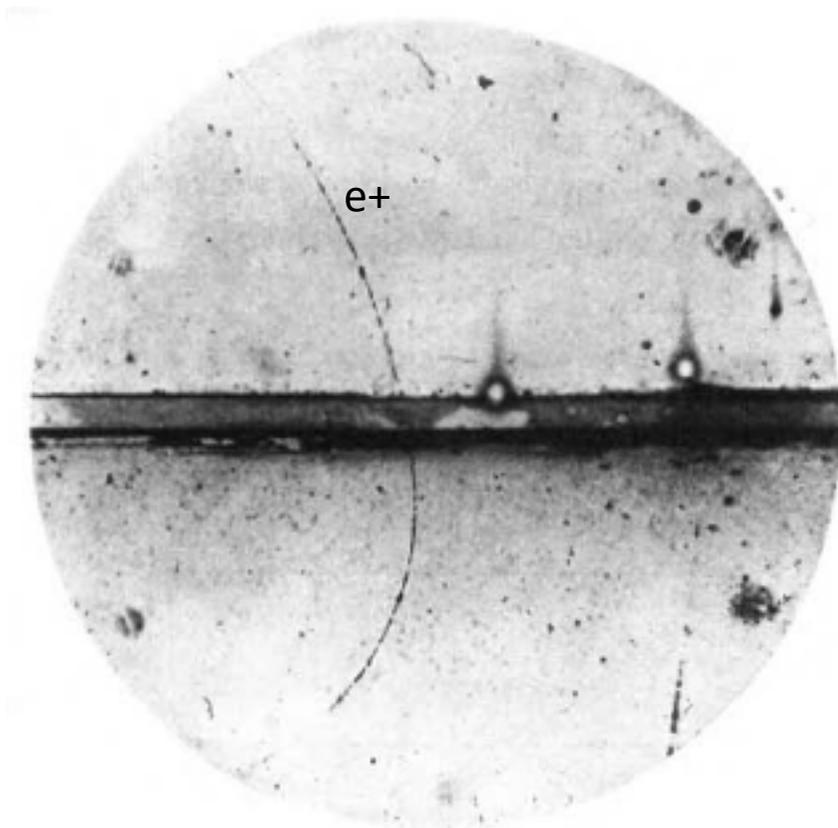
- *L'equazione di Dirac (1927-28) ne prediceva l'esistenza...*

- Fotografia scattata da Anderson: 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)

(camera di Wilson)



# Marketing dei raggi cosmici



Popular  
Science  
MONTHLY

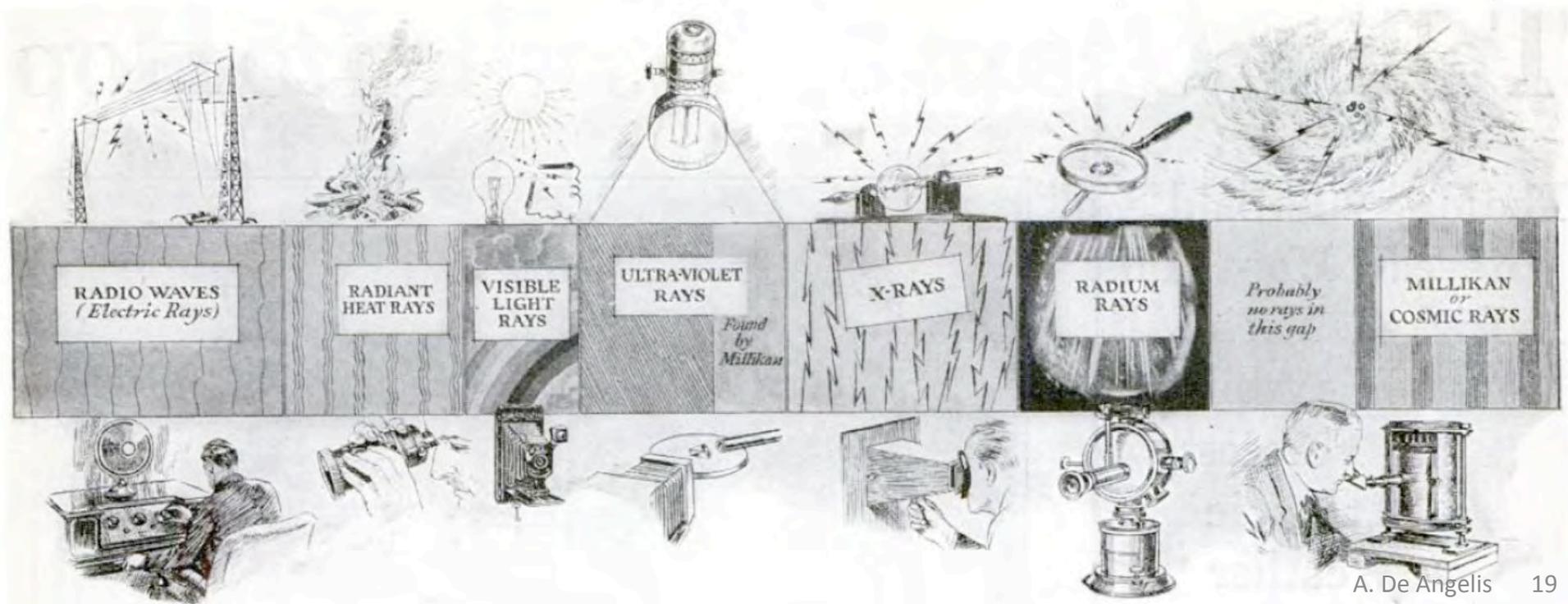


JULY, 1928

SUMNER BLOSSOM *Editor*

VOL. 113, NO. 1

## Super-Rays Reveal Secret of Creation



[...]

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.

If the rays came from outside, Millikan reasoned, they should be hundreds of times stronger at the top of the earth's



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 electroscope 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!

- Anyway, also Hess and Kolhörster were not referenced (Gockel, whose measurement had not succeeded, was). Bergwitz, Hess and Kolhörster wrote an article emphasizing their priority on the balloon results (Zeit. Phys. 1928).

# 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  $\pi$ ), 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:  $\Lambda$ , 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

# LABORATORIO RAGGI COSMICI

- 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

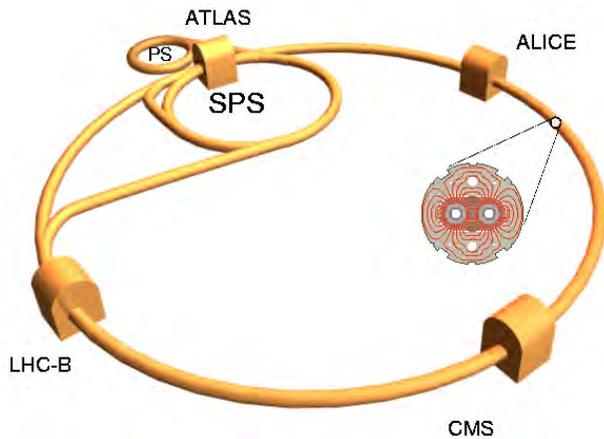
Poi inizia l'era degli acceleratori,  
e uno zoo di particelle...



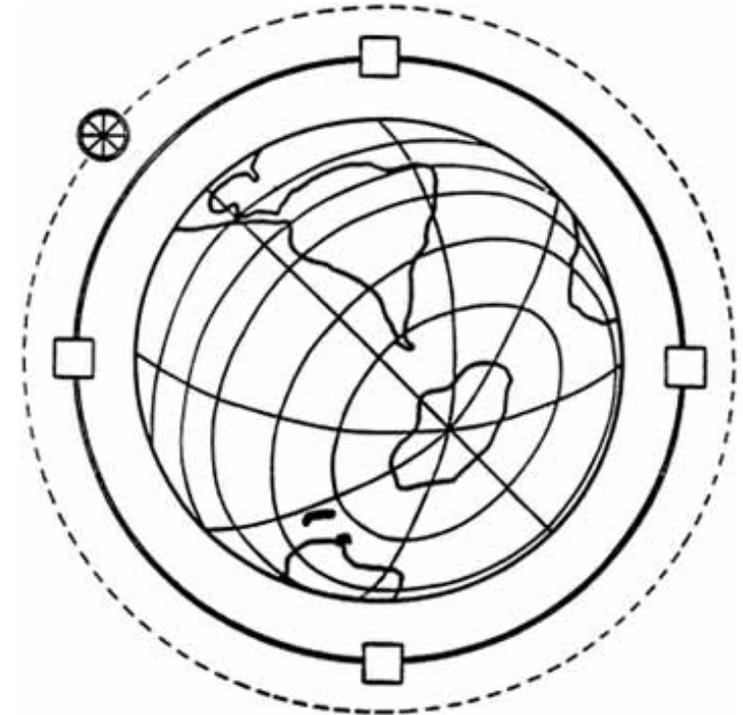
$$E \propto BR$$

# L'acceleratore massimo di Fermi (1954)

## Large Hadron Collider

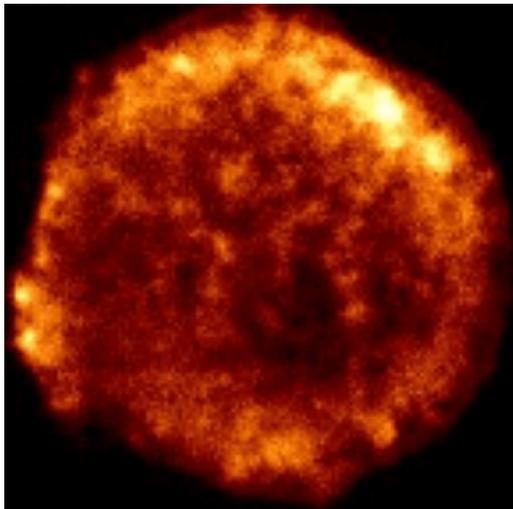


$$R \sim 10 \text{ km}, B \sim 10 \text{ T} \\ \Rightarrow E \sim 10 \text{ TeV}$$



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

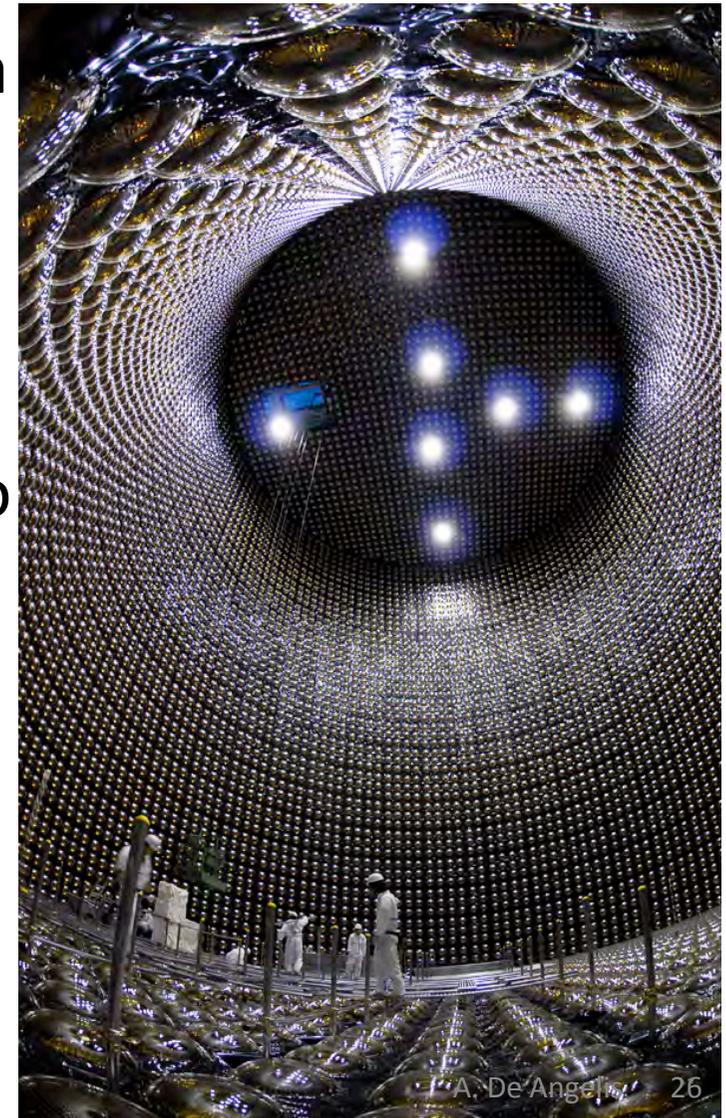
## Tycho SuperNova Remnant



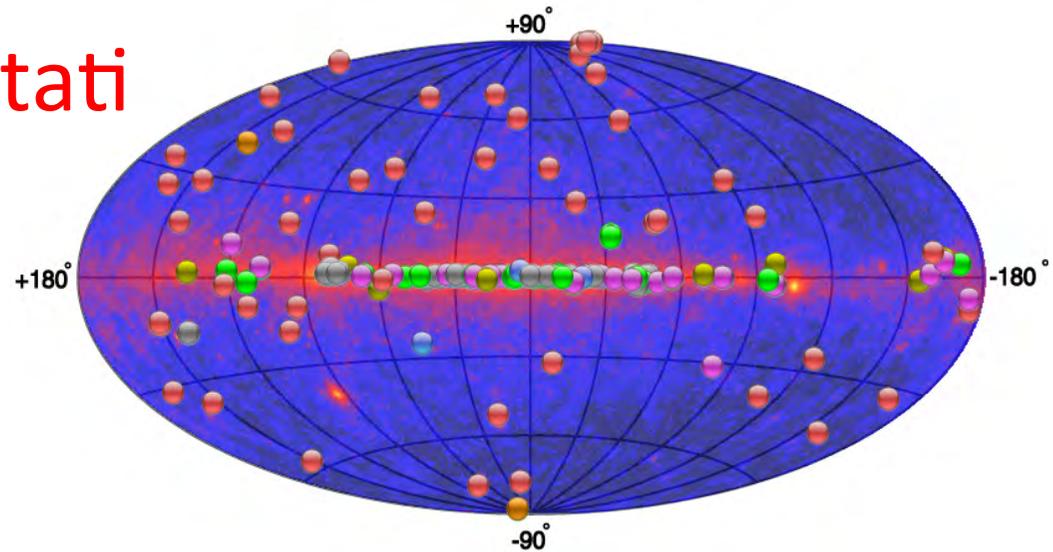
$$R \sim 10^{15} \text{ km}, B \sim 10^{-10} \text{ T} \\ \Rightarrow E \sim 1000 \text{ TeV}$$

# La storia della fisica fondamentale con i raggi cosmici continua...

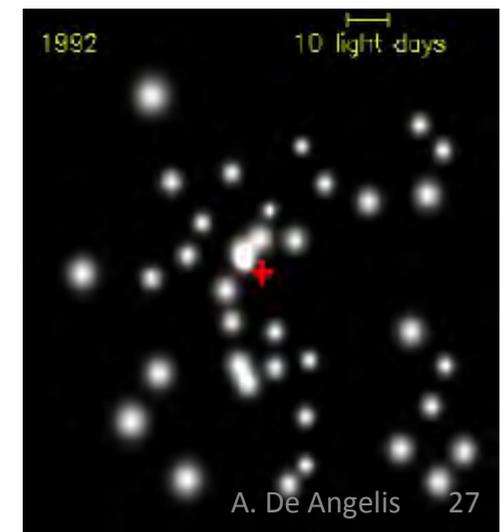
- In considerazione dei limiti fondamentali degli acceleratori terrestri, i raggi cosmici sono ancora alla frontiera della fisica delle alte energie
- Il risultato più importante (a parere di molti) della fisica delle particelle elementari negli ultimi anni è venuto dai raggi cosmici: il neutrino ha una massa diversa da zero
  - Puzzle dei neutrini solari
  - 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



# 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



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 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- grande 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