

l'eq. di Dirac e l'antimateria

alla ricerca di una equazione quantistica e relativistica

Eq. di Klein-Gordon

vale per le particelle di spin intero, i bosoni

Eq. di Dirac

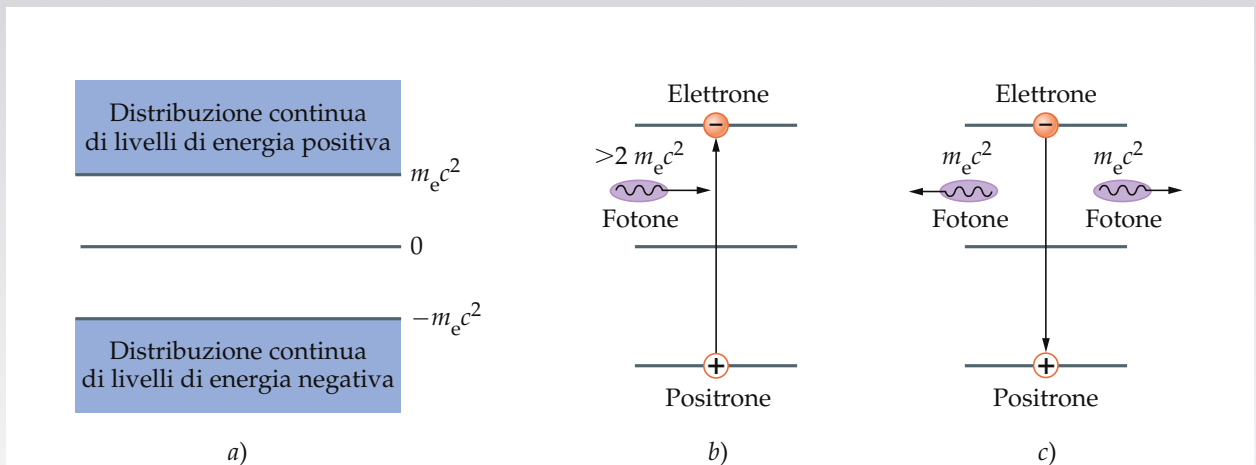
vale per le particelle di spin semintero, i fermioni

L'eq. di Dirac ammette sempre 2 soluzioni, una ad energia positiva ed una ad energia negativa. Che cosa vuol dire!?

La teoria di Dirac

il vuoto è "pieno" di coppie e^+e^- , che non percepiamo perché hanno energie negative

l'energia di un fotone può estrarre un elettrone dal vuoto, lasciando una lacuna (che si manifesta come una carica positiva)



Produzione di coppie di fermioni

$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ questa reazione non è possibile:
il fotone ha impulso in eccesso

$\gamma + A \rightarrow e^+ + e^- + A$ in questo caso il nucleo assorbe
impulso senza assorbire energia

energia di soglia: $E_\gamma > 2m_e c^2 \simeq 1 \text{ MeV}$

Lo studio dei raggi cosmici

Le particelle cariche interagiscono con gli elettroni presenti negli atomi e molecole della materia ionizzandoli

L'effetto può essere osservato in prossimità delle sorgenti radioattive, ma è sempre presente in un gas, oltre quanto ci si può aspettare dalla radioattività naturale

Hess (1912), con elettrometri montati su palloni aereostatici, scopre che la ionizzazione cresce in funzione dell'altitudine

Oggi sappiamo che i raggi cosmici primari sono per lo più protoni, che interagendo con gli alti strati dell'atmosfera producono particelle secondarie (sciame di particelle).

Sulla superficie terrestre arrivano per lo più muoni ed elettroni

Camera a nebbia

La camera a nebbia (o di Wilson) è un cilindro sottile, riempito da un gas soprasaturo

Nella camera a nebbia le particelle cariche, ionizzando il gas, lasciano una striscia di goccioline lungo la loro traiettoria, che può venir fotografata

Un intenso campo magnetico può deflettere le particelle elettricamente cariche, con raggi di curvatura che dipendono, oltre che dalla carica (col suo segno) e dall'intensità del campo magnetico, dalla loro quantità di moto

La curvatura è maggiore per particelle lente o leggere, minore per quelle veloci o pesanti.



Spettrometro magnetico

$$F_L = qvB$$

$$f = ma = m \frac{v^2}{r}$$

$$\frac{mv}{r} = qB$$

$$p = qBr$$

La scoperta del positrone

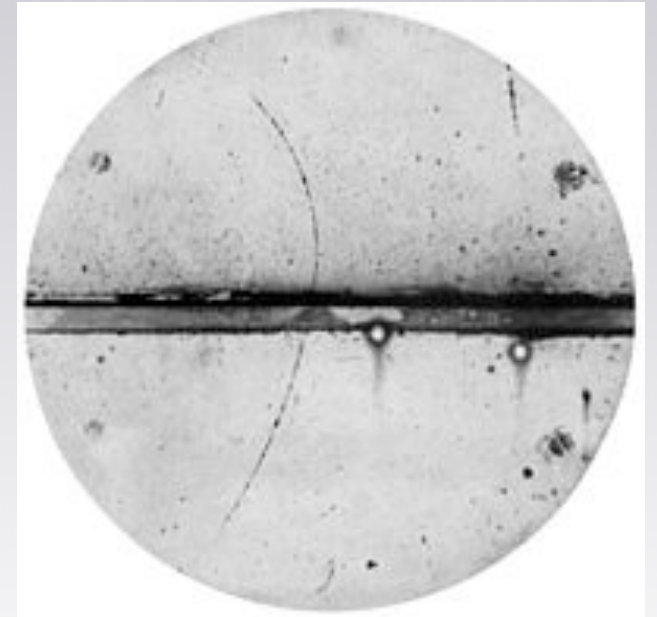
Millikan e il suo allievo Anderson studiano la composizione dei raggi cosmici con una camera a nebbia, individuando un numero quasi uguale di tracce positive e negative

Poche di quelle positive possono essere identificate come protoni (che a parità di impulso avrebbero una velocità molto minore, perdendo più energia)

Le tracce apparentemente positive potrebbero però essere particelle negative provenienti dal basso

Anderson realizza una camera a nebbia nella quale inserisce una lastra di piombo

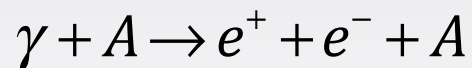
L'evento fotografato, pubblicato nel 1933, dimostra l'esistenza dell'antiparticella dell'elettrone e questa particella viene dal basso!



Gli sciami elettromagnetici

Blackett e Occhialini ancor prima di Anderson avevano osservato la formazione di coppie in uno sciame elettromagnetico già dal 1932, usando la tecnica del trigger, inventata da Bruno Rossi nel 1930, per la camera a nebbia

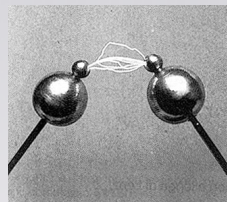
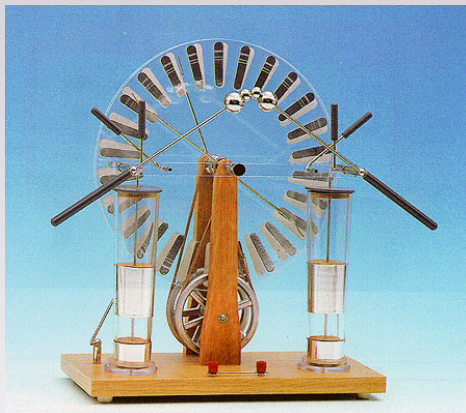
Nel 1933, subito dopo l'articolo di Anderson, pubblicano l'interpretazione corretta del meccanismo di produzione delle coppie secondo la teoria di Dirac



Acceleratori di particelle

La tecnica standard per accelerare particelle cariche consiste nel farle passare attraverso una differenza di potenziale: $E = qV$

Alte differenze di potenziale possono essere ottenute con macchine elettrostatiche



Macchina di
Whimshurst

Macchina di
Van der Graaf

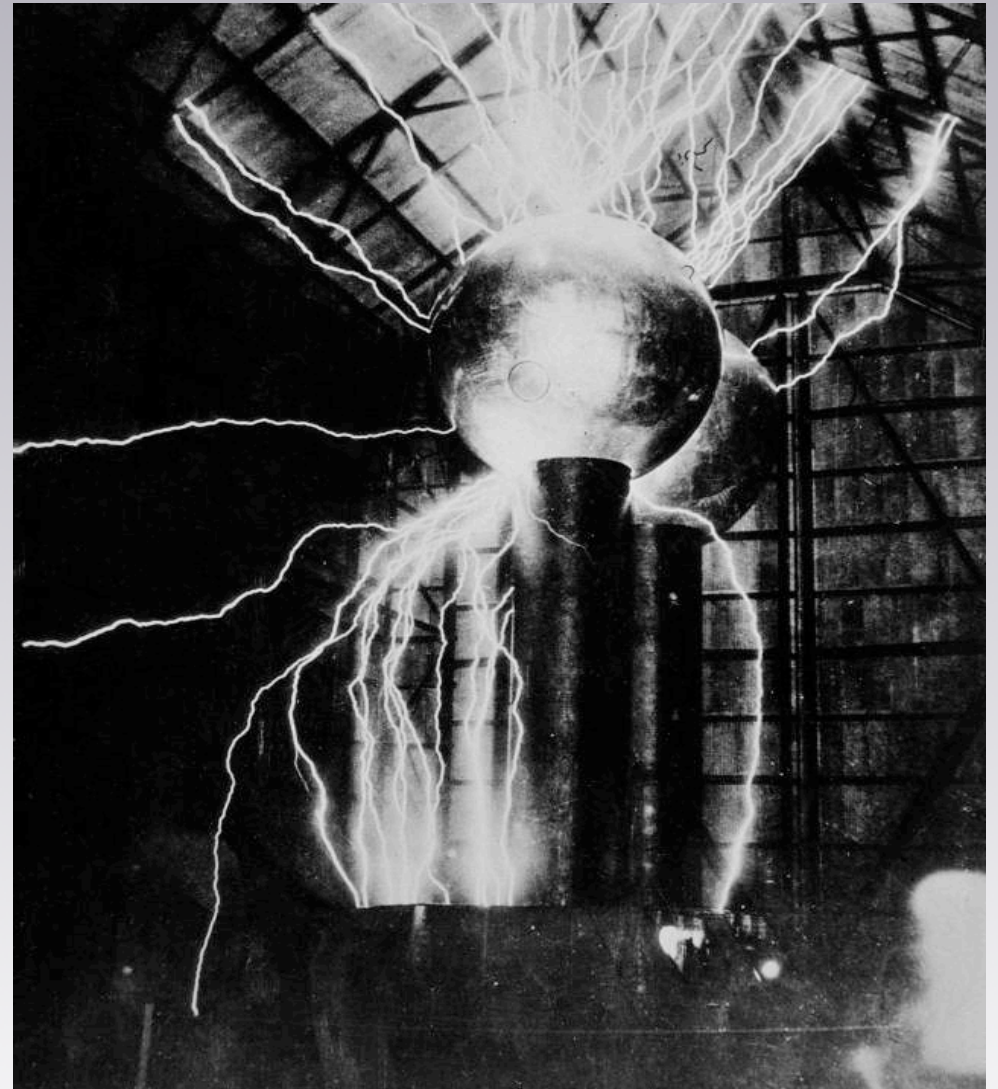


Macchine elettrostatiche

Il limite delle macchine elettrostatiche è la rigidità dielettrica dell'aria

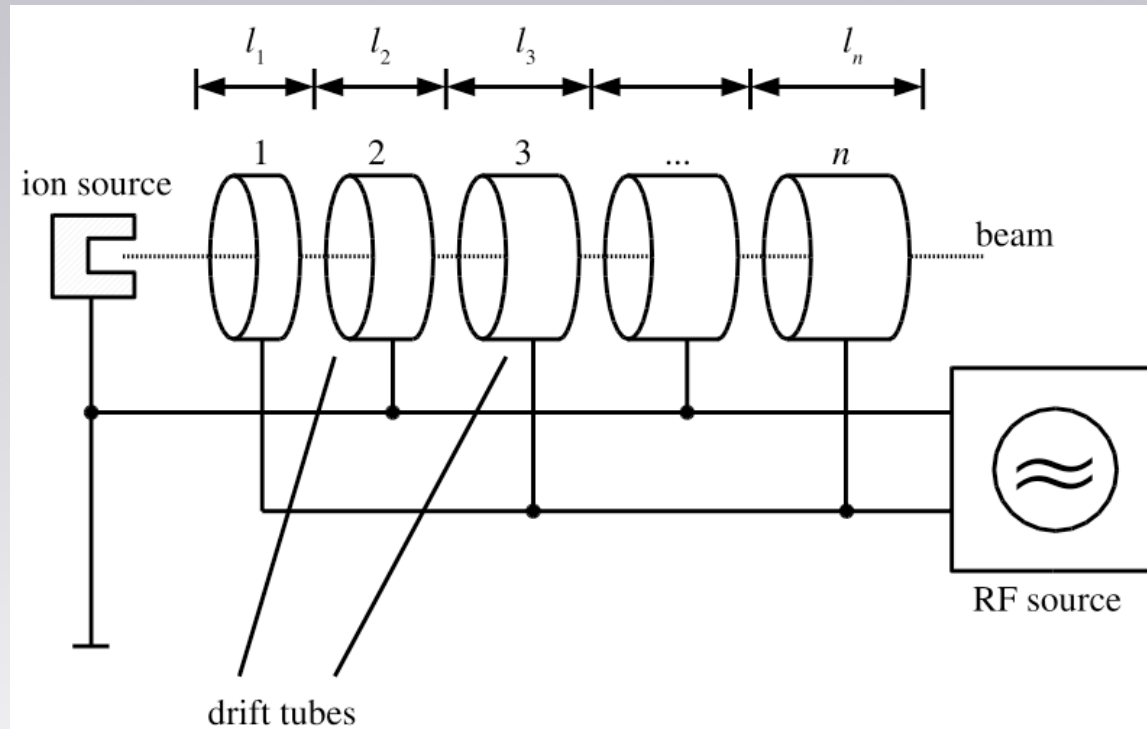
Con raggi dell'ordine del metro, si possono raggiungere energie superiori al milione di eV

Si può far passare più volte la stessa particella attraverso una serie di differenze di potenziale?



Acceleratori di particelle (2)

Acceleratore lineare di Wideroe



Ciclotrone (Lawrence, 1929)

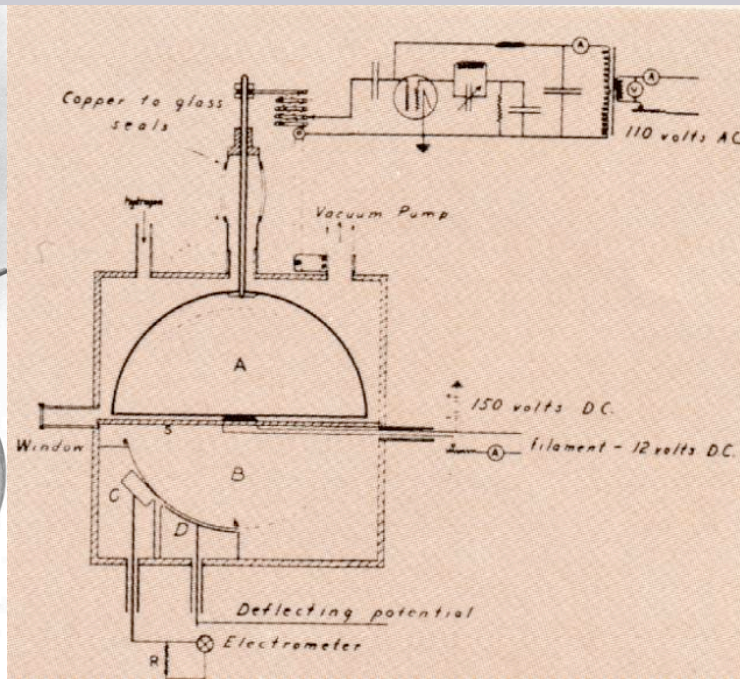
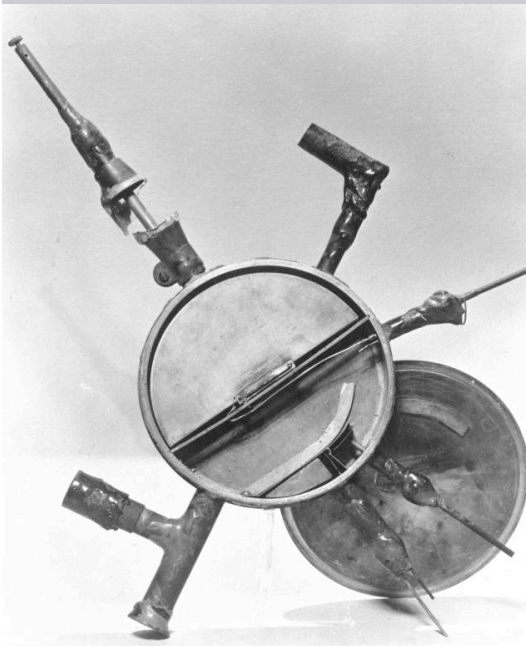
Particella in moto in campo magnetico
orbita circolare

$$F_L = qvB$$

$$f = ma = m \frac{v^2}{r}$$

$$\frac{mv}{r} = qB$$

$$p = qBr$$



$$t = \frac{\pi r}{v} = \pi \frac{p}{qBv} = \pi \frac{mv}{qBv} = \pi \frac{m}{qB}$$

sincrotrone

la sincronizzazione del ciclotrone funziona finché la particella non è relativistica $p = mv$

quando la particella diventa relativistica $p = \gamma mv$

$$t = \pi \frac{\gamma mv}{qBv} = \pi \frac{\gamma m}{qB} \neq \text{costante}$$

a meno che $B = B_0 \gamma$

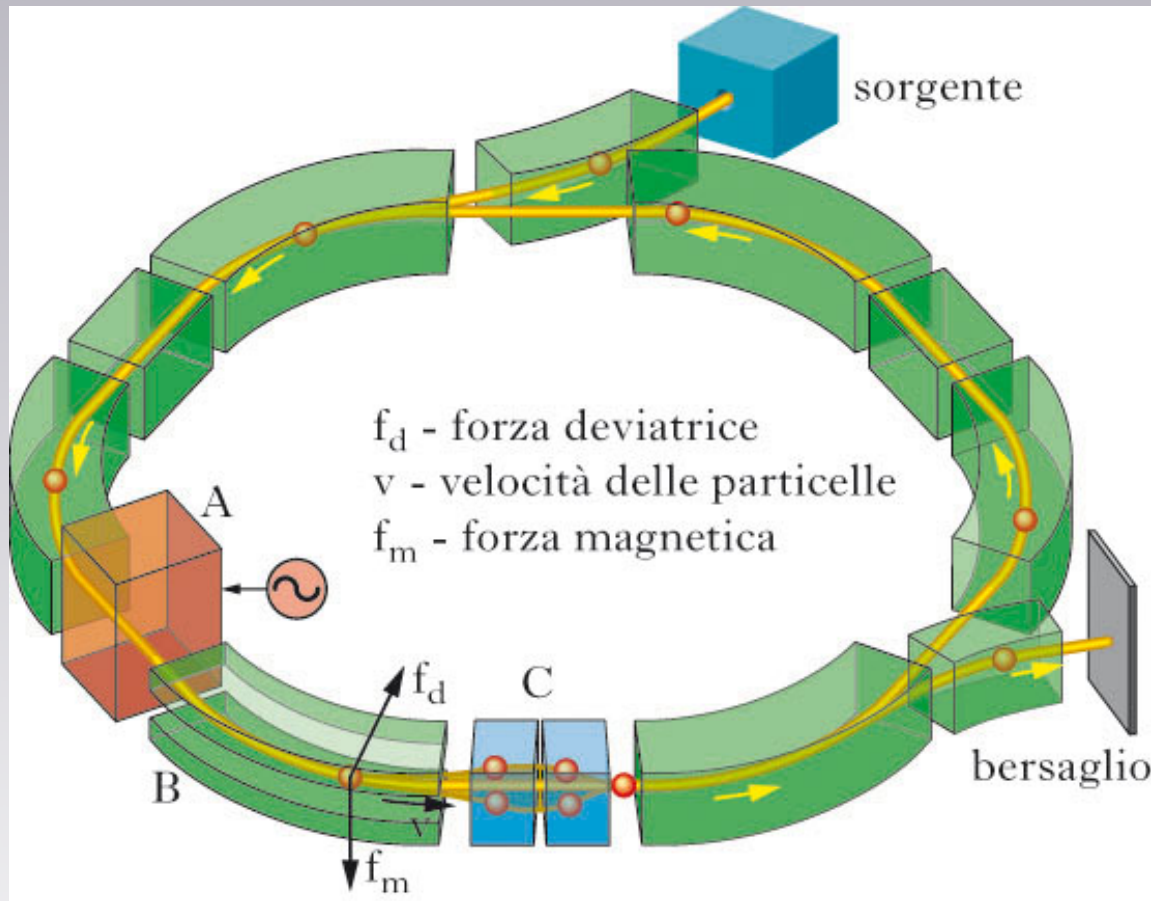
$$t = \pi \frac{\gamma m}{qB_0 \gamma} = \pi \frac{m}{qB_0} = \text{costante}$$

Il campo B è sincronizzato con l'impulso

Inoltre quando la velocità si avvicina a c,

il raggio diventa costante: $p = qBr \Rightarrow r = \frac{p}{qB} = \frac{\gamma mv}{qB_0 \gamma} = \frac{mv}{qB_0} \simeq \frac{mc}{qB_0}$

Sincrotrone



In un sincrotrone il campo magnetico può essere distribuito solo lungo la traiettoria, permettendo la realizzazione di macchine di grandi dimensioni (e di grande energia)

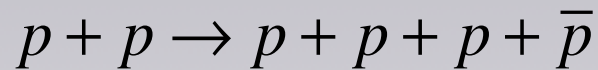
Agli inizi degli anni 50 si costruiscono sincrotroni per protoni con energie superiori al GeV

Negli anni 50, l'INFN realizza a Frascati il primo elettrosincrotrone italiano, che accelera elettroni fin quasi a 1000 MeV

Produzione di antiprotoni

A Berkeley, il Bevatron può accelerare protoni fino ad oltre 6 GeV

Fascio di protoni su protone fermo

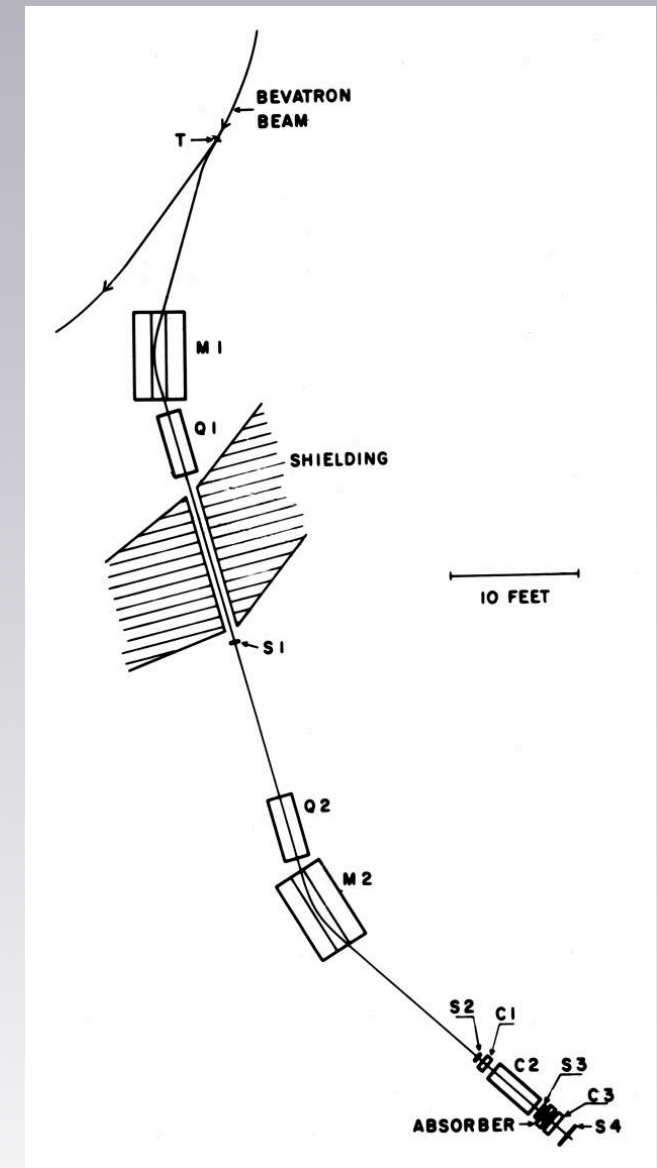


uguagliando la massa invariante prima e dopo la reazione:

$$(4m_p c)^2 = (E_p + m_p c^2)^2 - p_p^2 c^2 = 2m_p c^2 E_p + 2(m_p c^2)^2$$

$$E_p = \frac{16m_p^2 - 2m_p^2}{2m_p} c^2 = 7m_p c^2 \approx 6.5 \text{ GeV}$$

antiprotone
Segré e Chamberlain (1955)



L'antimateria in natura e in laboratorio

La produzione di antimateria fermionica in laboratorio rispetta perfettamente le predizioni dell'eq. di Dirac.

La produzione avviene sempre in una coppia particella-antiparticella: non c'è praticamente nulla da fare, nel momento in cui l'energia è sufficiente la coppia si materializza come predetto da Dirac.

Negli ultimi anni sono stati assemblati interi atomi: nel 2002 al CERN sono stati prodotti i primi antiatomi di idrogeno (e ormai ne sono stati prodotti a milioni!)

Tuttavia in natura questa simmetria è palesemente e assolutamente violata: tutto l'universo conosciuto è fatto di materia!