

Note all'articolo sulla scoperta dell'antiprotone

Nota 1

1 Bev (Billion-elettron-volt) = 1 GeV (Giga-elettron-Volt) :

da questo deriva il nome "Bevatron" per il sincrotrone a Brookhaven che accelerava protoni fino a 6.5 GeV di energia (prima fase di operazione).

La soglia in energia per la produzione di antiprotoni nell'interazione di un **protone su nucleone** $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$ (o $p + n \rightarrow p + n + p + \bar{p}$) è data da

$(E + m)^2 - (E^2 - m^2) \geq (4m)^2$, dove E è l'energia totale del protone incidente ed m la massa di un nucleone. Quindi $E \geq 7m$ e $T = E - m \geq 6m = 5.6 \text{ GeV}$

Se fosse possibile realizzare la reazione $p + A \rightarrow p + A + p + \bar{p}$, dove A è un nucleo di massa M_A che restasse invariato (i.e. non si dissociasse in due o più frammenti o nucleoni) nella reazione, la soglia si abbasserebbe al valore $T \geq 2m + 4m^2 / M_A$. Nel caso del ${}^{63}_{29}\text{Cu}$ (rame) si avrebbe $T \geq 1.94 \text{ GeV}$, decisamente molto favorevole.

Tuttavia questo processo non si realizza in pratica, perchè per questo valore dell'energia del protone incidente, il nucleo di rame riceverebbe un impulso trasferito:

$$q^2 = (M_A \gamma - M_A)^2 - M_A^2 \beta^2 \gamma^2 = 2M_A^2 (1 - \gamma) \text{ dove } \beta, \gamma \text{ si riferiscono al centro di massa.}$$

Poichè alla soglia $\gamma = \frac{E + M_A}{3m + M_A} = 1 + \frac{4m^2}{M_A(3m + M_A)}$, si ha che $q^2 = \frac{-8M_A m^2}{3m + M_A} \approx -6.7 \text{ GeV}^2$, da

cui $\sqrt{|q^2|} = 2.6 \text{ GeV} / c$: questo è un valore molto maggiore dell'**impulso di Fermi** ($p_f \sim 200 \text{ MeV}/c$) ed **il nucleo si romperebbe**.

Nota 2

L'energia di Fermi è $T_f = \frac{p_f^2}{2m}$; nell'articolo è stimata essere 25 MeV , da cui

$$p_f = \sqrt{2mT_f} \sim 216 \text{ MeV} / c$$

Nota 3

Nella situazione più favorevole, quella in cui il nucleone si muove contro il protone incidente, il quadrimpulso totale è $P_{tot} = \left(E + m + T_f, \sqrt{E^2 - m^2} - p_f, 0, 0 \right)$. Allora

$$s = P_{tot}^2 = 2mE + 2ET_f + 2p_f\sqrt{E^2 - m^2} + 2m^2 + T_f^2 \approx 2mE + 2ET_f + 2p_fE + 2m^2 \text{ e l'energia di soglia verifica}$$

$$s = 2mE + 2ET_f + 2p_fE + 2m^2 \geq (4m)^2, \text{ da cui } T = E - m \geq \frac{7m^2}{m + p_f} - m \approx 4.7 \text{ GeV} \text{ è}$$

Nota 4

Come detto nel corso, la misura della massa di una particella ("particle identification") è possibile misurando in modo indipendente quantità di moto e velocità, poichè

$$m\gamma = |\vec{p}| \Rightarrow m = \frac{|\vec{p}| \cdot \sqrt{1 - \beta^2}}{\beta}$$

Nota 5

Il "fondo di pioni", i.e. il rapporto tra pioni negativi ed antiprotoni prodotti, non era conosciuto all'epoca; in seguito a quelle misure (ed alle successive) risulterà che

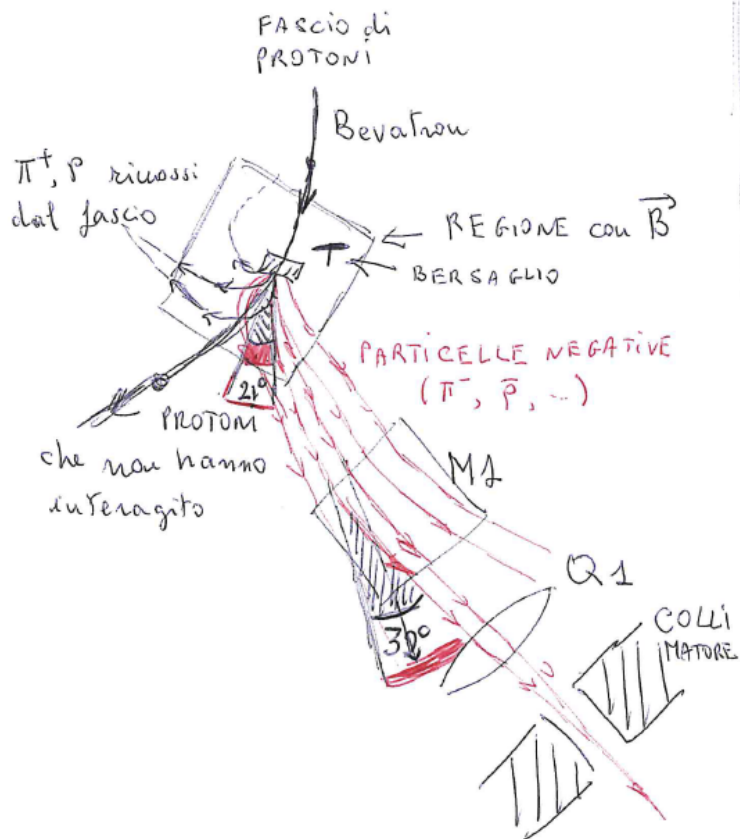
$$\sigma(p\text{Cu} \rightarrow \pi^- \text{ anything}) \approx 10^5 \sigma(p\text{Cu} \rightarrow \bar{p} \text{ anything})$$

Un fondo così grande richiede un forte "potere di reiezione", che aumenta effettuando le misure della velocità e dell'impulso nel maggior numero possibile di modi e con tecniche indipendenti. In questo caso l'impulso viene misurato con un campo magnetico ed un sistema di collimatori (un unico modo), mentre la velocità viene misurata in due modi indipendenti: tempo di volo e Cherenkov.

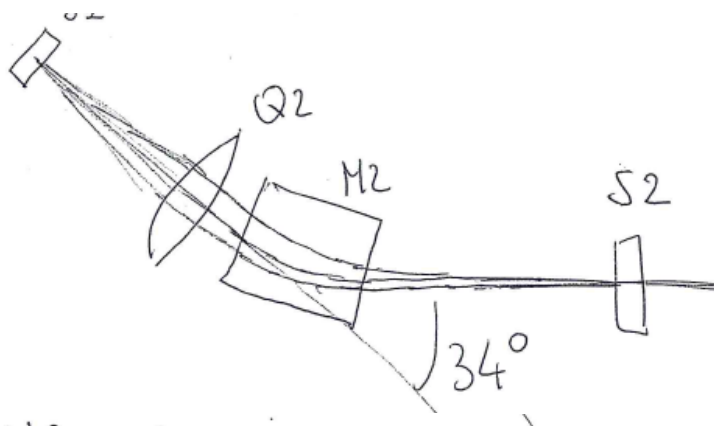
Nota 6

Le particelle sono prodotte prevalentemente in avanti ed hanno differenti quantità di moto, ma nel caso della produzione di un antiprotone vicino alla soglia di reazione (vedi nota 3) la loro quantità di moto è molto vicina a $1.2 \text{ GeV}/c$.

Il campo magnetico del Bevatron, presente anche nella regione del bersaglio, ed un collimatore (una apertura nello schermo "shielding", selezionano particelle negative con quantità di moto media di $1.19 \text{ GeV}/c$.



Nota 7

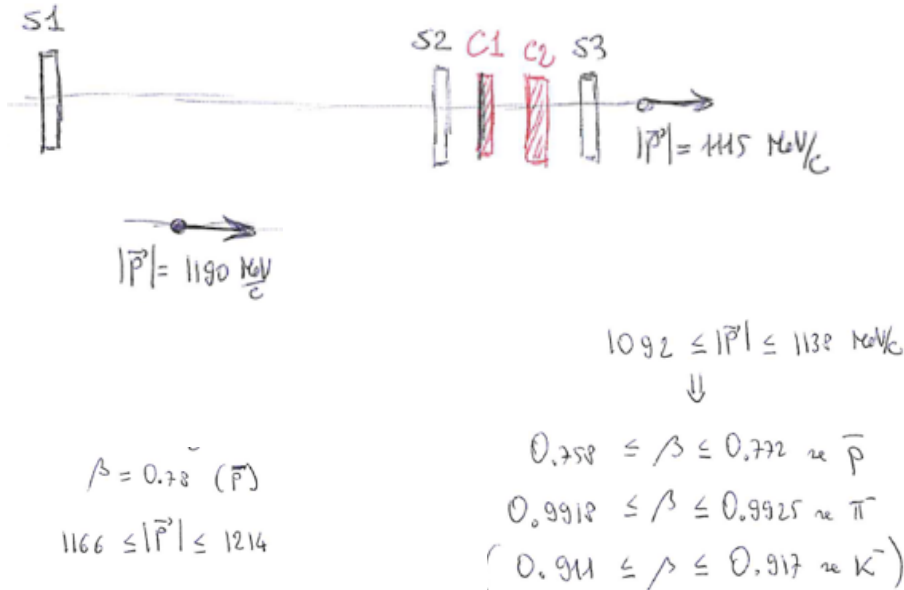


M2 rimuove l'alone dovuto al
 loss che entra il collimatore

Nota 8

$$|\Delta \vec{p}| = |\vec{p}| \cdot 2\% \approx 24 \text{ MeV} \Rightarrow |1.166 \leq |\vec{p}| \leq 1.214 \frac{\text{MeV}}{c}|$$

Nota 9



Domanda: la differenza $1190-1115=75 \text{ MeV}/c$ è compatibile con la perdita di energia, per un antiprotone in S2, C1 e C2? Sì, vedere il calcolo seguente.

La differenza in energia è $\Delta E = \sqrt{p_f^2 + m^2} - \sqrt{p_i^2 + m^2}$, quindi per un antiprotone ci

aspettiamo di trovare: $\Delta E_{\bar{p}} = \sqrt{1190^2 + 938^2} - \sqrt{1115^2 + 938^2} = 58 \text{ MeV}$.

Procediamo a stimare la perdita di energia sulla base della conoscenza dei materiali attraversati. Effettueremo il calcolo anche per i pioni. Il fattore $\beta\gamma$, trascurando la piccola variazione di quantità di moto è: $\beta\gamma_{\bar{p}} \approx \frac{1190}{938} \approx 1.27$, $\beta\gamma_{\pi} \approx \frac{1190}{140} \approx 8.5$. Con questi dati possiamo ottenere dalle tabelle e grafici nei database usuali, gli stopping power (perdite di energia per unità di lunghezza), mentre dalla tabella I dell'articolo abbiamo densità e spessori dei materiali:

- in S2, materiale plastico: $\frac{dE_{\min}}{dx} \approx 1.94 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$, $\frac{dE_{\bar{p}}}{dx} \approx 2.5 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$, $\frac{dE_{\pi}}{dx} \approx 2.1 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$,

$$\rho \approx 1.5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}, \Delta x = 0.62'' = 1.57 \text{ cm}$$

- in C1, materiale $C_8F_{16}O$: $\frac{dE_{\min}}{dx} \approx 1.95 \frac{MeV}{g/cm^2}$, $\frac{dE_{\bar{p}}}{dx} \approx 2.5 \frac{MeV}{g/cm^2}$, $\frac{dE_{\pi}}{dx} \approx 2.1 \frac{MeV}{g/cm^2}$,

$$\rho = 1.76 \frac{g}{cm^3}, \Delta x = 2" = 5.08 cm$$

- in C2, materiale quarzo: $\frac{dE_{\min}}{dx} \approx 1.70 \frac{MeV}{g/cm^2}$, $\frac{dE_{\bar{p}}}{dx} \approx 2.21 \frac{MeV}{g/cm^2}$, $\frac{dE_{\pi}}{dx} \approx 1.86 \frac{MeV}{g/cm^2}$,

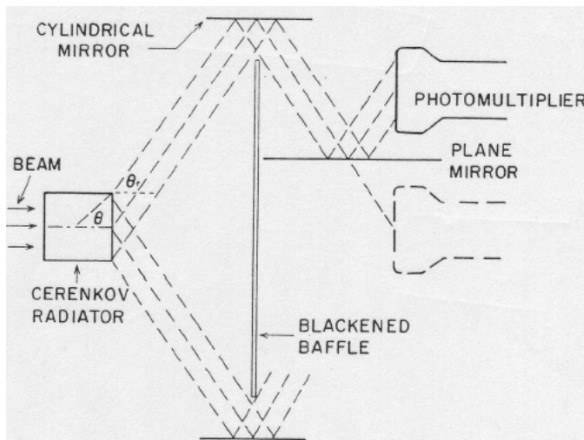
$$\rho = 2.2 \frac{g}{cm^3}, \Delta x = 2.5" = 6.26 cm$$

Effettuando le semplici moltiplicazioni $\Delta E = \sum_{S2, C1, C2} \left(\frac{dE}{dx} \cdot \rho \cdot \Delta x \right)$ troviamo:

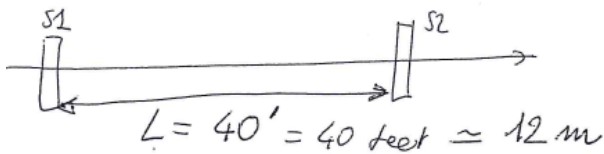
$\Delta E_{\bar{p}} \approx 58 MeV$ in ottimo accordo con il dato dell'articolo, e $\Delta E_{\pi} \approx 49 MeV$, che implica che la quantità di moto finale del pione sia circa $1140 MeV/c$.

Nota 10

Notare come **C1** sia sensibile solo a π o K , mentre **C2** solo a protoni, con il suo disegno particolare a base di schermi e specchi:



Nota 11

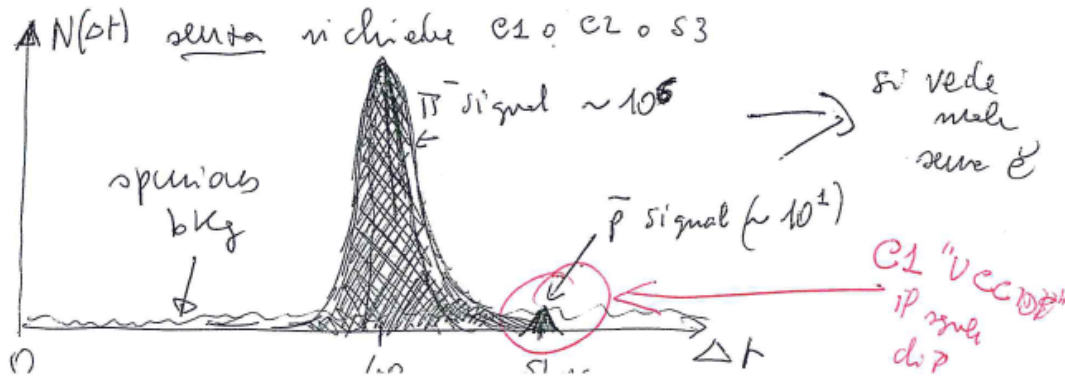


$$\Delta t = \begin{cases} 40 \text{ ns} & \text{se } |\vec{p}| = 1.19 \text{ GeV} \text{ e } m = m_{\pi} \\ 51 \text{ ns} & \text{se } \quad \quad \quad \quad \quad m = m_p \end{cases}$$

↑ "millimicroseconds"

Nota 12

Utilizzando il solo tempo di volo si osserverebbe una distribuzione del tipo seguente, in cui il piccolo numero di antiprotoni non si potrebbe evidenziare dal fondo di pioni (a meno di una mole di dati raccolti estremamente cospicua)



Nota 13

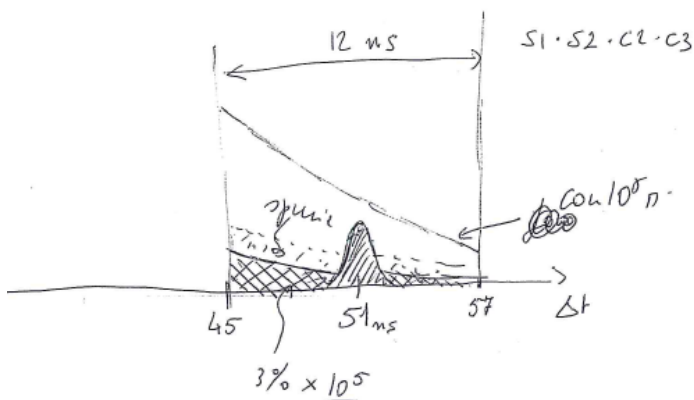
Per ridurre il fondo viene richiesta la coincidenza

$$S1 * S2 * \textcircled{C2} * S3$$

entro un tempo di $6ns$.

Nota 14

Ci si aspetta che la coincidenza precedente riduca molto il fondo, rendendo possibile l'identificazione degli antiprotoni, come in figura. Gli autori dichiarano che comunque il 3% dei pioni attiva il rivelatore C2 per interazioni nel materiale lungo la linea del fascio.

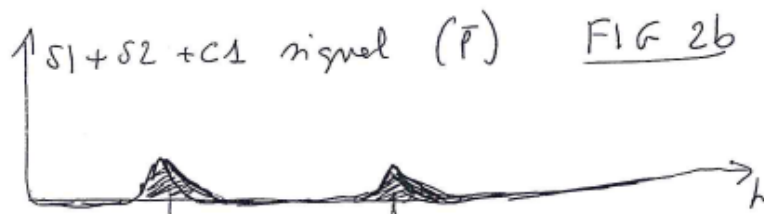
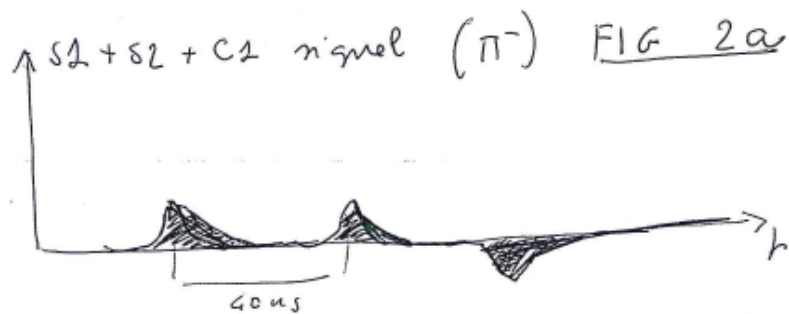
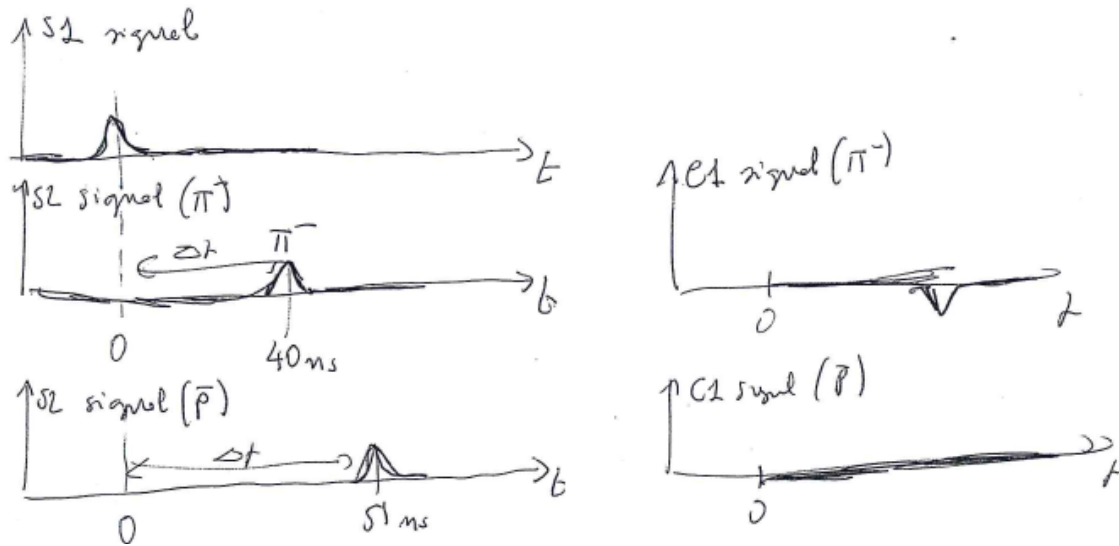


Nota 15

Utilizzare la tabella I per i parametri dei vari rivelatori: spessori, densità, indice di rifrazione.

Nota 16

Segnali caratteristici per pioni e antiprotoni. Il contatore C1 ridurrà ulteriormente il fondo identificando in modo positivo i pioni, per cui il fondo del 3% è ulteriormente rigettato.



Nota 17

Con l'inserimento finale di C1 si riducono tutti i fondi e si trova il segnale di **figura 3b** di puri **antiprotoni** con la sequenza $S1 * S2 * S3 * \overline{C1} * C2$.

In **figura 3a** il segnale di puri **pioni** con la sequenza $S1 * S2 * S3 * C1 * \overline{C2}$.

Nota 18

Da questo punto la lettura dell'articolo è facoltativa