

INTRODUZIONE ALLA FISICA NUCLEARE E SUBNUCLEARE (PARTICELLE)

Lezione 4

22/04/2024

**Raggi Cosmici, Acceleratori e
Scoperte Fondamentali**

VIERI CANDELISE



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**

02/05/2022

LEZIONE 4

☒ slides foto

05/05/2020
FeriCandelise

Le scoperte fondamentali:

I RAGGI COSMICI. Solo un laboratorio naturale di particelle prodotte nell'universo!

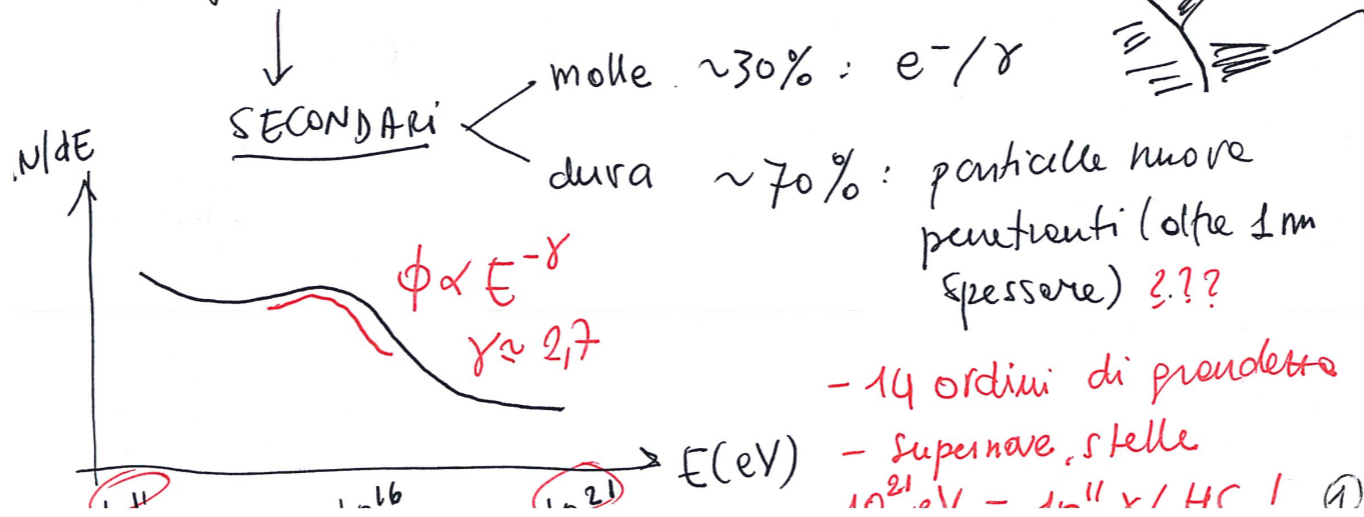
Fin dall'inizio del 900 si mostravano negli exp le prime evidenze di una radiazione extraterrestre che ci colpisce (e colpisce tutti i pianeti) in continuazione.

I primi studi condotti da Hess e Pacini (1911) che studiarono le radiazioni nelle acque del Lago di Bracciano (intensità diminuiva con la profondità) e con palloni aerostatici (Nobel per Hess nel 1936) → **RAGGI COSMICI**

In media una particella incide su 1 cm² di sup. terrestre ogni secondo. Si dividono in due componenti:

PRIMARI. sopra l'atmosfera, 90% protoni + He nuclei

↳ interagiscono con nuclei/molecole dell'atmosfera generando una cascata proiettata in avanti

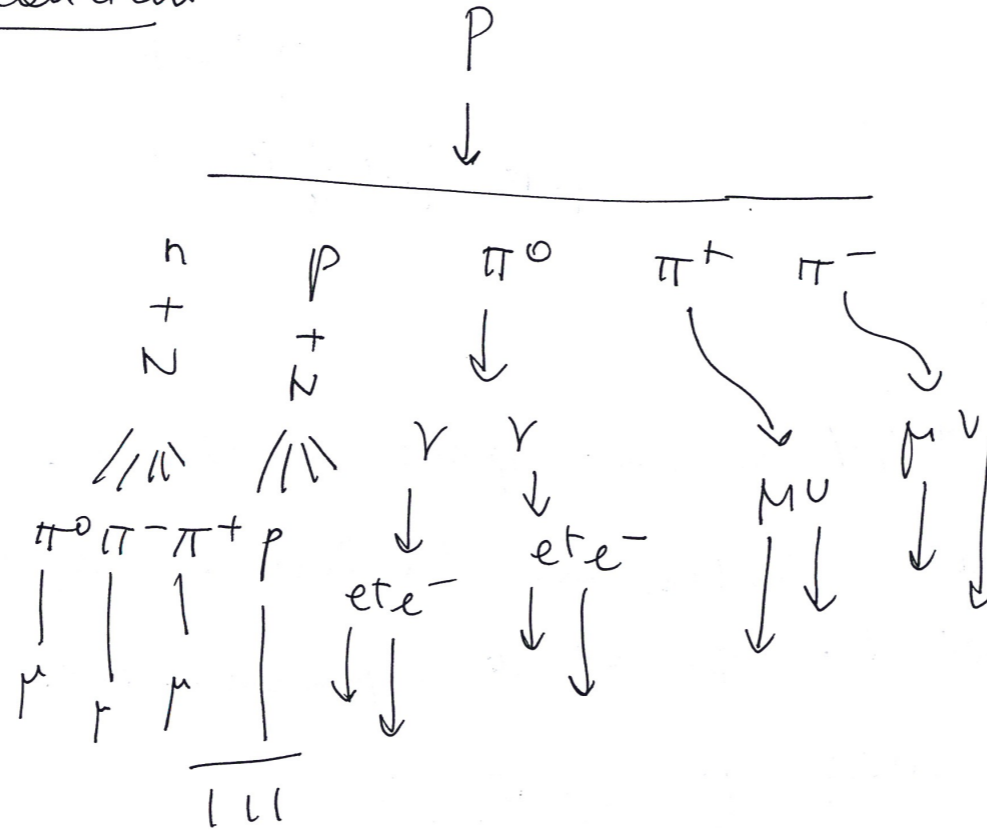


① **COSMICI** (Hesse 1912 Palloni)

primari 90% p He (10%)

↳ nuclei atmosfera → cascata

Secondari

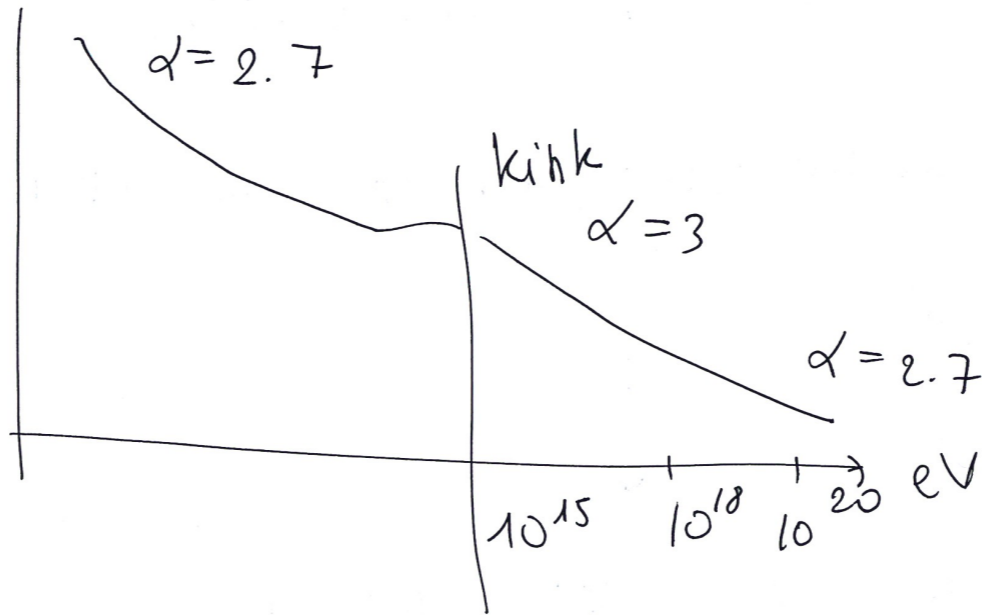


livello del mare $\left\{ \begin{array}{l} \text{molle } 30\% : e^-/\gamma \\ \text{dura } 70\% : \mu \end{array} \right.$

$$\frac{\langle \Phi \rangle_{\text{second.}}^{\text{GeV}}}{d\Delta t dS} \Big|_{\text{mare}} = \frac{10^4}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \approx \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

$$\Phi_{\text{primari}} \propto E^{-\gamma}; \quad \gamma = 2,7 \quad | \quad E < 10^{15} \text{ eV} \quad \text{poi } \alpha = 3$$

$$\phi \sim E^{-\alpha}$$



Galattici:

$$E \sim 10^4 \text{ TeV}$$

permeano spazio interstellare
bombardano costantemente la Terra vengono
accelerati da esplosioni di supernovae $10^2 M_{\odot}$

Extra Galattici

$$E \sim 10^{15} \text{ eV}$$

collapsi gravit. \sim buco nero supermassiccio

$$M > 10^9 M_{\odot}$$

$$> 10^{20} \text{ eV} \rightarrow 200 \cdot 10^6 \text{ anni luce } ??$$

PARTE 1: SCOPERTE CON I RAGGI COSMICI

In media, una particella incide su ogni centimetro quadrato di superficie sulla Terra ogni secondo.



i raggi cosmici sono un laboratorio naturale di particelle.

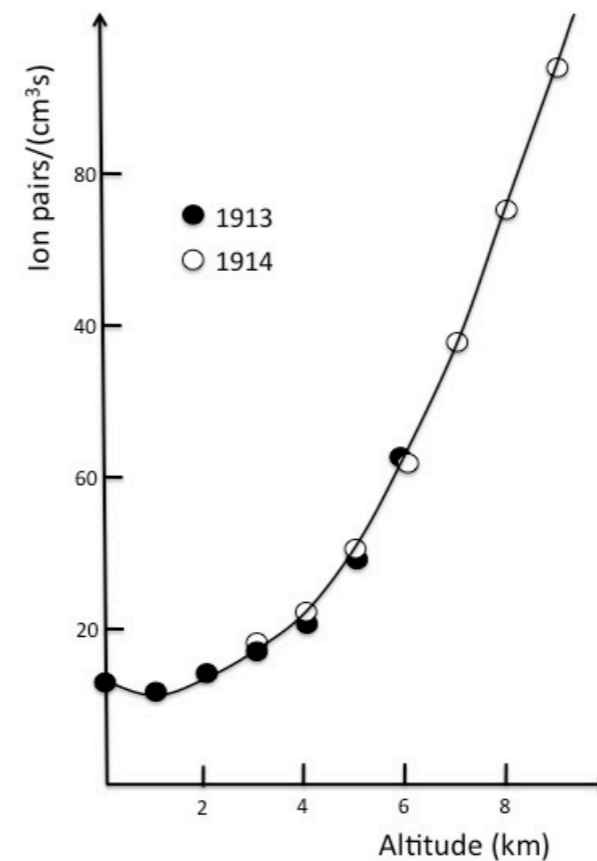
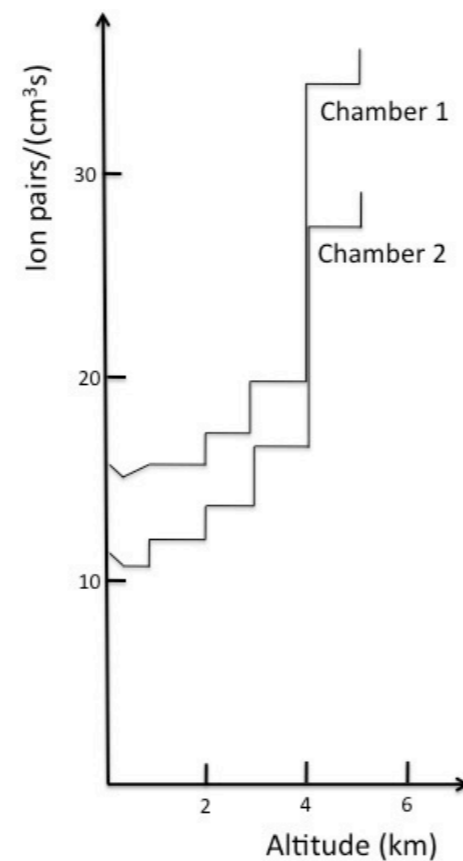
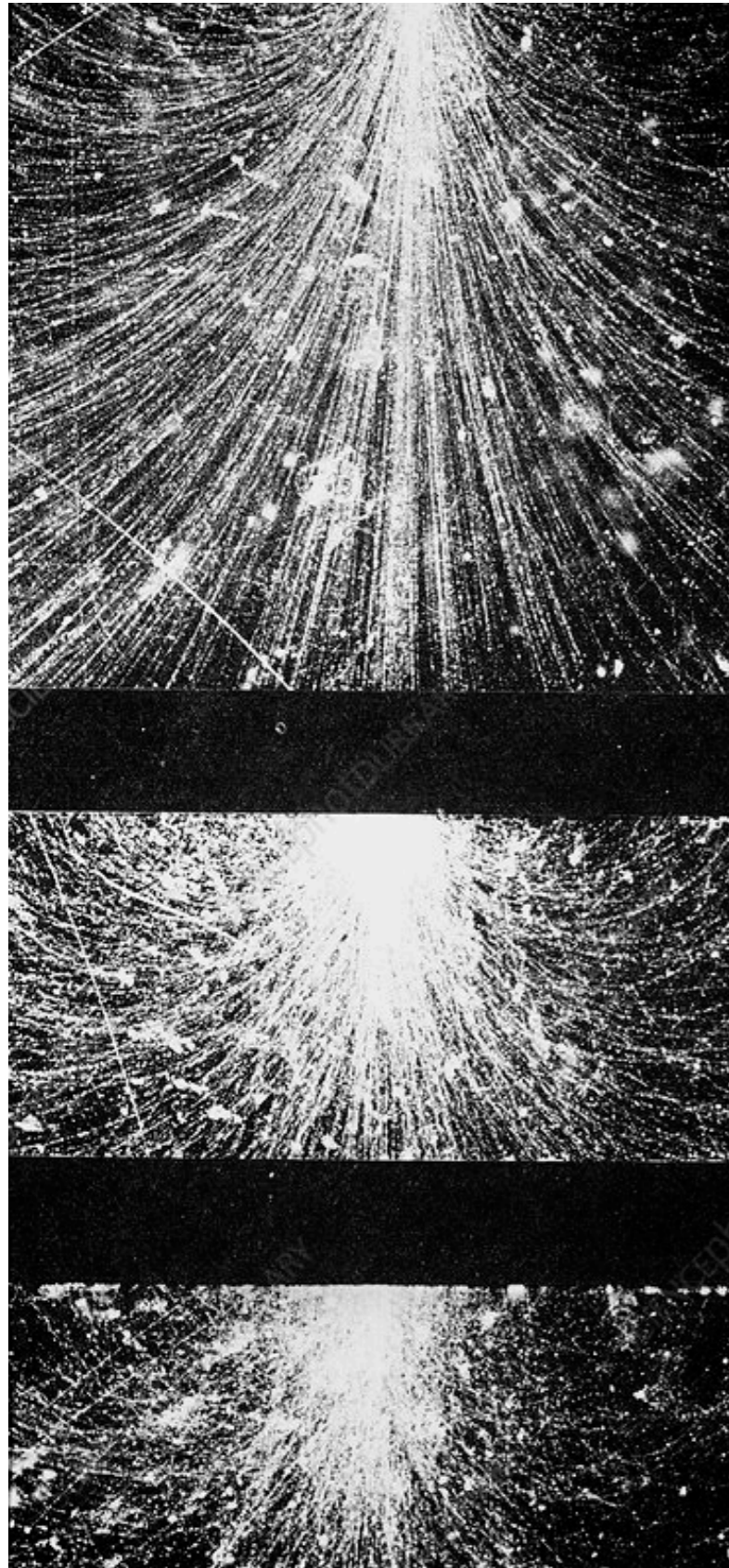
Gli albori: Hesse nel suo pallone alla scoperta dei cosmici

I RAGGI COSMICI

1912

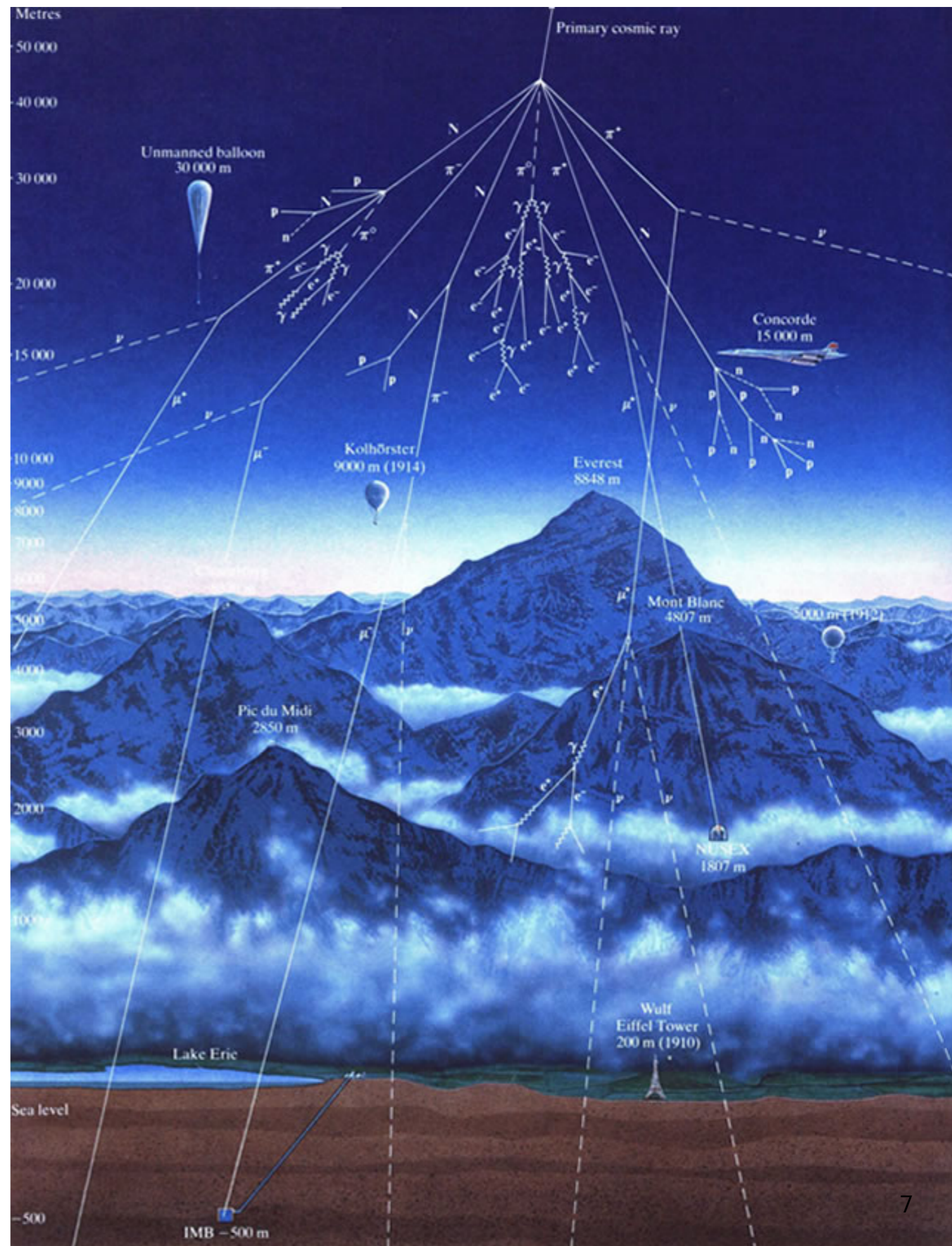
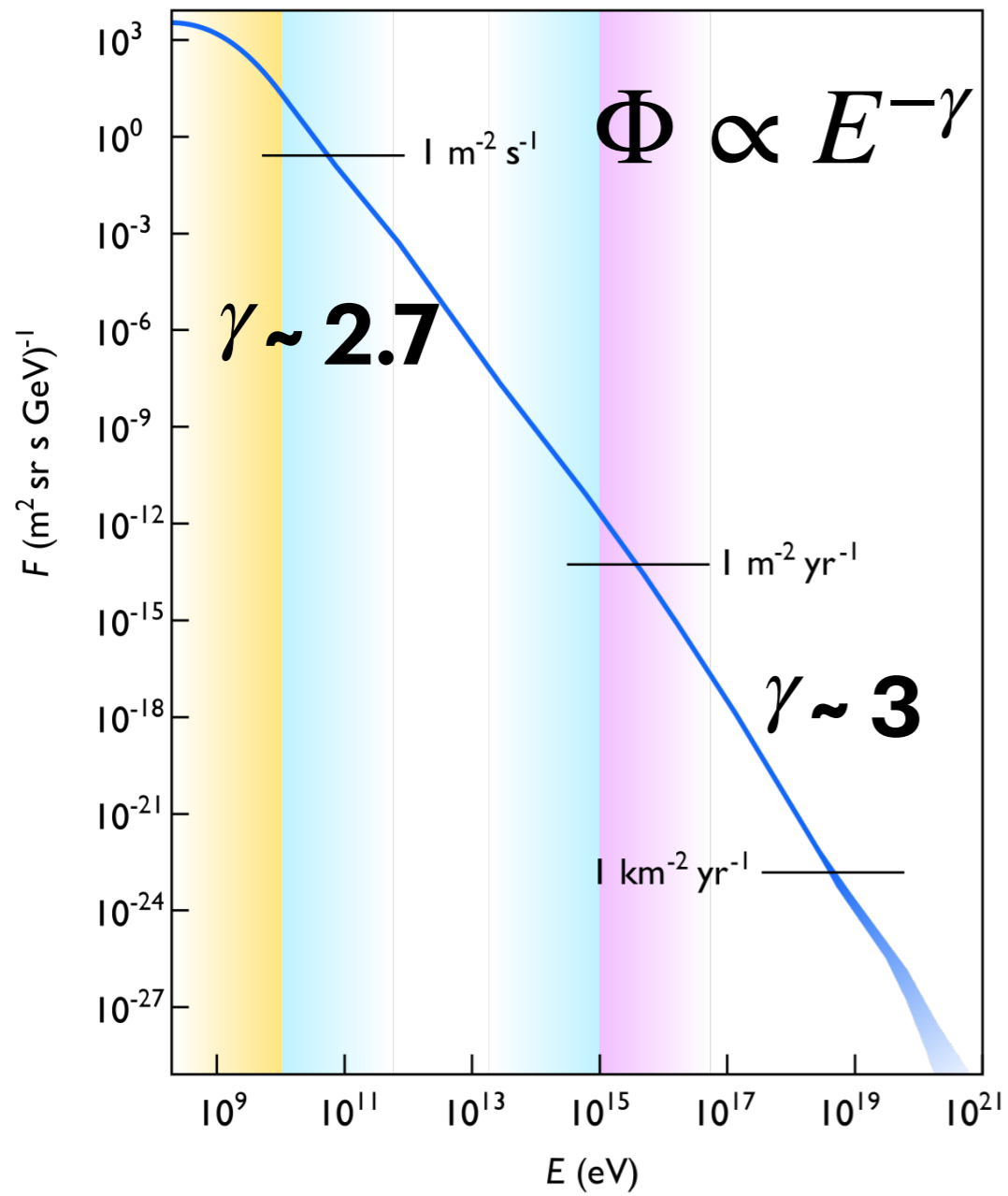
misuravano
ionizzazione crescente
con l'altitudine
(intensità x2 tra 1000 e
4000 metri)

misure attraverso
un *elettrometro*
(strumento di
misura della rate di
produzione di ioni)

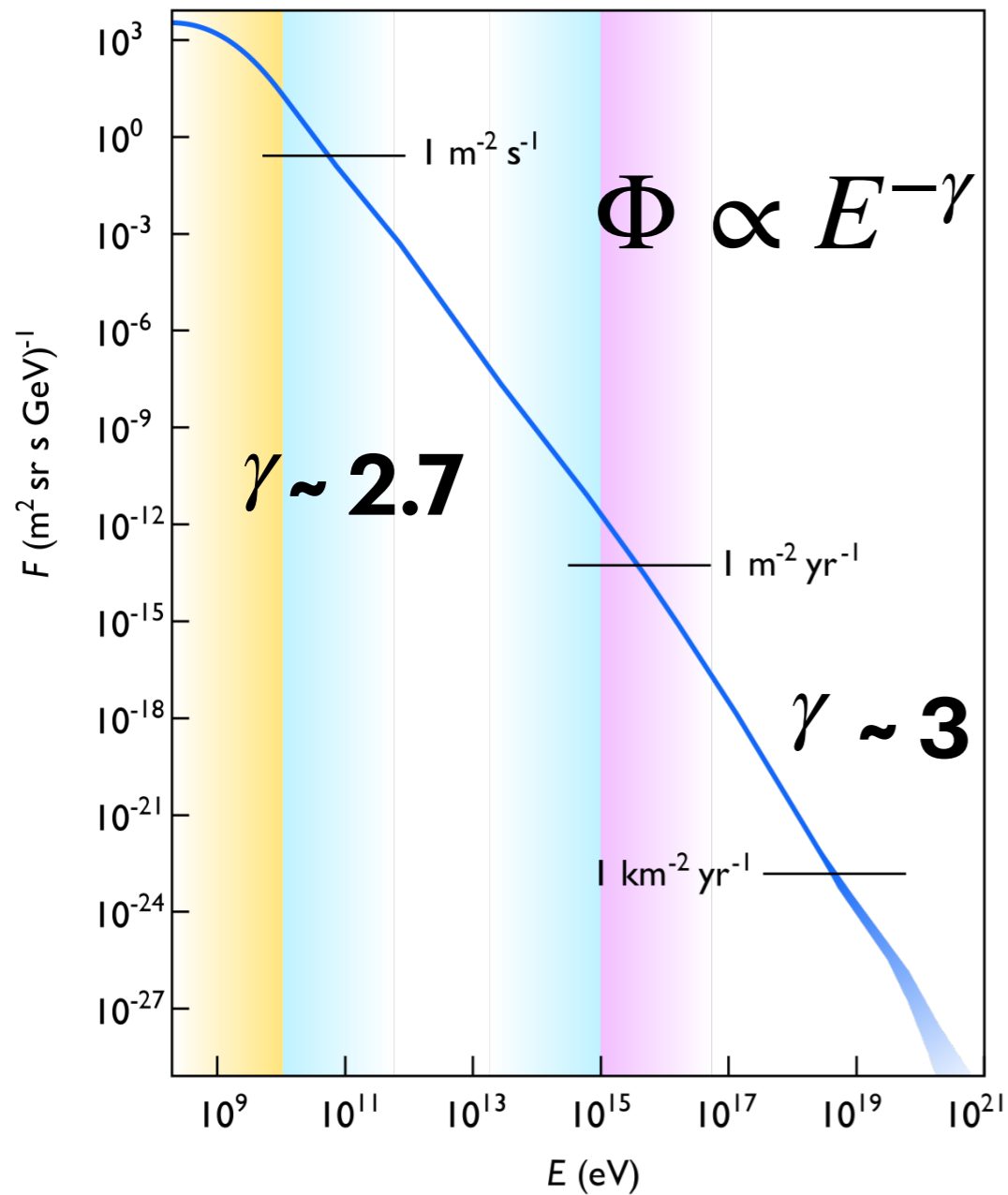


perché non poteva
venire dal sole?

I RAGGI COSMICI



I RAGGI COSMICI

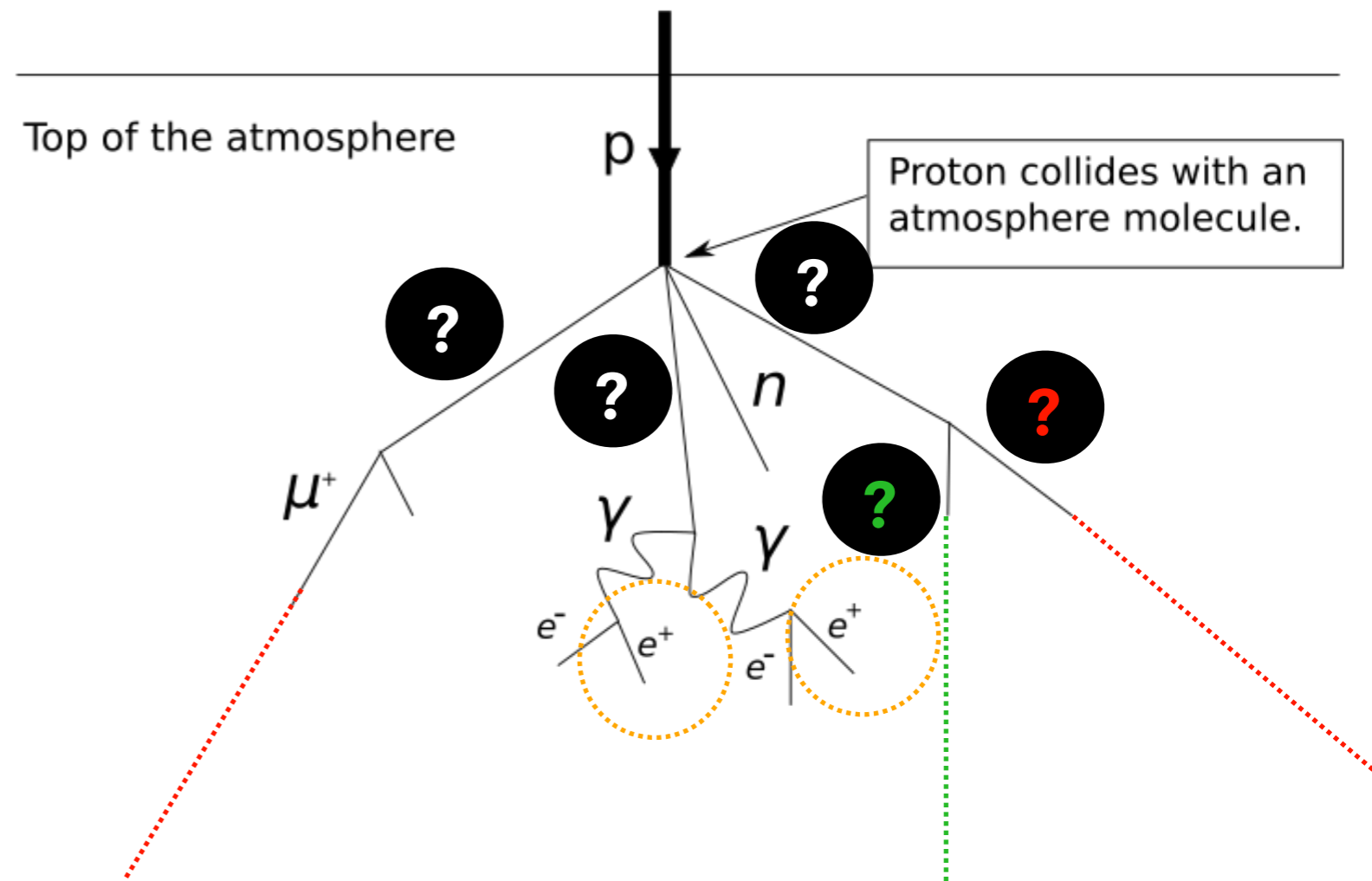


?

?

vennero identificati come

i mesoni π della teoria di Yukawa



i raggi cosmici forniscono un modo naturale di produrre i positroni e confermare la teoria di Dirac!



Presente: MAGIC

sensibile ai fotoni
cosmici fino a 30
TeV

2200m sopra il
livello del mare alle
Canarie

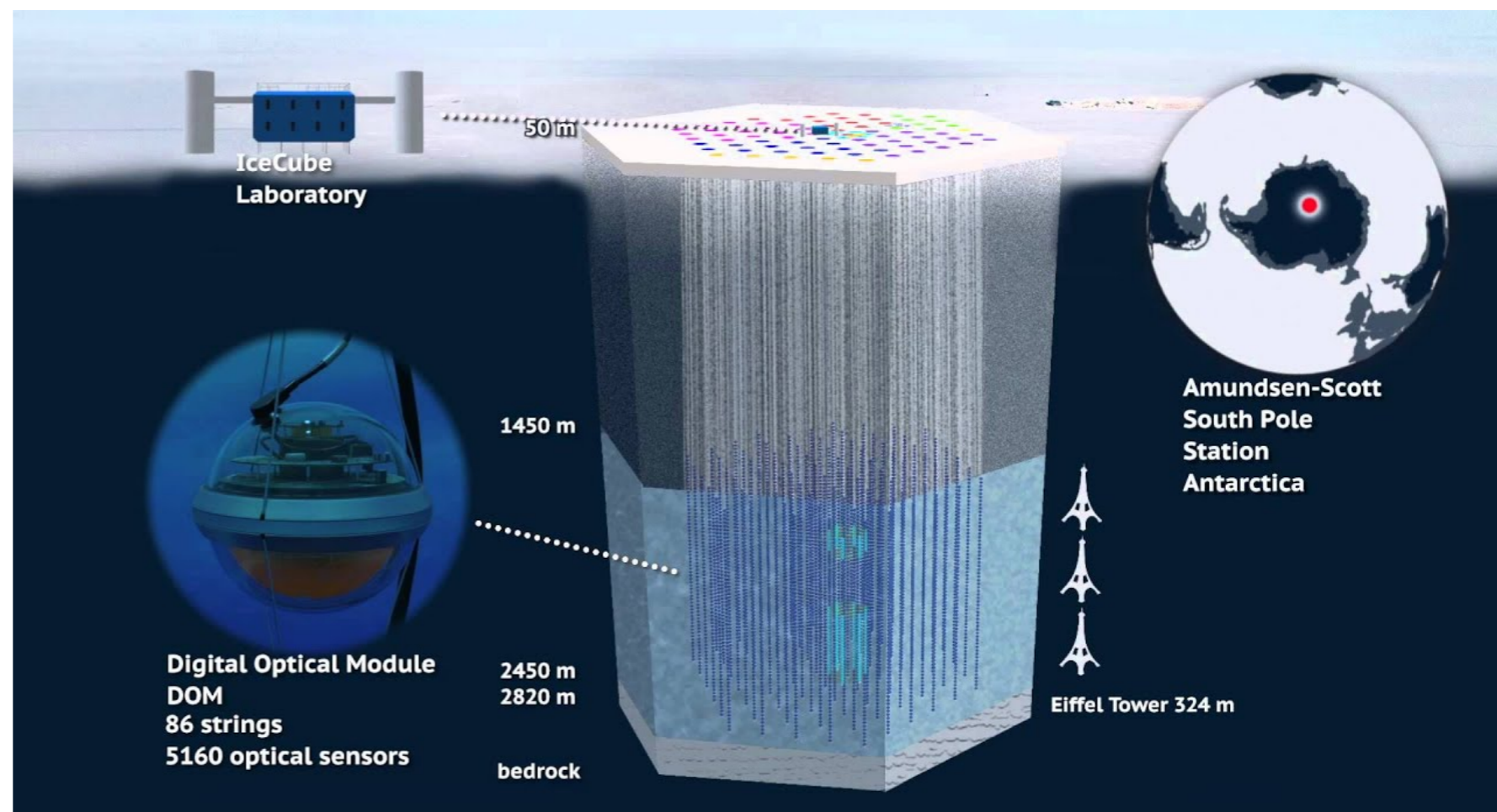
telescopi imaging
Cherenkov
misurano lo sciame
prodotto

2024

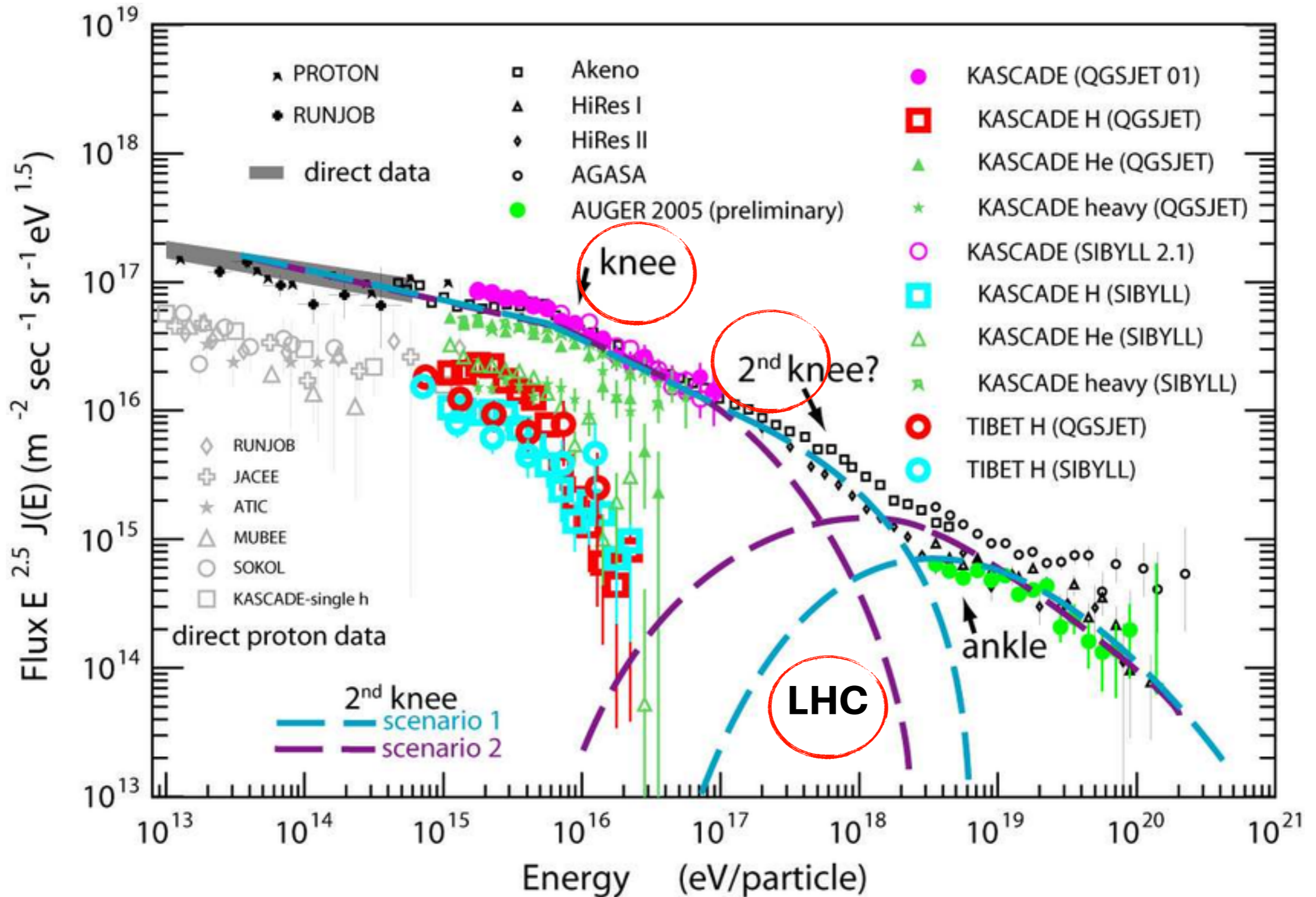
Presente: ICECUBE

sensibile ai neutrini
cosmici fino a ~PeV

sensori
ottici+fotomoltiplicatori
in 1 km cubo sotto al
ghiaccio artico



I RAGGI COSMICI: STUDI SPERIMENTALI DELLO SPETTRO IN ENERGIA



CAMERE A NEBBIA PER MISURARE I COSMICI

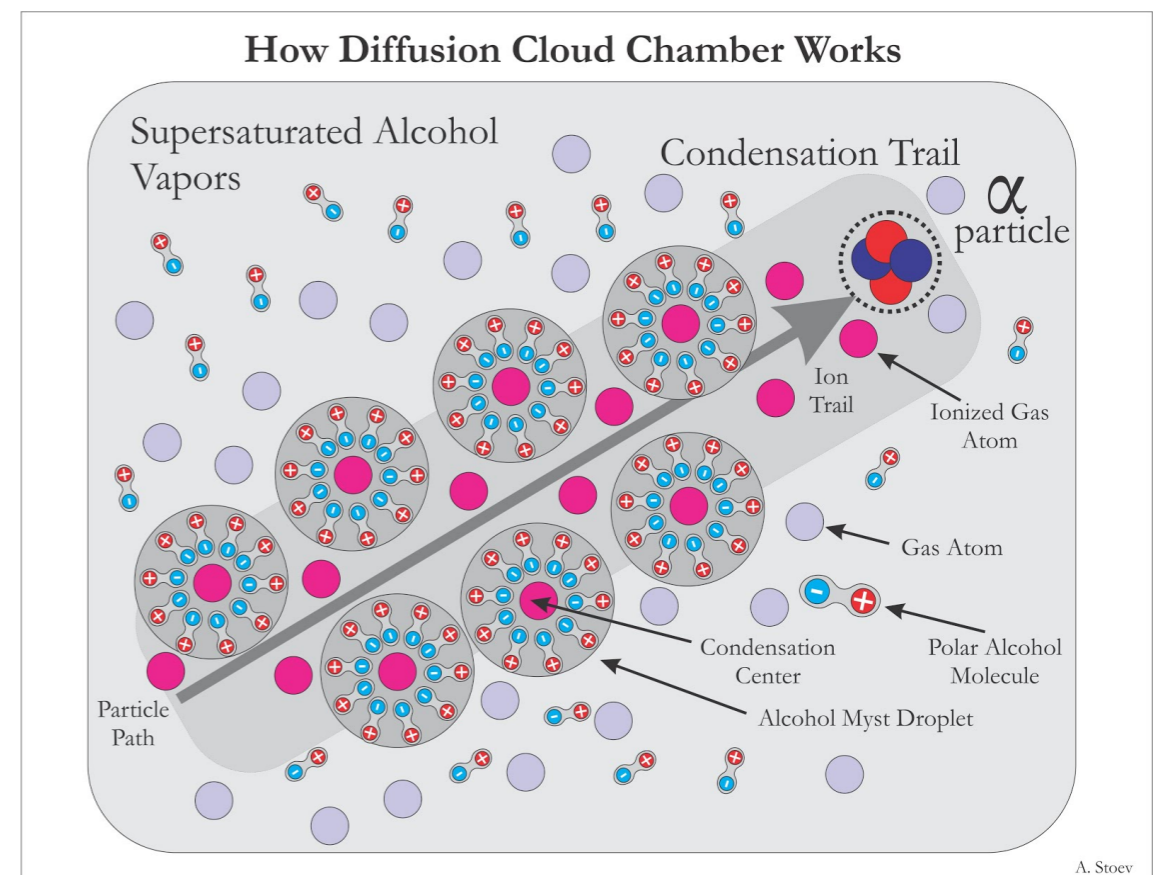
1 Creazione della nebbia

- Una camera a nebbia è riempita con una miscela di gas saturo di vapore, solitamente una miscela di alcool e acqua.
- Un pistone rapido viene utilizzato per espandere rapidamente il gas, causando un abbassamento della temperatura e la formazione di una nuvola di vapore sovra-saturo all'interno della camera.



2. Tracciamento delle particelle ionizzanti

- Quando una particella ionizzante (come un elettrone o un fotone gamma) attraversa la camera, ionizza le molecole nella nuvola di vapore lungo il suo percorso.
- Le ionizzazioni creano una traccia di ioni, che fungono da nuclei di condensazione per la formazione di goccioline nella nebbia.



CAMERE A NEBBIA PER MISURARE I COSMICI

3. Formazione delle tracce

- Lungo la traccia della particella ionizzante, le goccioline di vapore si condensano attorno ai nuclei di ionizzazione, formando una traccia di piccole goccioline visibili.

4. Osservazione delle tracce

- Le tracce delle particelle ionizzanti possono essere osservate e fotografate con una luce adeguata, solitamente fornita da una fonte luminosa laterale.

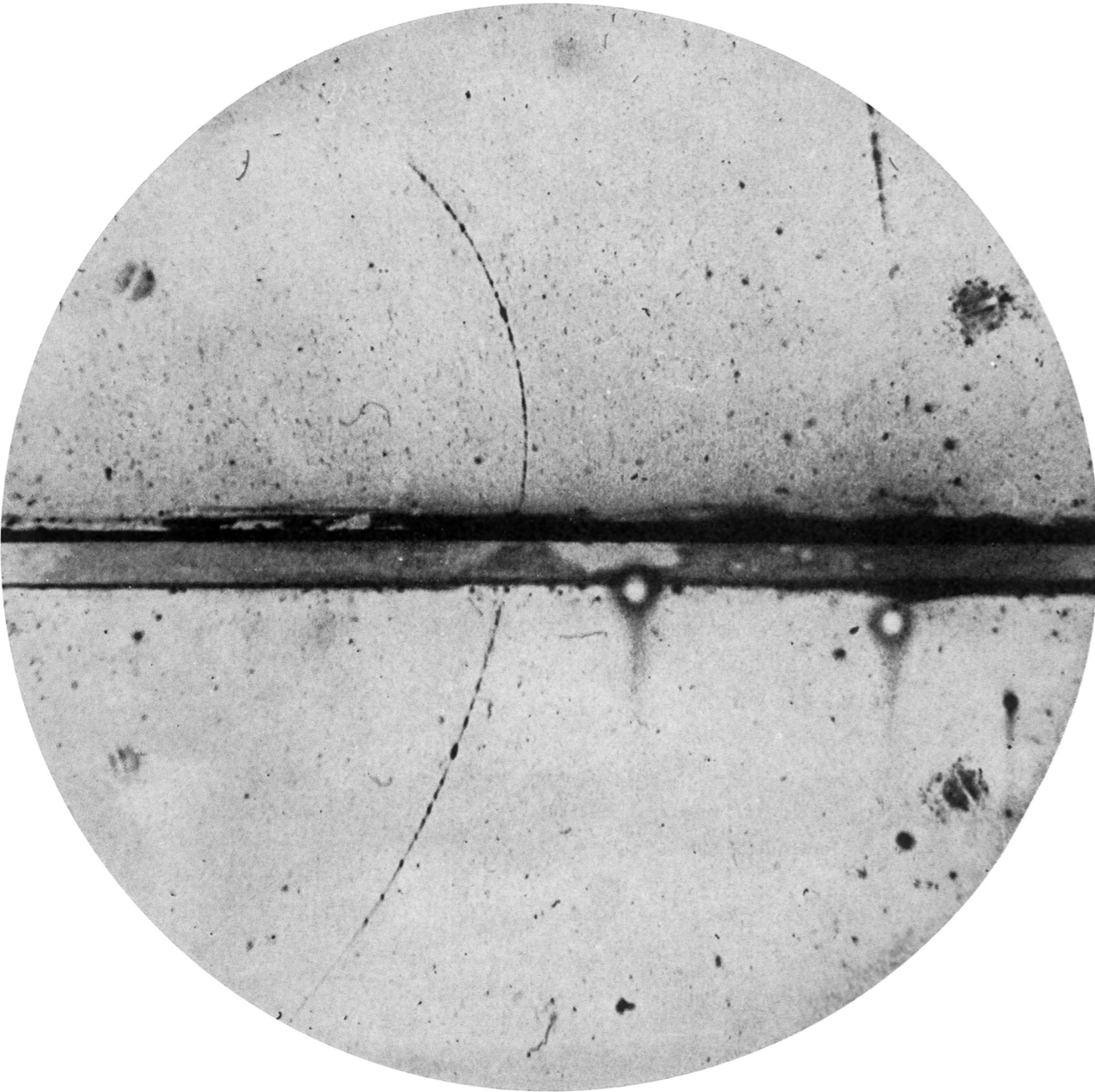


- Le tracce possono essere analizzate per determinare il tipo e l'energia della particella originaria.

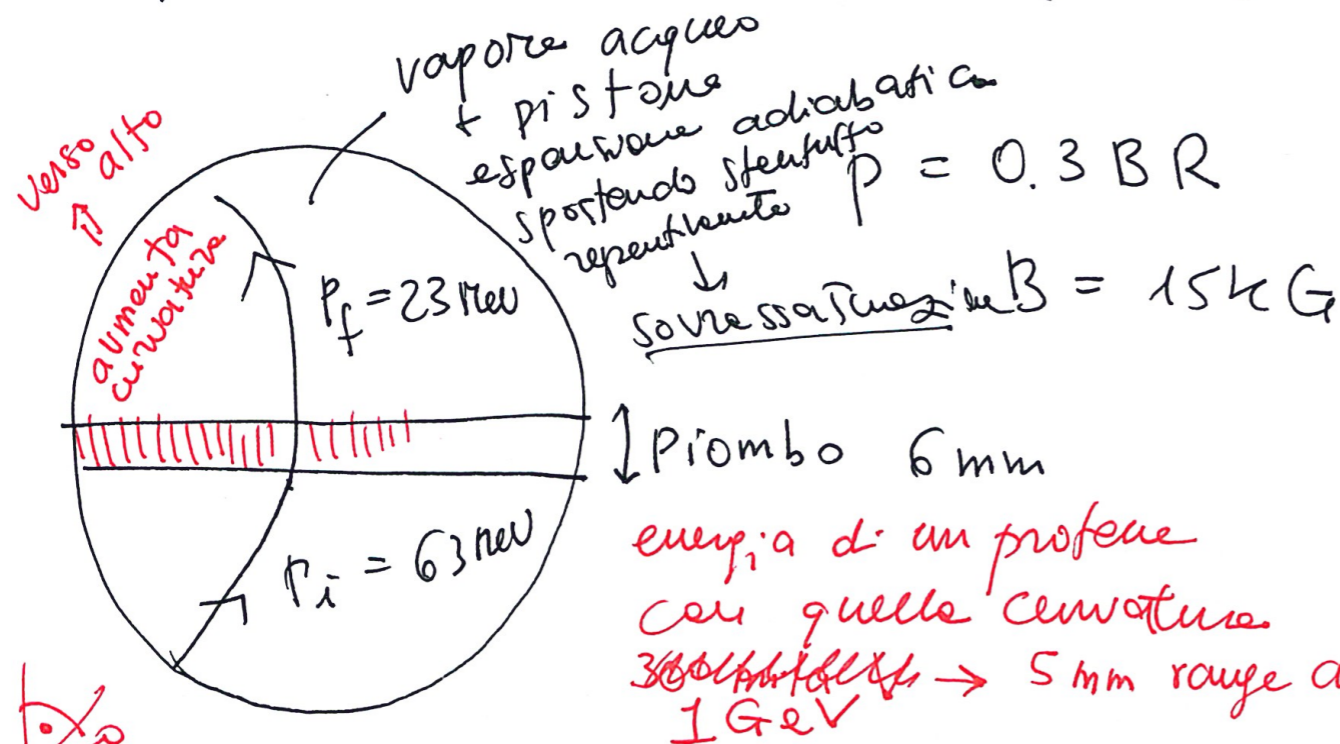
- Applicando un campo magnetico B alla camera, misurando la curvatura R delle tracce, posso ottenere l'impulso attraverso la formula $p = 0.3BR$

LA SCOPERTA DEL POSITRONE

Carl David Anderson, 2 agosto 1932

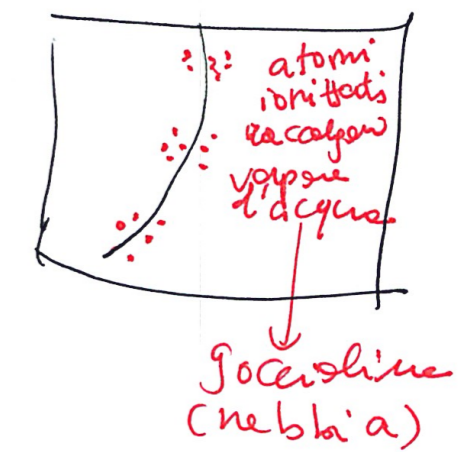


Esperimento di Anderson (1933) "The Positive Electron"



Camera a nebbia in un elettroscopio esposto ai raggi cosmici secondari

particelle lasciano scia di goccioline lungo la loro traiettoria ionizzando il mezzo (gas saturo di vapore d'acqua)



$E^2 = p^2 + m^2$ protone o positron?

analisi ionizzazione → range
un protone si sarebbe fermato molto prima

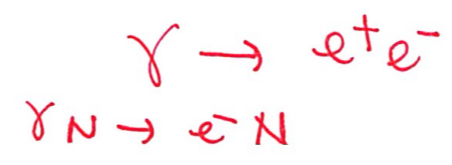
$r_p = 5mm$
 $r_{e^+} = 6cm$

1600 foto: # ⊕ = # ⊖ ! si aspettavano tutte ⊖

ionizzazione curvatura + = ionizzazione curvatura - (elettroni).

↓
masse simili (uguali)

minor ionizzazione per positroni che per protoni



La scoperta di un elettrone positivo, conferì finalmente gloria alle teorie di Dirac del mese di particelle a $E < 0$, che non sono quindi esone ma antiparticelle!

2) Scoperta del muone

Confermando lo studio dei cosmici, grazie a tecniche di dE/dx , curvature e misure di impulso, si riuscì a ricevere la mano delle particelle che compongono i cosmici "duri":

$$\boxed{\tau_{\text{Yukawa}} = \frac{\mu}{\cos M} ?}$$

⊗ penetranti
 ⊗ poca energia persa

$\left\{ \begin{array}{l} m_{\mu} \approx 200 m_e \\ \quad (105 \text{ MeV}) \\ \tau_{\mu} \approx 2,2 \times 10^{-6} \text{ s} \end{array} \right.$	⊗ <u>carichi \oplus e \ominus</u>
	⊗ <u>β incompatibile con protoni.</u>

All'inizio, dato il successo delle teorie di Yukawa si identificò questa particella col mesotrone, mediatore delle interazioni forti. La smentita di questa associazione avvenne definitivamente nel 1945 a Roma:

ESPERIMENTO DI CONVERSI-PANCINI-PICCOLI

⊗ slide

Scoperta del pione.

Nel 1947 Perkins osserva un evento in emulsioni fotografiche che mostra un mesone negativo che si ferma assorbito dal nucleo e decade in π^+ e π^- .

Nell'anno successivo Lattes, Occhialini, Powell riescono a misurare costantemente μ e π : (2)

MUONI E PIONI SONO LA STESSA PARTICELLA?

Come abbiamo visto Yukawa propose un modello che prevedeva l'esistenza di particelle di massa tra 100 e 200 MeV come mediatori della interazione nucleare: **i mesoni π^\pm (pione)**

Street e Stevenson, dalla misura simultanea dell'impulso, dalla curvatura della traccia in campo magnetico e dal dE/dx , stimarono il valore della massa della **componente dura dei raggi cosmici chiamata mesone μ^\pm (muone)**: $m(\mu) \sim 207 \times m(e)$.

Nel 1942 Rasetti, misurando il ritardo tra il passaggio di un muone e il suo decadimento in un elettrone, determinò la sua vita media:

$$\tau(\mu) \sim 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

1935

1937

MUONI E PIONI SONO LA STESSA PARTICELLA?

Tomanaga e Araki prevedono comportamenti molto diversi nell'interazione con la materia dei pioni positivi e negativi predetti da Yukawa:

❖ i pioni di Yukawa **negativi non decadono**: una volta fermati nel materiale, dopo aver perso tutta la loro energia cinetica per ionizzazione, vengono catturati in orbite di tipo atomico ma con raggi molto più piccoli di quelli elettronici: la loro funzione d'onda si sovrappone a quella del nucleo ed interagiscono col nucleo in tempi $\tau \sim 10^{-23}$ s

❖ i pioni di Yukawa **positivi** si fermano e poi decadono

1940

Serve un esperimento per capire se *anche* i **muoni positivi/negativi** si comportano *allo stesso modo* e quindi possono essere identificati come **le particelle di Yukawa: $\mu = \pi$?**

L'ESPERIMENTO DI CONVERSI-PANCINI-PICCIONI

“Secondo una mia opinione personale, io vorrei dire che la fisica moderna delle particelle iniziò negli ultimi giorni della Seconda Guerra Mondiale, quando un gruppo di giovani fisici italiani, Conversi, Pancini, Piccioni, che erano a Roma nascosti dalle forze di occupazione tedesca, iniziarono un esperimento di straordinaria importanza”.

Luis Alvarez, nella sua Nobel Lecture nel dicembre del 1968

L'ESPERIMENTO DI CONVERSI-PANCINI-PICCIONI

si selezionano i raggi cosmici penetranti nelle componenti positive e negative: $B = 15 \text{ kG} = 1.5 \text{ T}$

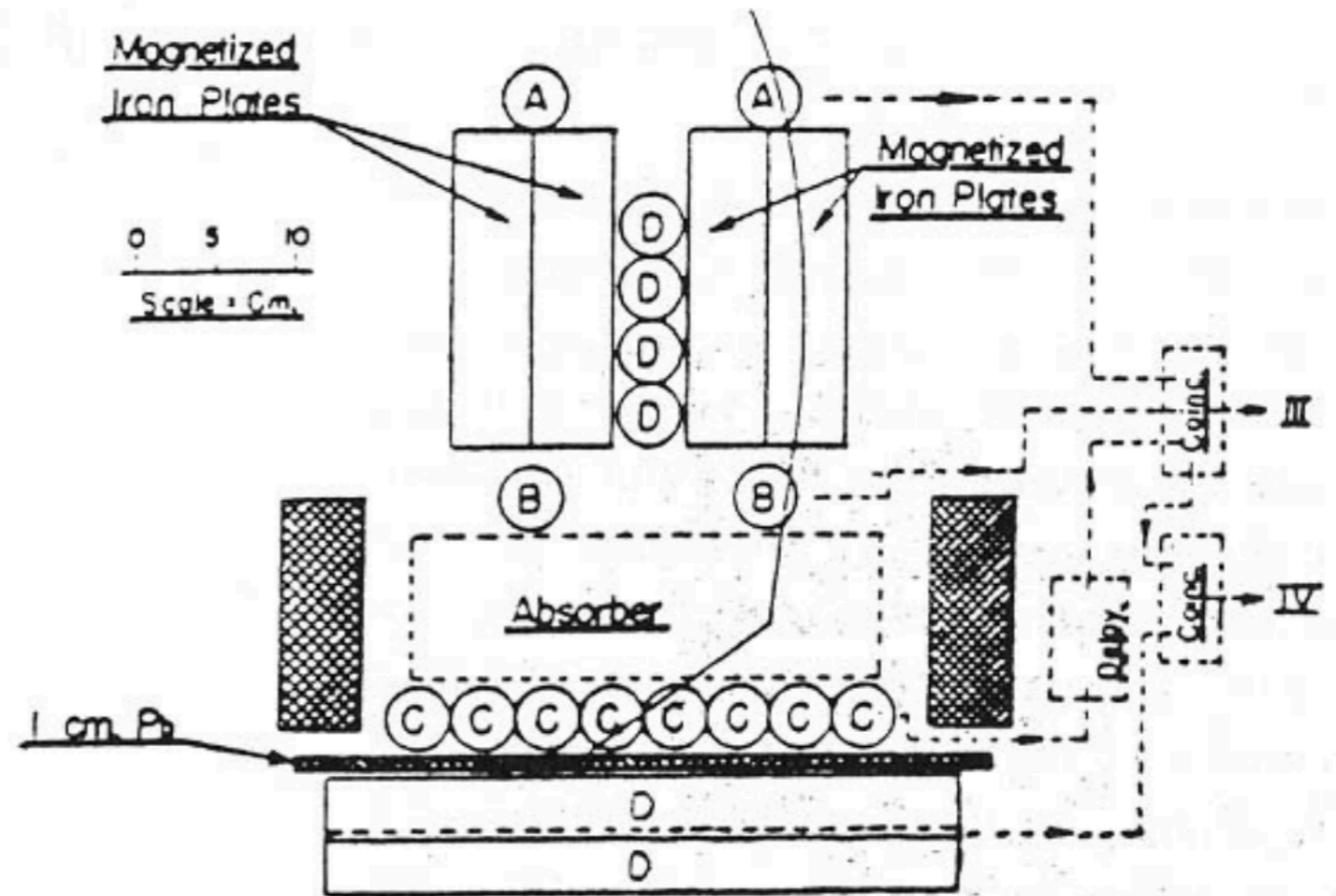


FIG. 1. Disposition of counters, absorber, and magnetized iron plates. All counters "D" are connected in parallel.

L'ESPERIMENTO DI CONVERSI-PANCINI-PICCIONI

si selezionano i raggi cosmici penetranti nelle componenti positive e negative: $B = 15 \text{ kG} = 1.5 \text{ T}$

si effettuano due esperimenti, usando due diversi materiali assorbitori nei quali le particelle selezionate possono frenare ed arrestarsi nell'assorbitore:

Esperimento 1): assorbitore di ferro;

Esperimento 2): assorbitore di carbonio.

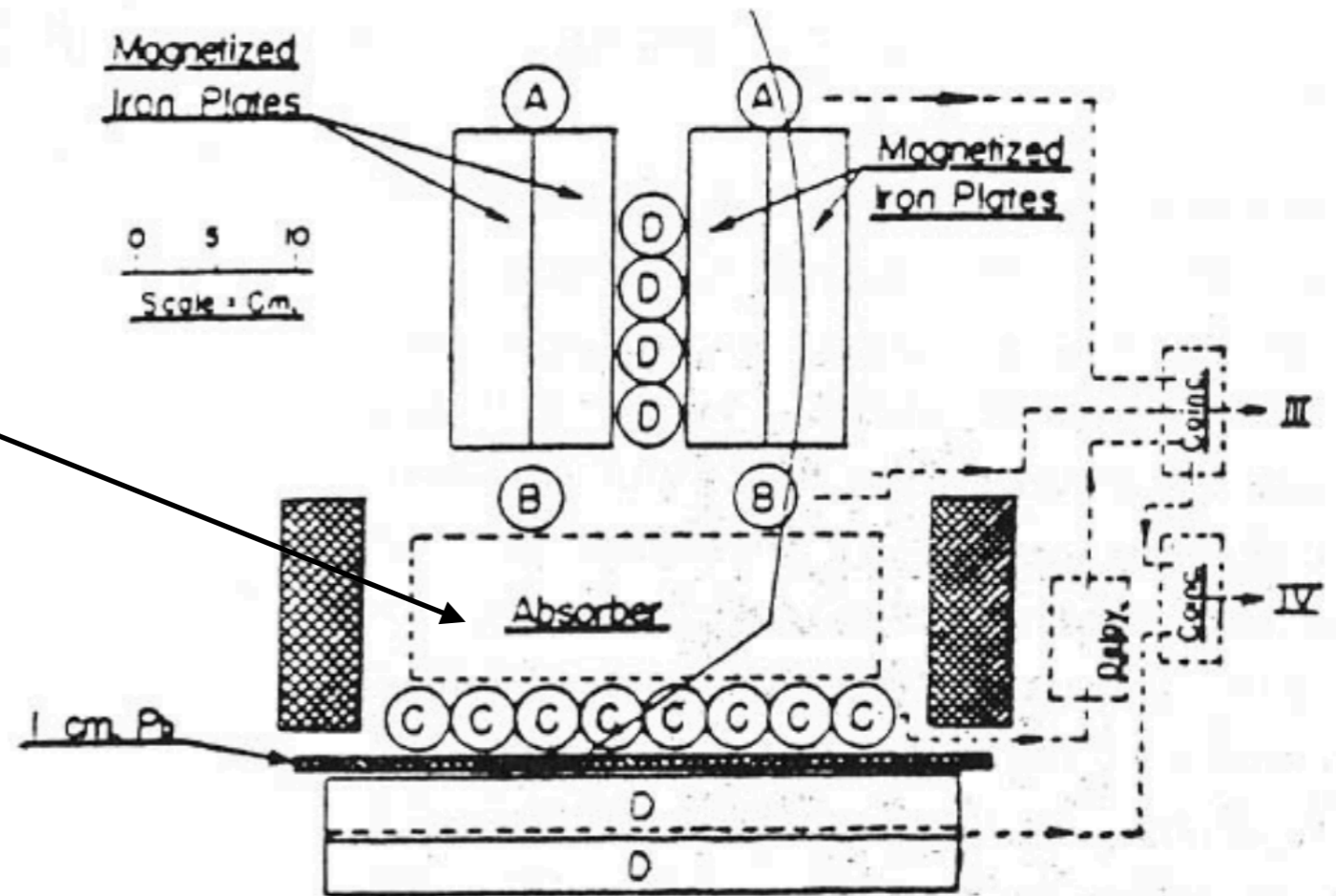


FIG. 1. Disposition of counters, absorber, and magnetized iron plates. All counters "D" are connected in parallel.

L'ESPERIMENTO DI CONVERSI-PANCINI-PICCIONI

si selezionano i raggi cosmici penetranti nelle componenti positive e negative: $B = 15 \text{ kG} = 1.5 \text{ T}$

si effettuano due esperimenti, usando due diversi materiali assorbitori nei quali le particelle selezionate possono frenare ed arrestarsi nell'assorbitore:

Esperimento 1): assorbitore di ferro;

Esperimento 2): assorbitore di carbonio.

ci si assicura che le particelle si **arrestino** nell'assorbitore (e che quindi non escano via verso il basso) mettendo la **coincidenza dei contatori (AB)** in **anti-coincidenza con i contatori D**: $(AB) \times D$

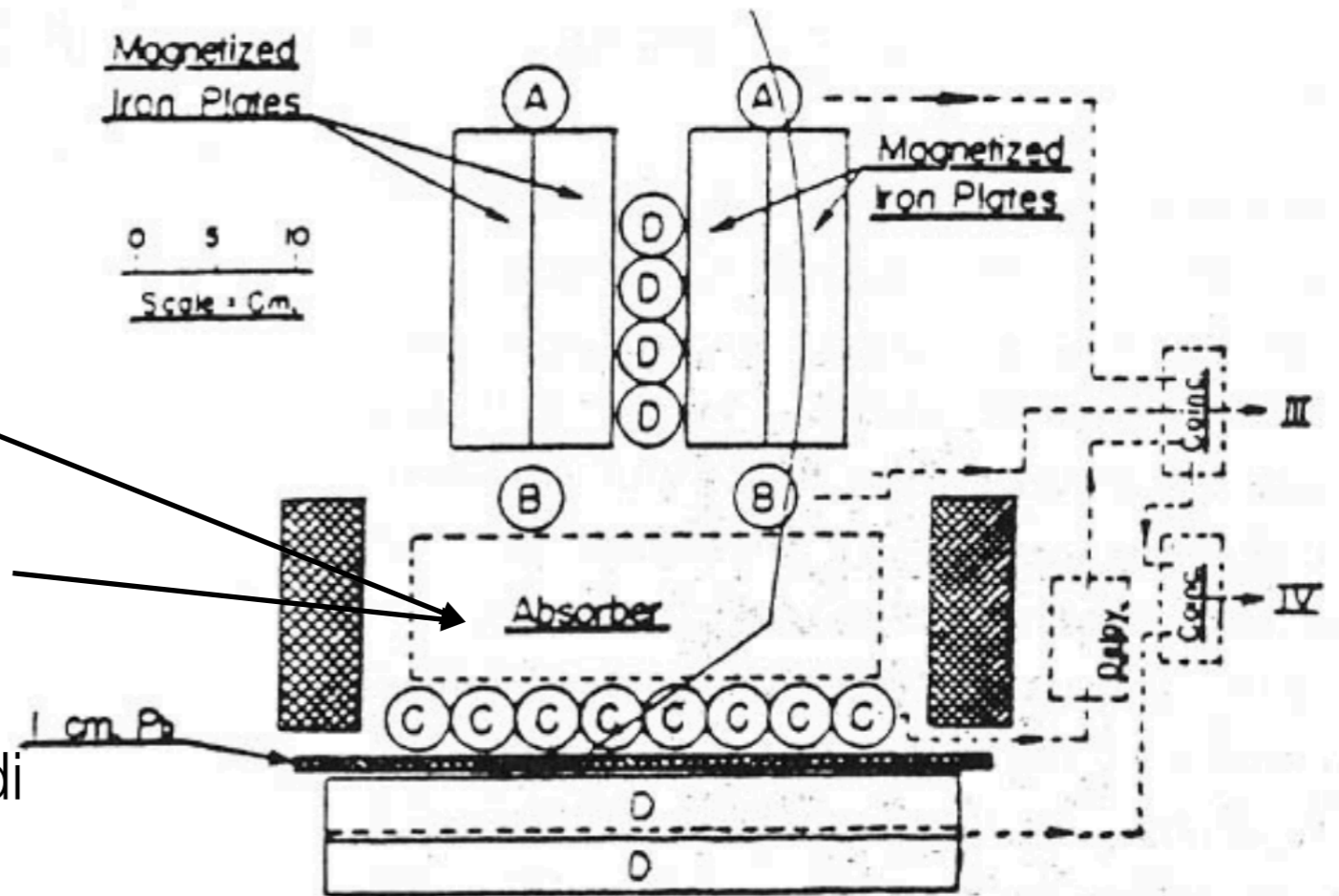


FIG. 1. Disposition of counters, absorber, and magnetized iron plates. All counters "D" are connected in parallel.

L'ESPERIMENTO DI CONVERSI-PANCINI-PICCIONI

si selezionano i raggi cosmici penetranti nelle componenti positive e negative: $B = 15 \text{ kG} = 1.5 \text{ T}$

si effettuano due esperimenti, usando due diversi materiali assorbitori nei quali le particelle selezionate possono frenare ed arrestarsi nell'assorbitore:

Esperimento 1): assorbitore di ferro;

Esperimento 2): assorbitore di carbonio.

ci si assicura che le particelle si **arrestino** nell'assorbitore (e che quindi non escano via verso il basso)

mettendo la coincidenza dei contatori (AB) in anti-coincidenza con i contatori D: $(AB) \times D$

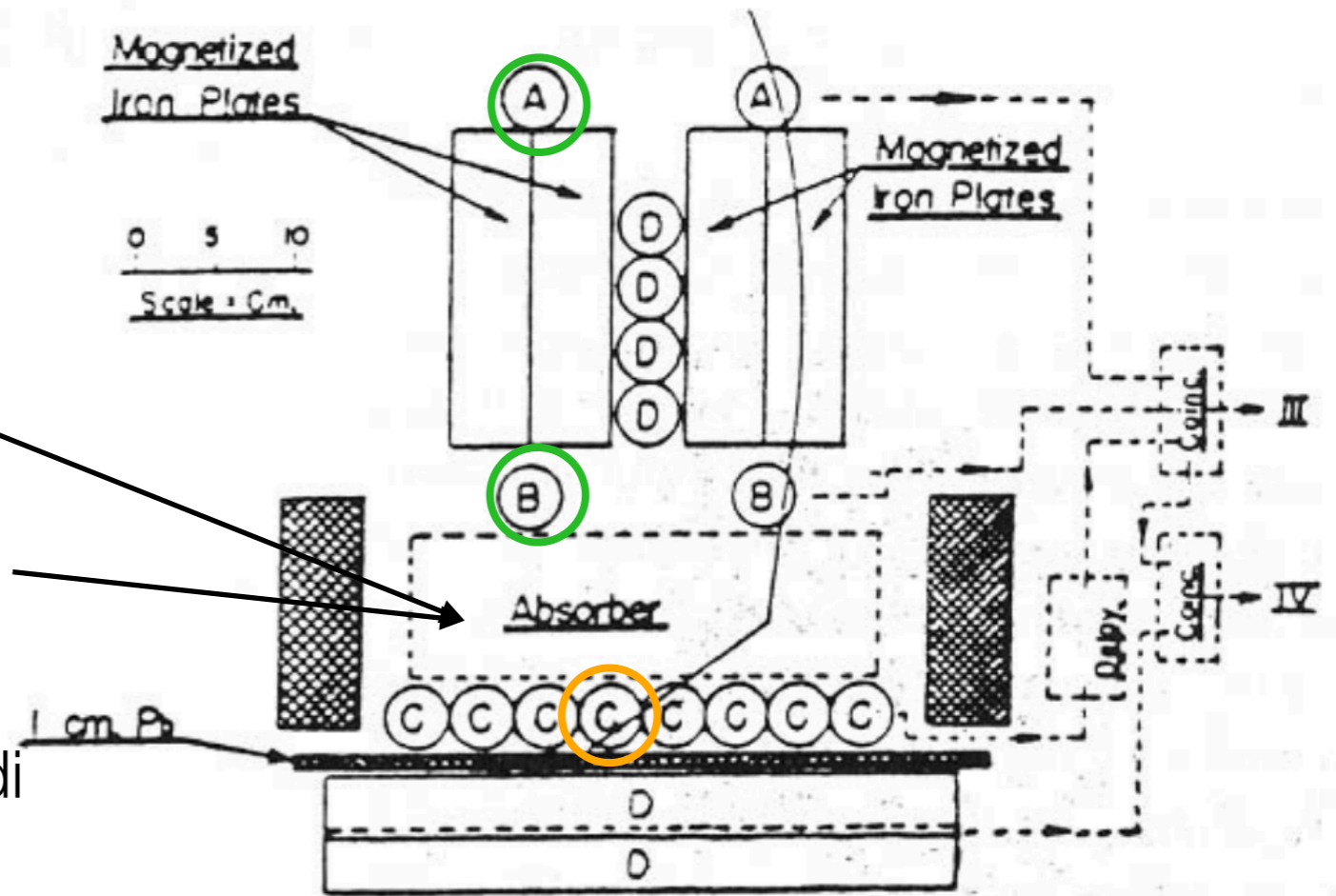


FIG. 1. Disposition of counters, absorber, and magnetized iron plates. All counters "D" are connected in parallel.

L'ESPERIMENTO DI CONVERSI-PANCINI-PICCIONI

si selezionano i raggi cosmici penetranti nelle componenti positive e negative: $B = 15 \text{ kG} = 1.5 \text{ T}$

si effettuano due esperimenti, usando due diversi materiali assorbitori nei quali le particelle selezionate possono frenare ed arrestarsi nell'assorbitore:

Esperimento 1): assorbitore di ferro;

Esperimento 2): assorbitore di carbonio.

Si vede se le particelle decadono o no: **(AB) in coincidenza ritardata con C**, con un ritardo da $1 \mu\text{sec}$ a circa $4.5 \mu\text{sec}$

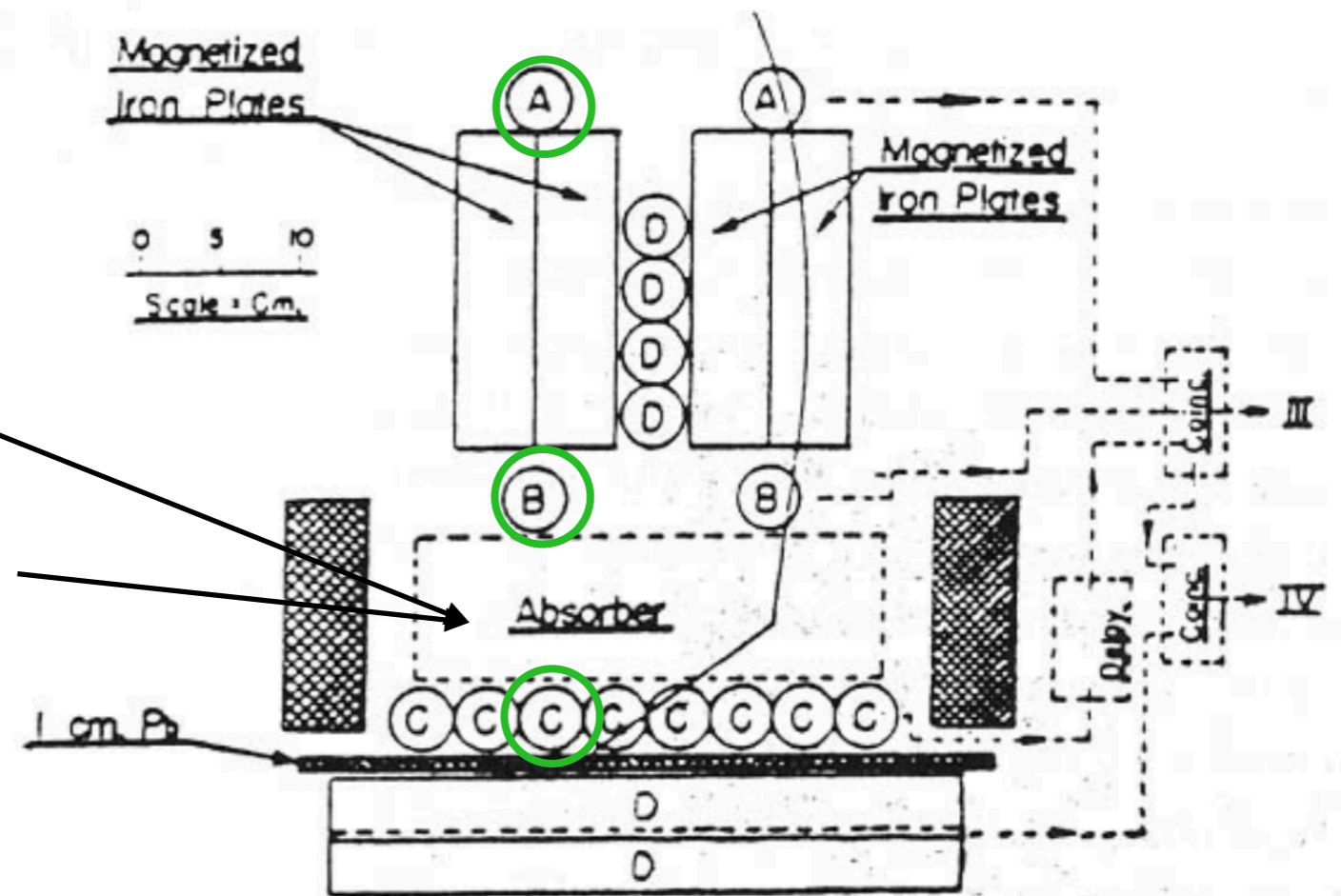


FIG. 1. Disposition of counters, absorber, and magnetized iron plates. All counters "D" are connected in parallel.

L'ESPERIMENTO DI CONVERSI-PANCINI-PICCIONI

ripeto l'esperimento prima con l'assorbitore di ferro e poi con quello di carbonio

Risultati col ferro (Z=26)

come ipotizzato da Yukawa: solo le particelle positive danno un segnale. La componente dura negativa non decade.

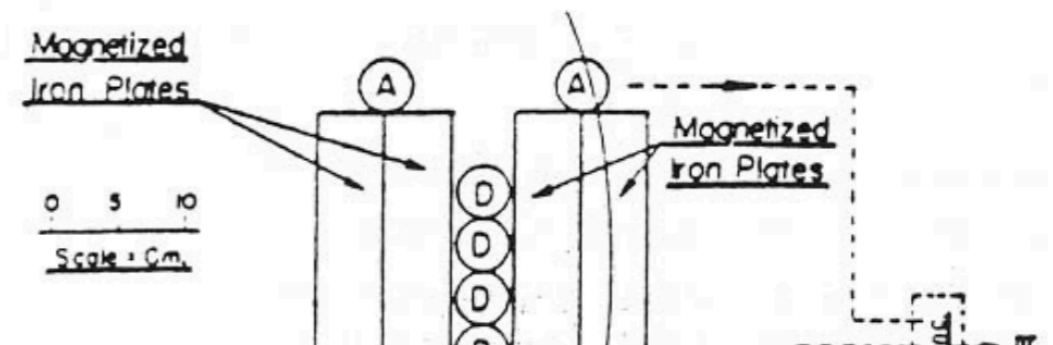
Risultati col carbonio (Z=6): anche i negativi decadono !

com'è possibile?

Nel ferro la "scomparsa" delle particelle penetranti negative si spiega con una interazione debole del tipo cattura K degli elettroni: $\mu^- + p \rightarrow n + X$

la probabilità per questa cattura nucleare K è $\propto Z^4$. Questo ci spiega come in atomi pesanti il muone negativo possa essere assorbito

i muoni non possono essere i mesoni di Yukawa!



mesotroni	Fe	C
positivi	0.67 ± 0.07	0.36 ± 0.05
negativi	0.03 ± 0.03	0.27 ± 0.03

FIG. 1. Disposition of counters, absorber, and magnetized iron plates. All counters "D" are connected in parallel.

$$\mu^{\pm} \neq \pi^{\pm}$$

PARTE 2: SCOPERTE AGLI ACCELERATORI DI PARTICELLE

gli acceleratori sono il più potente strumento sulla terra per lo studio della materia a livello fondamentale

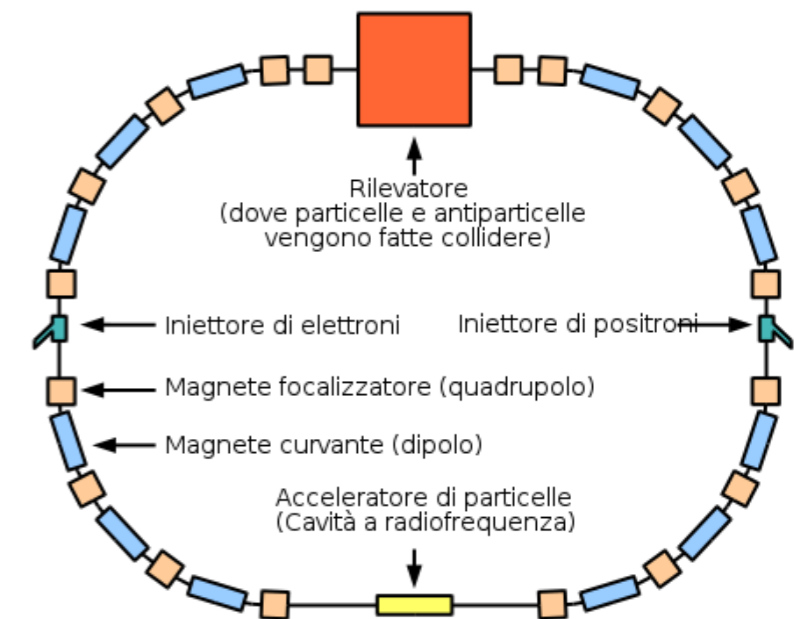


PRINCIPI DI BASE DEGLI ACCELERATORI DI PARTICELLE

macchine che accelerano particelle e le fanno collidere ad alta energia tramite urti
particelle cariche accelerate e curvate tramite campi elettrici e magnetici

- possono essere **lineari o circolari**
- magneti: dipoli (curvare) + quadrupoli (focalizzazione)
- accelerazione: cavità a radiofrequenza
tubo: mantenuto nel vuoto
- Sorgenti: elettroni/positroni o protoni/antiprotoni
ottenute a partire da effetto fotoelettrico o gas ionizzati

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B})$$
$$pc = 0.3BR$$



- Sfida tecnologica: aumentare **l'energia disponibile nel centro**
di massa della collisione (frontiera dell'energia), quindi migliorare magneti (superconduttivi)
e radiofrequenze, e il **numero di particelle nei "pacchetti" (frontiera dell'intensità)**

TIPOLOGIE DI ACCELERATORI

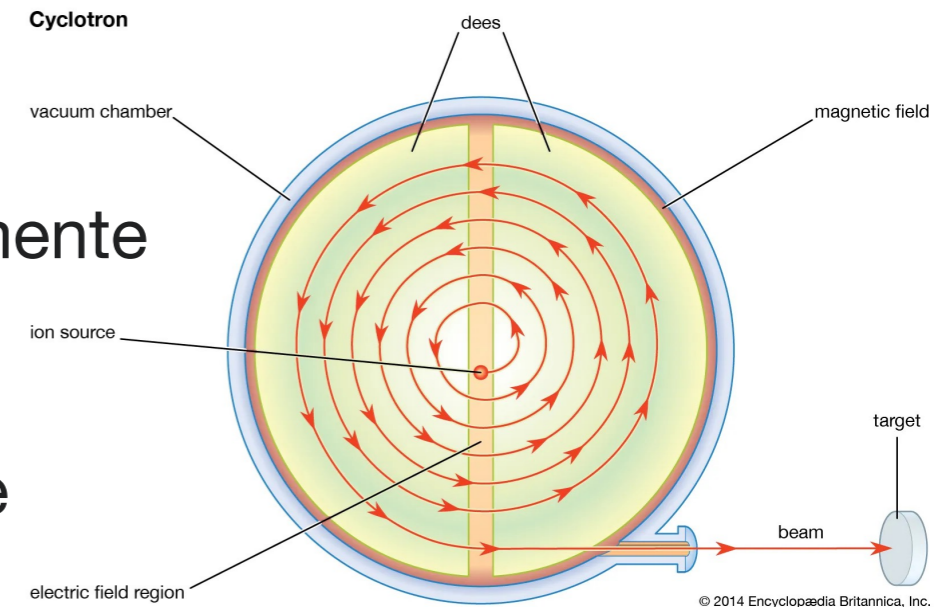
1930
CICLOTRONE

primo grande
acceleratore

oggi usato per
trattare
tumori

camera a vuoto circolare sono presenti
due **elettrodi** semicircolari cavi +
magnete

una particella introdotta tangenzialmente
mantiene orbita circolare ma perde
energia per radiazione (fotoni) e
spiraleggia verso il centro, una ΔV le
mantiene in orbita



1954
SINCROTRONE

inizialmente
pensato come una
variante del
ciclotrone oggi
sorgente di raggi X
collimati per studi
medici o di materia

campo elettrico e magnetico sincronizzati col fascio
di particelle

fasci controllati dai campi
dentro un toroide cavo a vuoto

supera le limitazioni del ciclotrone date
simmetria cilindrica, fasci focalizzati da
magneti piccoli -> limitazione in energia per
emissione di fotoni



IL PRIMO ACCELERATORE MATERIA-ANTIMATERIA

il primo acceleratore e^+e^-

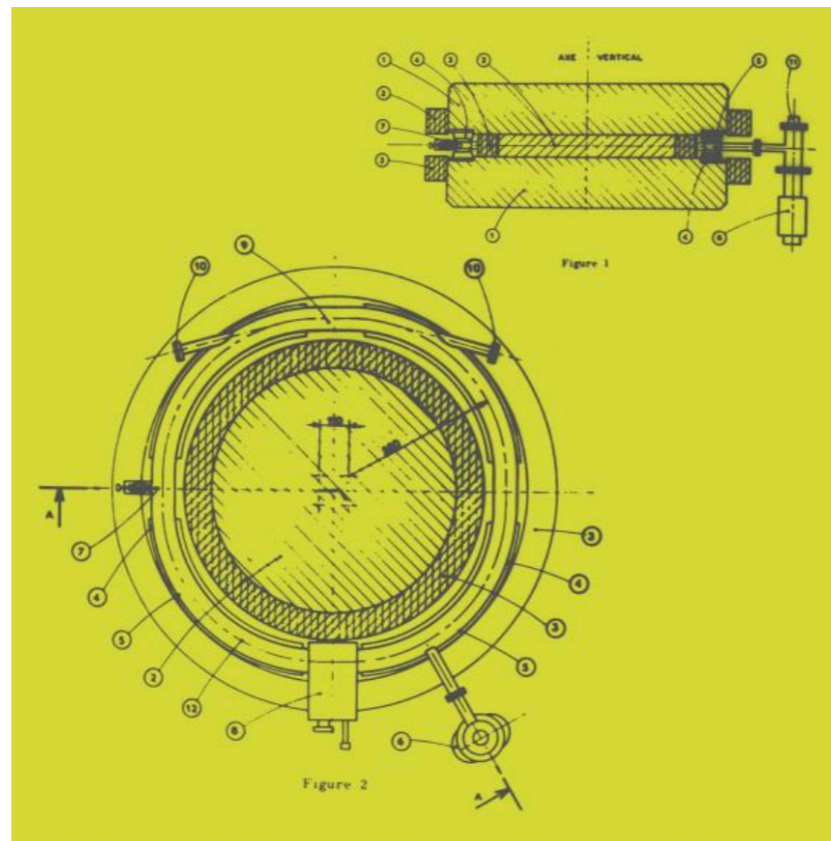
1961
FRASCATI

Bruno Touschek

grande magnete
curvante del peso di
8.5 tonnellate, in
grado di mantenere
le particelle con
energia fino 200 MeV
su un'orbita circolare
di 65 cm ->
"ciambella" in
acciaio inox a vuoto

Raggiunti 400 MeV
nel centro di massa
con fasci da 200
MeV contro i 30 MeV
ottenuti da un
esperimento su
targhetta con fasci
da 1000 MeV!

ADA (Anello di Accumulazione)



sorgente di e^+ dalla conversione dei fotoni del
sincrotrone su bersaglio nell'anello

LUMINOSITÀ DI UN ACCELERATORE CIRCOLARE

Nei collisori moderni due fasci di particelle sono accelerati e curvati in direzione opposta e fatti collidere in punti di intersezione dove sono installati i rivelatori (*esperimenti*)

numero di eventi di un dato processo prodotti al secondo

$$\frac{dN}{dt} = \frac{n_1 n_2 f \sigma}{S}$$

I fasci sono raggruppati in pacchetti (bunch), con n_1, n_2 numero particelle nei bunch dei fasci di area S , f è la frequenza delle collisioni dei due bunches

$$L = \frac{n_1 n_2 f}{S}$$

Luminosità
Si misura in $cm^{-2}s^{-1}$

σ è la sezione d'urto del processo considerato
Quindi il numero di eventi del processo prodotti sarà

$$N = \int dN = \int n_2 n_1 f \sigma / S dt = \sigma \int L dt$$

LUMINOSITÀ DI UN ACCELERATORE CIRCOLARE

$$N = \int dN = \int n_2 n_1 f \sigma / S dt = \sigma \int L dt$$

Luminosità Integrata

La luminosità integrata è l'inverso di una sezione d'urto si misura in
 $nb^{-1}, pb^{-1}, fb^{-1} \dots$

Se in un esperimento, si misurano N eventi, nota la luminosità integrata la sezione d'urto è

$$\sigma = \frac{N}{\epsilon \int L dt}$$

dove ϵ è l'efficienza del nostro esperimento (ricostruzione delle particelle per esempio)

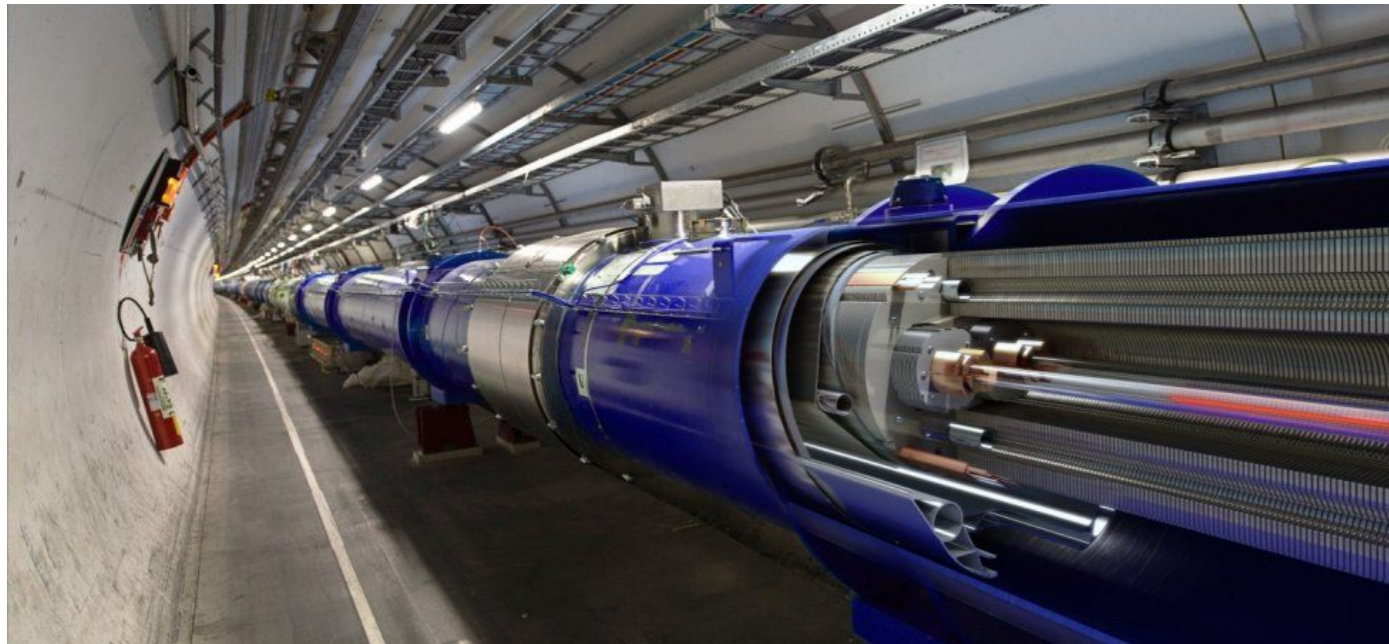
Per esempio, nel *Run 2* di LHC, durato circa 5 anni, si sono raccolti $\sim 140 fb^{-1}$ di dati

UN ESEMPIO NEL PRESENTE

il Large Hadron Collider (LHC)

CERN (2010-2030)

10k
scienziati
100 paesi



fasci di protoni accelerati a $\sqrt{s} = 13.6$ TeV nel centro di massa ~ 100 m sotto terra

3000 pacchetti da ~ 115 miliardi di protoni ciascuno collidono ogni 25 ns

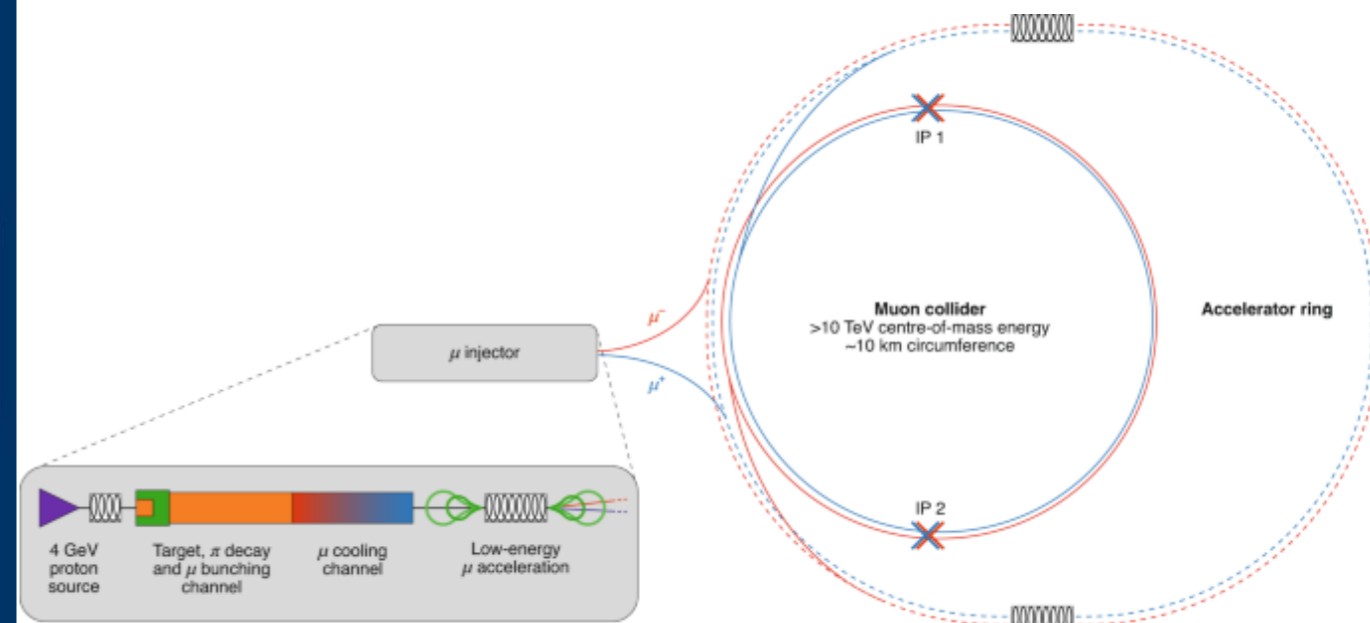
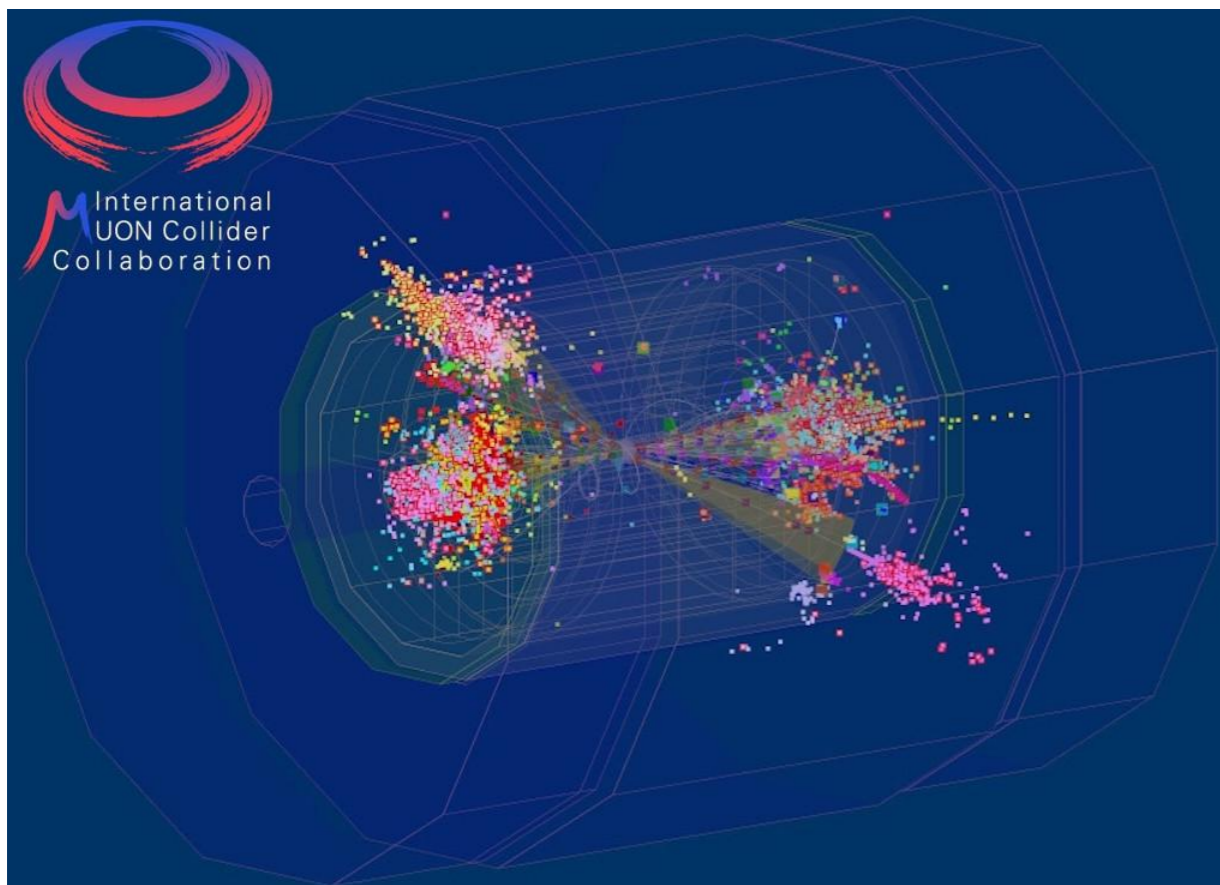
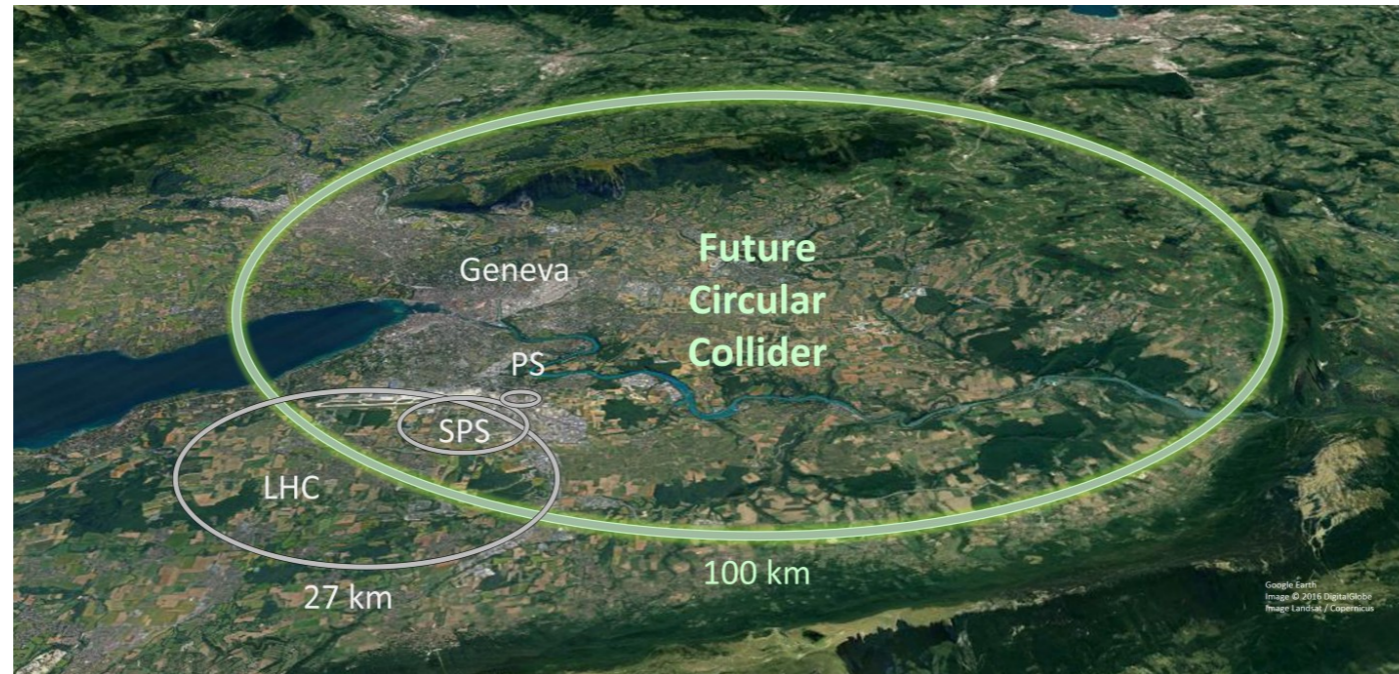
10000 magneti superconduttori, 96 tonnellate di He4 superfluido fatti in NiTi, operano a 1.9 K (-272 gradi)

4 punti di collisione dove sono installati 4 grandi rivelatori di particelle

DUE ESEMPI DEL FUTURO

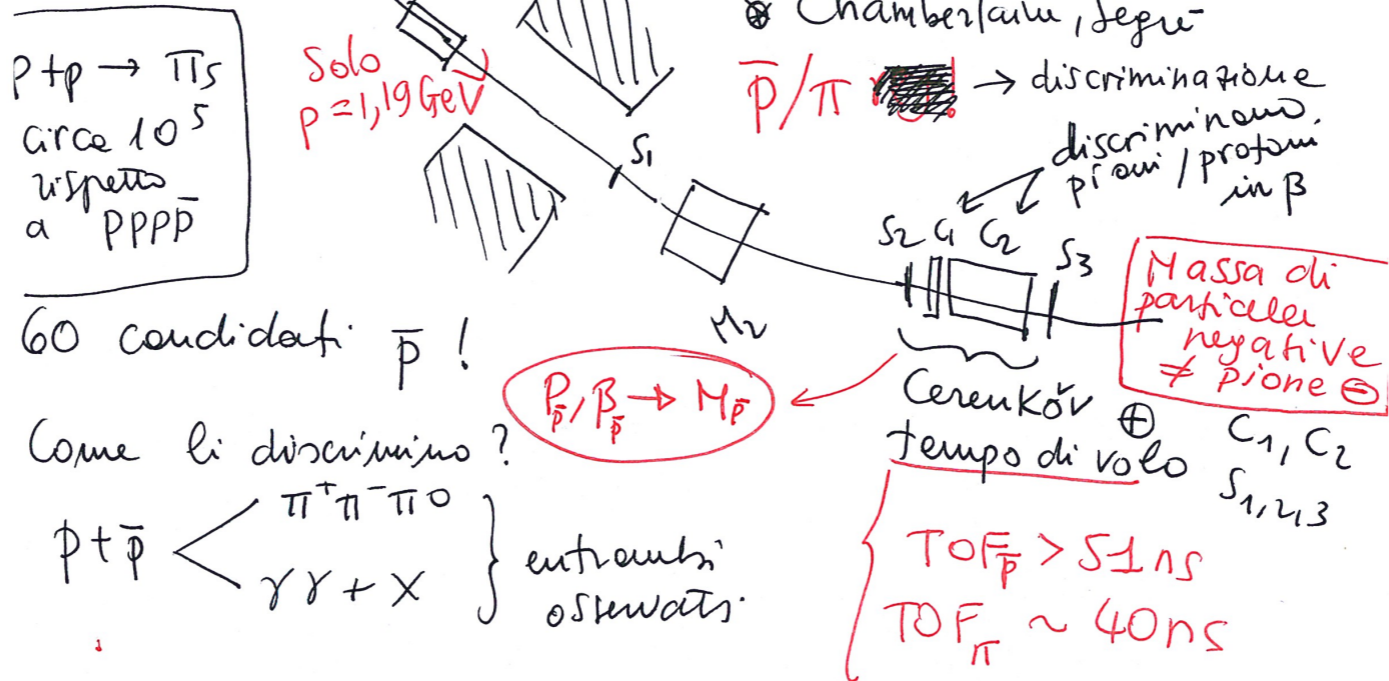
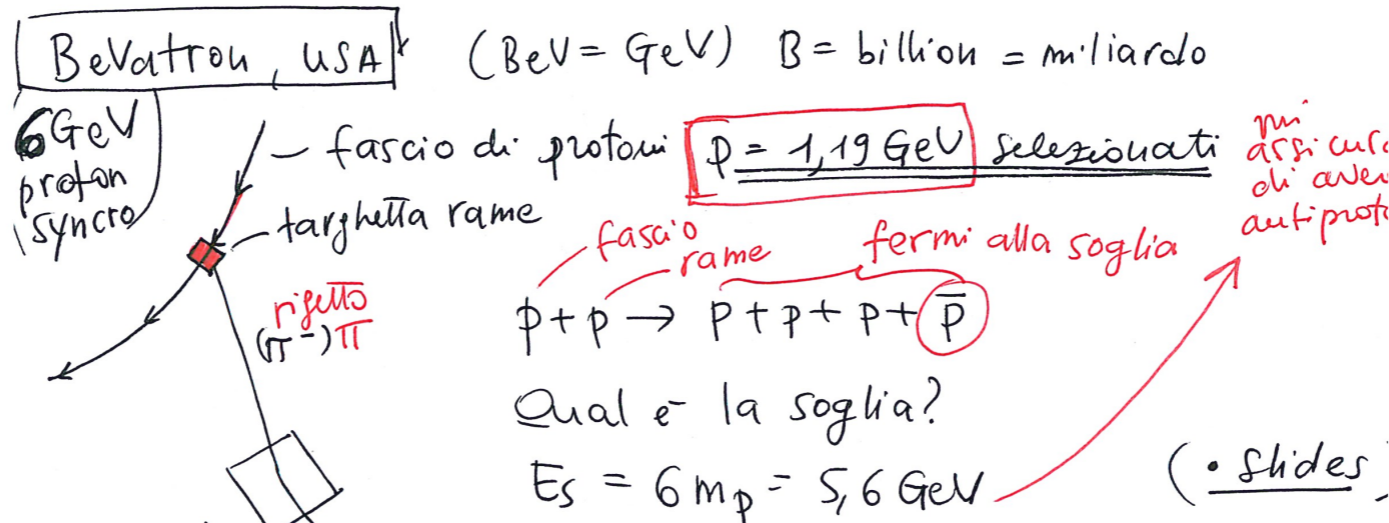
FCC-ee & Muon Collider

~2050

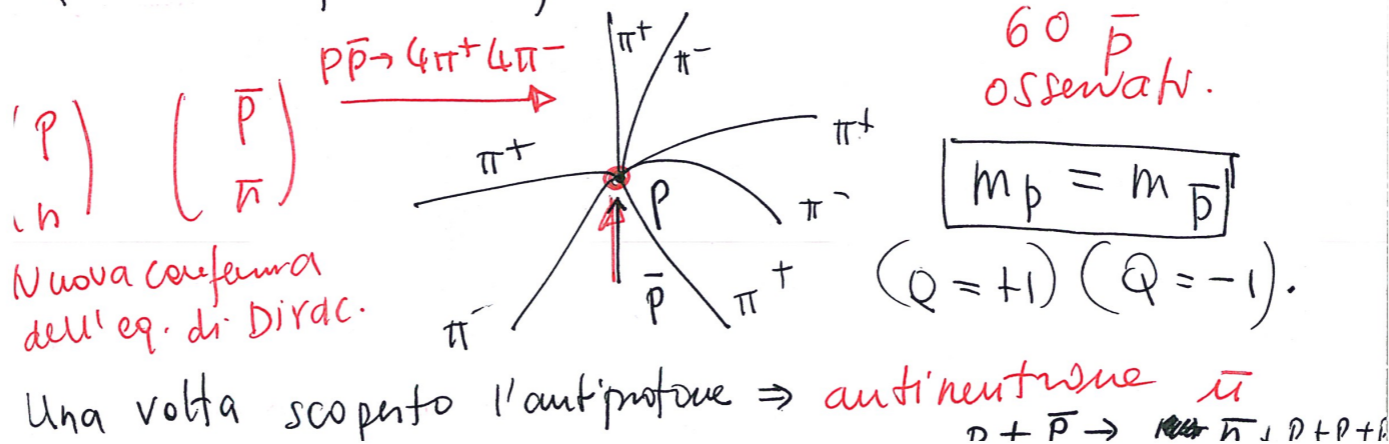


LA SCOPERTA DELL'ANTIPIOTONE (1995)

5



Grate alle emulsioni posso scoprire se ho davvero fatto un \bar{p} : antiproton "stars":



$$p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$$

$$Q = 2 \quad Q = 1 + 1 + 1 - 1$$

$$\underbrace{(P_1 + P_2)^2}_{\text{stato iniziale}} = \underbrace{\left(\sum m_p\right)^2}_{\text{stato finale prodotti fermi}} = \left(4m_p\right)^2 = 16m_p^2$$

stato
iniziale

stato finale
prodotti fermi

$$\vec{p} = 0 \Rightarrow E^2 = m^2$$

$$m_p^2 + m_p^2 + 2E_1^* m_p = 16m_p^2 \Rightarrow E_1^* = \frac{14m_p^2}{2m_p} = 7m_p = 6.56 \text{ GeV}$$

(bisogno fermi $\vec{p} = 0$)

soglia

• Ma $E_{\text{Bevatron}} = 6 \text{ GeV}$, minore di E_1^* . Come possibile?

→ Il bisogno fisso di avere non ha davvero $\vec{p} = 0$ in questo contribuisce il momento di fermi intrinseco \vec{p}_F !

Facoltativo

$$N = \frac{V p_F^3}{3\pi^2 \hbar^3}$$

$$\left(du = (2s+1) \frac{4\pi p^2 dp V}{(2\pi \hbar)^3} \right)$$

$s = 1/2$
 $\int p dp$

~~R~~

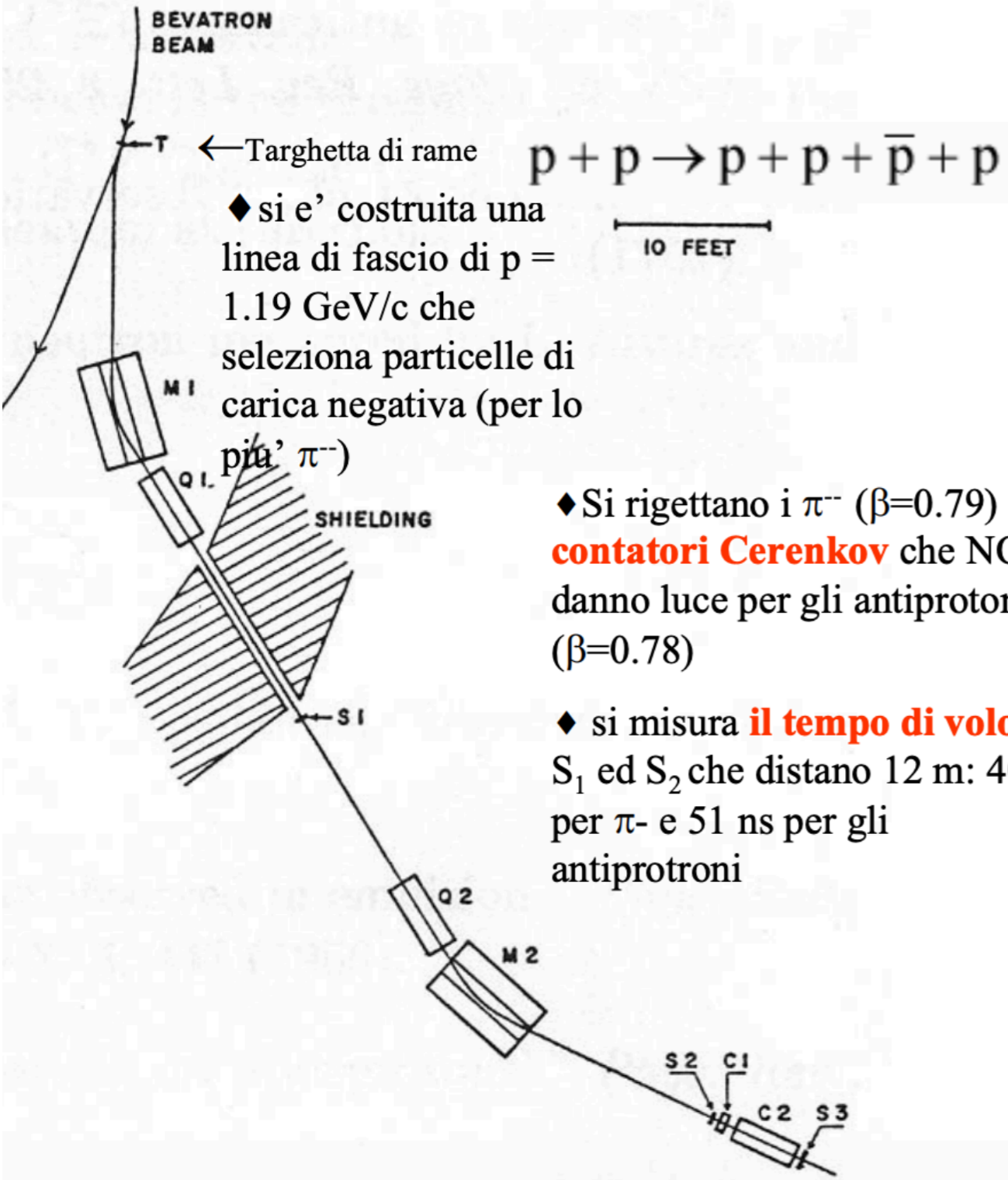
$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \cdot A$$

$$R_0 \sim 1.21 \text{ fm}$$

$$p_F = \frac{\hbar}{R_0} \left(\frac{9}{8} \pi \right)^{1/3} \approx 250 \text{ MeV} \quad ; \quad E_F = \frac{p_F^2}{2m} \approx 33 \text{ MeV}$$

LA SCOPERTA DELL' ANTIPROTONE

“Bevatron”: 6 GeV proton synchrotron in Berkeley



◆ si e' costruita una linea di fascio di $p = 1.19 \text{ GeV}/c$ che seleziona particelle di carica negativa (per lo più π^-)

◆ Si rigettano i π^- ($\beta=0.79$) con **contatori Cerenkov** che NON danno luce per gli antiprotoni ($\beta=0.78$)

◆ si misura **il tempo di volo** tra S_1 ed S_2 che distano 12 m: 40 ns per π^- e 51 ns per gli antiprotoni

FIG. 1. Diagram of experimental arrangement.

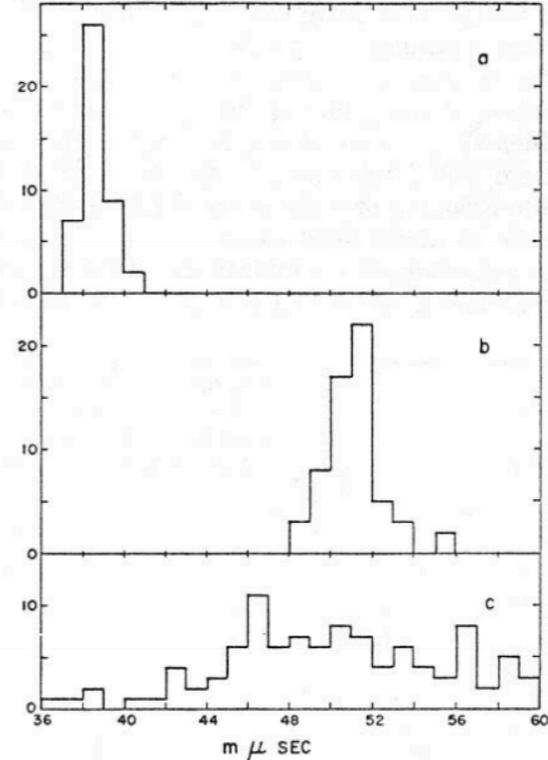
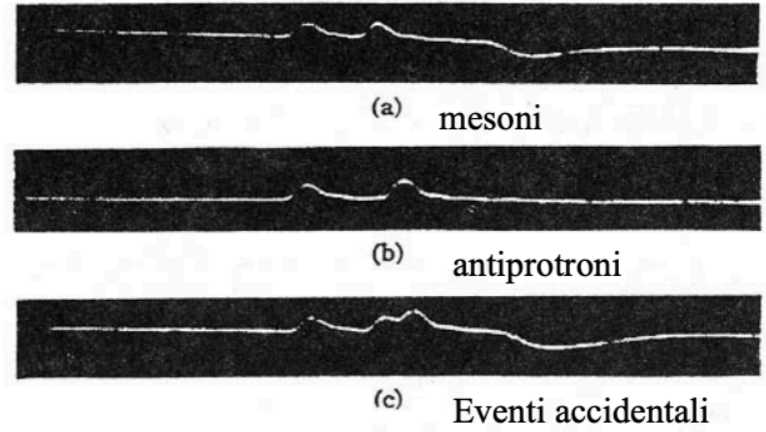


FIG. 3. (a) Histogram of meson flight times used for calibration. Histogram of antiproton flight times. (c) Apparent flight times of a representative group of accidental coincidences. Times shown are in units of 10^{-9} sec. The ordinates show the number of events in each 10^{-10} -sec intervals.

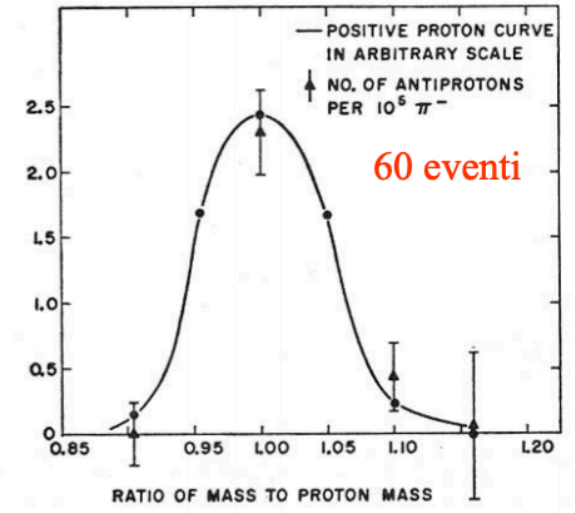


FIG. 4. The solid curve represents the mass resolution of the apparatus as obtained with protons. Also shown are the experimental points obtained with antiprotons.

LA SCOPERTA DELL' ANTIPROTONE

Bevatron, Lawrence Berkeley Labs (USA)

La "stella" dell' antiprotone nelle emulsioni nucleari

