

La misura dell'energia dei fasci a LEP: Il metodo della Depolarizzazione Risonante.

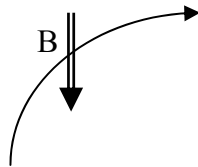
L'equazione che determina l'energia dei fasci ad un collider e':

$$E_{beam} = \oint B \cdot dl$$

Non e' pero' banale misurare con precisioni inferiori al per-mille il campo magnetico integrale e il percorso totale fatto dalla particella. Il metodo usato per raggiungere tali precisioni e' quello della "Depolarizzazione Risonante".

I fasci viaggiando in campo magnetico tendono a polarizzarsi. La perdita di energia dominante di un fascio di elettroni mantenuto in orbita circolare e' per radiazione di sincrotrone ($\sim E^4/\rho^2$). Un altro modo, meno noto, in cui il fascio perde energia (in quantita' molto meno del primo modo) e' stato descritto per la prima volta da Sokolov e Ternov nel 1964 (A.A.Sokolov, I.M.Ternov, Sov.Phys.Dokl 8, 1203 (1964)).

Rispetto alla direzione del campo magnetico B della macchina, la componente dello spin di ogni elettrone puo' essere parallela o anti-parallela



I due stati hanno energia diversa: quello che ha lo spin orientato parallelamente al campo magnetico B ha maggior energia di quello orientato anti-parallelamente.

$$\Delta E = \left| \frac{g}{2} \right| \hbar \gamma^2 \omega_0$$

dove ω_0 e' la frequenza di rivoluzione della macchina, γ il fattore relativistico e g il fattore giromagnetico dell'elettrone:

$$g = \frac{2\mu_e m_e c}{e\hbar S}$$

dove S e' lo spin dell'elettrone, e μ_e il momento magnetico dell'elettrone.

Dopo un certo tempo dunque ci si aspetterebbe che tutti gli elettroni siano nello stato ad energia piu' bassa, ovvero con lo spin orientato anti-parallelamente al campo magnetico B della macchina. (Il processo avviene attraverso una emissione di fotone, mediante la cosiddetta transizione di dipolo magnetico).

In pratica la polarizzazione trasversa massima ottenibile e' del 92%, a causa di imperfezioni della macchina acceleratrice.

I tempi tipici di polarizzazione Sokolov-Ternov sono:

$$\tau_{ST} = \frac{8}{5\sqrt{3}} \frac{m_e \rho^2}{\hbar r_e \gamma^5}$$

dove ρ e' il raggio della macchina.

Come dicevamo, l'energia persa per effetto Sokolov-Ternov (o "spin-flip") e' molto piccola rispetto a quella persa per radiazione di sincrotrone e':

$$\frac{W_{spin-flip}}{W_{synchrotron}} = 3 \left(\frac{\hbar \gamma}{m_e c \rho} \right)^2 \left(1 \pm \frac{35\sqrt{3}}{64} \right)$$

(dove il segno \pm dipende dalla polarizzazione iniziale). Per LEP il rapporto e':

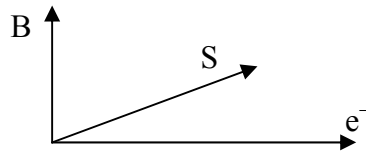
$$\frac{W_{spin-flip}}{W_{synchrotron}} \sim 10^{-11} !!$$

In un acceleratore esistono, pero', dei fenomeni che tendono a depolarizzare i fasci (come le componenti non verticali di B, le interazioni tra i fasci ...). La polarizzazione e' dunque data dalla risultante di questi effetti con Sokolov-Ternov. Inoltre la macchina dovrebbe avere un'ottica dedicata e particolare per ottenere una polarizzazione apprezzabile.

A LEP si riusciva ad ottenere una buona polarizzazione se non si facevano collidere i fasci, ovvero durante run speciali e dedicati, e solo per energie dei fasci minori di 65 GeV.

Come si usa l'effetto Sokolov-Ternov per misurare l'energia dei fasci E_{beam} :

In generale tutti gli elettroni hanno una componente dello spin S trasversa rispetto al campo magnetico B.



Lo spin dunque "precede" nel campo magnetico della macchina, mentre l'elettrone si muove lungo l'orbita. La frequenza di precessione e':

$$\Omega_S = (1 + a_e \gamma) \omega_0$$

dove ω_0 e' la frequenza di rivoluzione e $a_e = \frac{g-2}{2}$ e' il momento magnetico anomalo

dell'elettrone. Se si avesse $a_e = 0$, ovvero $g=2 \Rightarrow \Omega_S = \omega_0$.

Sperimentalmente si misura $a_e = (11596521,869 \pm 0,041) \times 10^{-10}$.

Si scrive la frequenza di precessione come:

$$\Omega_S = (1 + \nu_S) \omega_0$$

dove ν_S e' detto Spin-Tune, e $\nu_S = a_e \gamma$.

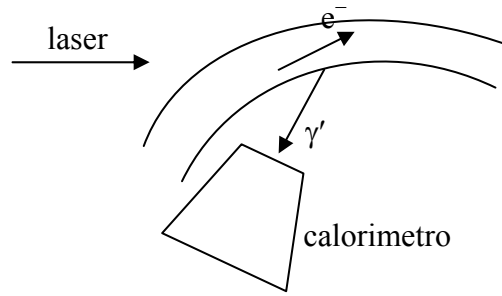
Misurare ν_S significa misurare $a_e \gamma$, ovvero $E_{beam} = E_{e^-} = \gamma m_e$.

Se si introduce nel lattice della macchina una sorgente di campo magnetico orizzontale oscillante, l'effetto sara' quello di perturbare la rotazione/precessione del vettore di spin. Se la frequenza dell'oscillazione del campo magnetico orizzontale e' un multiplo della frequenza di precessione dello spin dell'elettrone ($f_k = n \omega_0 \nu_S$) si ottiene la cosiddetta "depolarizzazione risonante": il vettore di spin non riesce piu' a restare allineato con il campo magnetico verticale della macchina e la polarizzazione va a zero.

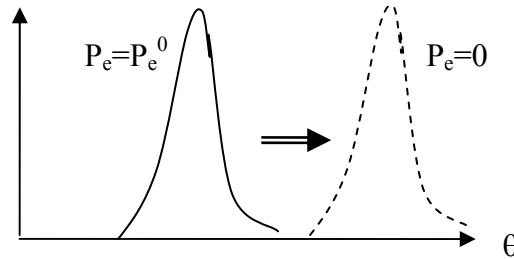
Per rivelare la polarizzazione del fascio si invia un fascio di fotoni polarizzati (laser) contro il fascio di elettroni. L'angolo di diffusione dei fotoni dipende dalla polarizzazione relativa dei fotoni e degli elettroni:

$$e^- \gamma \rightarrow e^- \gamma', \quad \theta(\gamma') \propto Pol(\gamma) - Pol(e^-)$$

Il fotone diffuso (e che acquista energia nell'urto) viene rivelato da un calorimetro finemente segmentato che misura con grande precisione $\theta(\gamma')$.



La condizione di depolarizzazione risonante (che avviene in millisecondi!) viene rivelata da un brusco e brutale cambiamento dell'angolo di diffusione:



La frequenza di oscillazione del campo magnetico orizzontale a cui si ottiene questa variazione $\Delta\theta(\gamma)$ determina lo Spin-Tune ν_S e di conseguenza l'energia del fascio di elettroni. Gli errori su questa misura sono determinati dalla precisione con cui si misura f_k , dall'errore sulla massa dell'elettrone Δm_e , e dall'errore su $(g-2)$.

L'errore sull'energia del fascio che tipicamente si ottiene è: ~ 100 KeV. Questo errore si propaga in un errore sulla massa e larghezza del bosone Z di

$$\Delta M_Z \sim 0.4 \text{ MeV}/c^2, \quad \Delta \Gamma_Z \sim 0.5 \text{ MeV}/c^2.$$

Come si è detto prima questa misura avviene in run speciali della macchina, ovvero ad un dato tempo t_0 . Quello che si vuole veramente è conoscere l'energia del fascio durante i run di fisica, in cui si prendono dati, ovvero ad un tempo t_1 . Bisogna dunque correlare la misura dell'energia del fascio a tempo t_0 con quella al tempo t_1 . Per far questo ritorniamo all'equazione fondamentale:

$$E_{beam} = \oint B dl$$

Per correlare $E(t_0)$ con $E(t_1)$ bisogna conoscere come variano il campo integrato B e il cammino totale $L = \oint dl$ dal tempo t_0 al tempo t_1 .

Gli effetti principali che possono causare variazioni su queste due quantità (B ed L) sono:

- effetti di marea (dovuta all'interazione gravitazionale tra il sole e la luna con la terra): cambiano il livello del terreno fino ad un massimo di 25 cm nella zona di Ginevra. Questo comporta una variazione dell'anello dell'acceleratore, ovvero \Rightarrow variazione di L.
- effetti dovuti alla falda freatica sul Jura e alla quantità di acqua nel lago. Le variazioni di pressione dovute alle variazioni della massa dell'acqua o nel Jura o nel lago modificano la forma dell'anello e dunque \Rightarrow variazione di L
- effetti complessi di variazione di temperatura dei magneti: variano la costante di permeabilità dei magneti, le caratteristiche del materiale e la forma dei magneti \Rightarrow variazione di B e di L
- treni TGV: le correnti parassite che vanno nel terreno (e che dunque non ritornano totalmente sui binari) entrano nell'anello e vanno a modificare il ciclo di isteresi dei magneti \Rightarrow variazione di B

Le variazioni di L e di B furono sguite con dei sensori: ~ 600 sensori misuranti le variazioni di orbita, ovvero di L, e ~ 16 sonde NMR per misurare variazioni di B.

L'enorme lavoro di calibrazione risultò in un errore totale sull'energia dei fasci a LEP-100 di

$$\Delta E_{\text{beam}} = 1.7 \text{ MeV}$$

ovvero di

$$\Delta M_Z = 2.1 \text{ MeV}/c^2$$

$$\Delta \Gamma_Z = 2.3 \text{ MeV}/c^2.$$

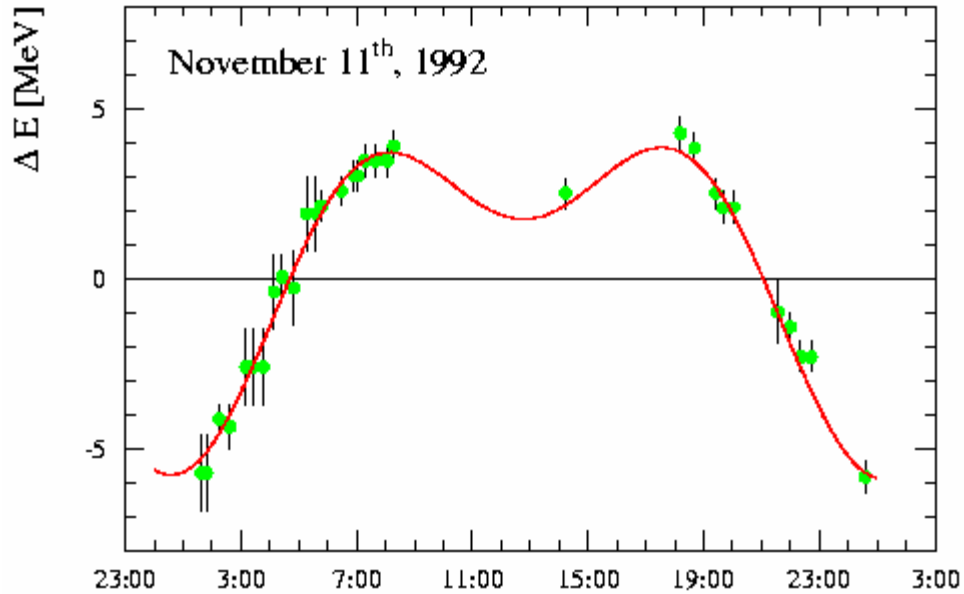


Fig.11

La figura 11 mostra come l'energia del fascio varia durante un giorno intero, a causa delle maree dovute alla luna. A Ginevra il livello del terreno varia fino ad un massimo di 25 cm (i.e. un cambio locale del raggio terrestre di 4×10^{-8}). L'orbita di LEP viene modificata di meno di 1 mm (lo spessore di un capello!), e l'energia del fascio subisce una variazione di circa 10 MeV!

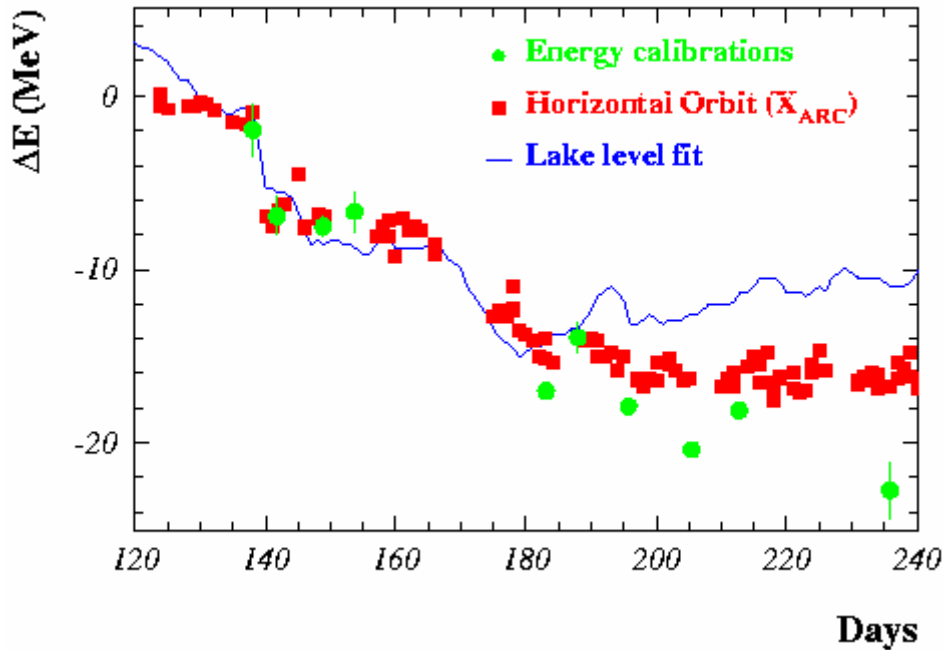


Fig.12

La figura 12 mostra come il livello dell'acqua del lago Lemano influenza la forma dell'anello, ovvero il percorso totale delle particelle e dunque la loro energia. La misura è stata possibile grazie al comune di Ginevra che, manovrando le dighe, ha permesso di aumentare e abbassare l'acqua del lago in modo controllato.

Behaviour of LEP NMR

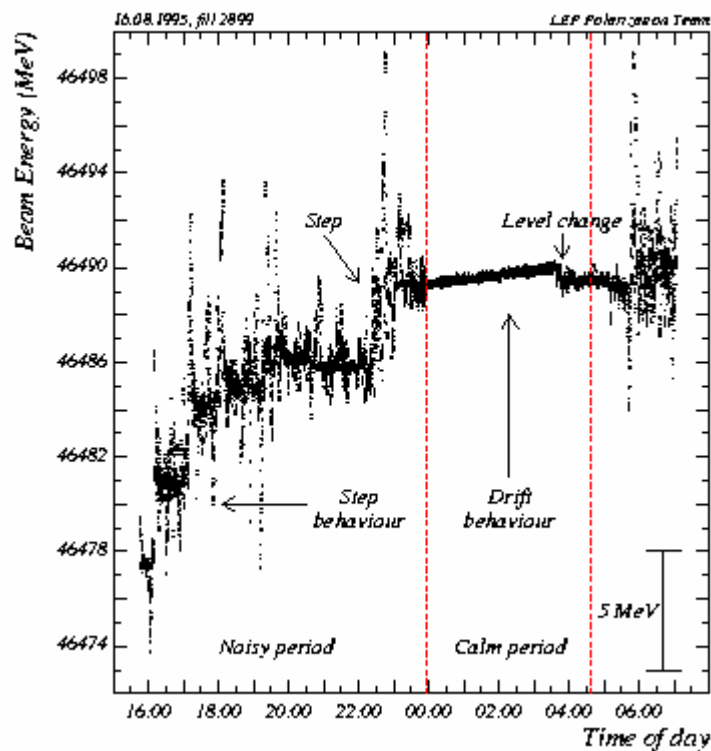


Fig.13

La figura 13 mostra l'andamento dell'energia in funzione dell'ora. Questo andamento era ripetuto con regolarità ogni giorno: aumento dell'energia durante la sera e energia costante

durante la notte. Le misure sono state fatte grazie alle sonde NMR poste lungo l'acceleratore, ovvero l'aumento di energia era dovuto ad una variazione del campo magnetico B della macchina.

La spiegazione di questa variazione periodica di ~20 MeV viene dalla linea dei treni TGV Francia-Svizzera: lungo le rotaie della vecchia tratta (linea rossa in figura 14.a) una frazione della corrente non ritorna completamente sulle rotaie, ma viene dispersa nel terreno. Questa corrente vaga nel terreno finché non incontra il tunnel del LEP, ottimo conduttore, e poi riesce dal tunnel quando passa nel fiume "La Versoix".

Misurando le variazioni di tensione lungo la linea dei treni e lungo la beam pipe di LEP e le variazioni delle sonde NMR si può notare una correlazione perfetta con i passaggi dei treni TGV (vedi figura 14.b). Nella notte, ovvero tra le ore 00:00 e le 04:00 non passano treni e si misura un'energia costante.

Vacuum Chamber Current Correlation

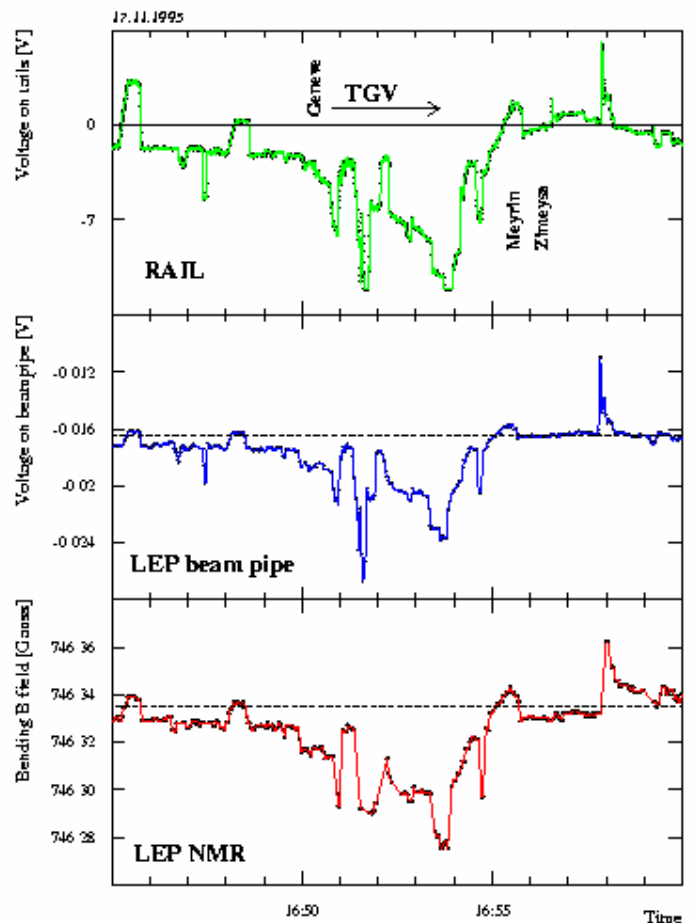
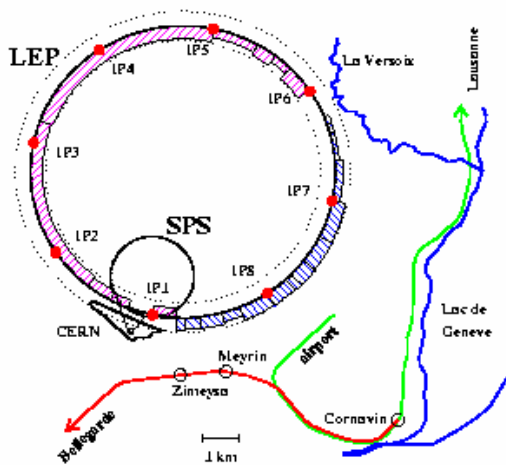


Fig.14

Questo effetto fu molto difficile da capire, nonostante si conoscesse da più di 100 anni il fenomeno della perdita di corrente dalle rotaie dei treni.

La misura della Luminosità a LEP.

Lo stato iniziale e^+e^- è definito dalla energia dei due fasci di particelle e dalla luminosità. Come abbiamo detto, per misurare la massa del bosone Z e le altre sue caratteristiche a meglio del per-mille, sia lo stato iniziale sia lo stato finale devono essere noti con tale precisione. Il paragrafo precedente ha illustrato come a LEP-100 si sia potuto misurare l'energia con una precisione migliore del 2×10^{-5} . In questo paragrafo illustreremo a grandi

linee come si sia misurata la luminosita' a LEP con una precisione di qualche frazione del per-mille.

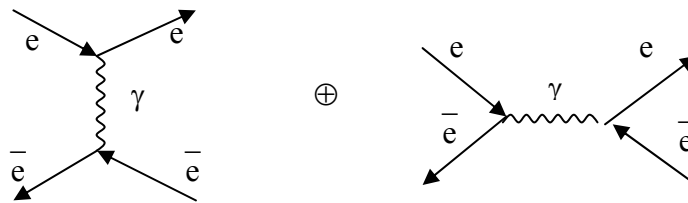
In teoria si puo' misurare la luminosita' dai parametri della macchina, in pratica, il modo piu' preciso per misurare la luminosita' dei fasci e' proprio usare la relazione:

$$\sigma = N_{segnale} / Lum \Rightarrow Lum = N_{segnale} / \sigma$$

dove si seleziona un processo fisico la cui sezione d'urto e' molto ben nota teoricamente. Misurando il numero di eventi nel rivelatore dovuti a questo dato processo fisico si ottiene di conseguenza la luminosita'.

La formula va ovviamente corretta sottraendo gli eventi di fondo e dividendo per l'efficienza di selezione e rivelazione.

Il processo molto ben noto teoricamente, e' un processo di QED, ovvero il Bhabha scattering:



Il primo diagramma (canale t) domina a bassi angoli, in quanto $\sigma_{Bhabha} \propto \frac{1}{\theta^4}$. Ad esempio

per $\theta=29$ mrad (ovvero $\sim 2^\circ$), $\sigma_{Bhabha}=100$ nb. Gli esperimenti hanno di conseguenza costruito dei rivelatori di elettroni e positroni, ovvero dei calorimetri elettromagnetici, nella zona attorno all'asse del fascio, coprendo la zona angolare in θ dai $\sim 2^\circ$ agli $\sim 10^\circ$ e corrispondentemente dai $\sim 170^\circ$ ai $\sim 178^\circ$. Dato che la sezione d'urto cambia con la quarta potenza in θ , e' fondamentale definire con altissima precisione l'accettanza geometrica del calorimetro, in quanto piccolissime variazioni in θ , significano enormi variazioni in sezioni d'urto e dunque in numero di eventi (una variazione di $20\mu\text{m}$ sull'accettanza si trasmette in un errore del 0.1% sulla luminosita'). La precisione ottenuta nella definizione dell'accettanza geometrica dei calorimetri e' stata di $\sim 20\div 50\mu\text{m}$ (a seconda dell'esperimento). La selezione degli eventi comporta la richiesta che due sciami elettromagnetici di ugual energia vengano rivelati nei due calorimetri posti alle estremita' dell'apparato (a +z e -z). Un tipico plot e' mostrato in figura 15: l'energia dell'elettrone scatterato/ E_{beam} verso l'energia del positrone scatterato/ E_{beam} . La zona densamente popolata nel plot corrisponde ai due elettroni di ugual energia, ovvero agli eventi Bhabha. Le bande orizzontali o verticali lungo i valori $E/E_{beam}=1$ sono eventi in cui uno solo degli elettroni/positroni viene interamente rivelato nel calorimetro mentre l'altro deposita solo una parte della sua energia nel calorimetro opposto in quanto o e' al di fuori dell'accettanza geometrica, oppure ha irradiato fotoni che vengono persi, o ancora ha interagito con il materiale posto prima del calorimetro e ha iniziato a sciamare.

Si raggiunsero errori sulla luminosita' di circa 0.5×10^{-3} .

L'errore teorico e' risultato alla fine quello dominante, ed e' di 5×10^{-3} . Notiamo che molti teorici italiani hanno contribuito ai calcoli di precisione dello scattering Bhabha, permettendo dunque di raggiungere precisioni elevate nello studio del bosone Z e della fisica elettrodebole.

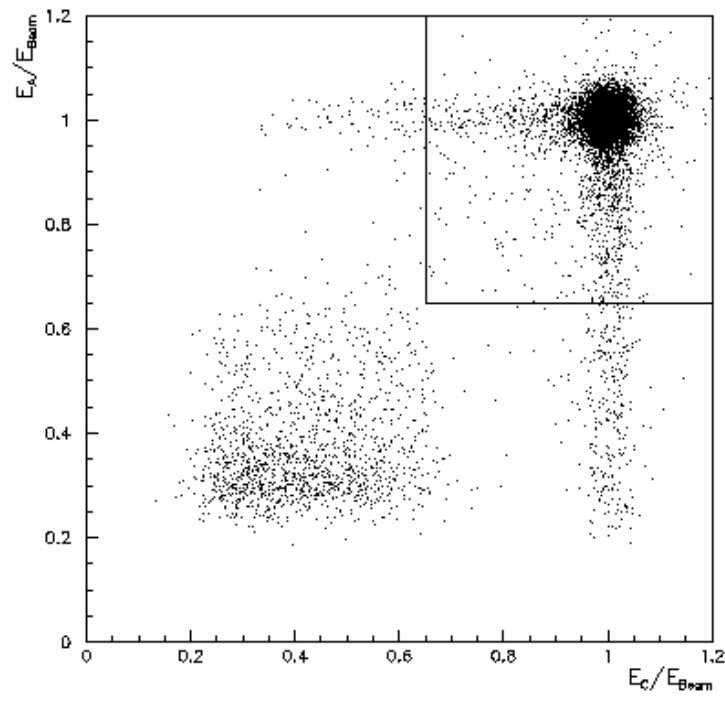


Fig.15