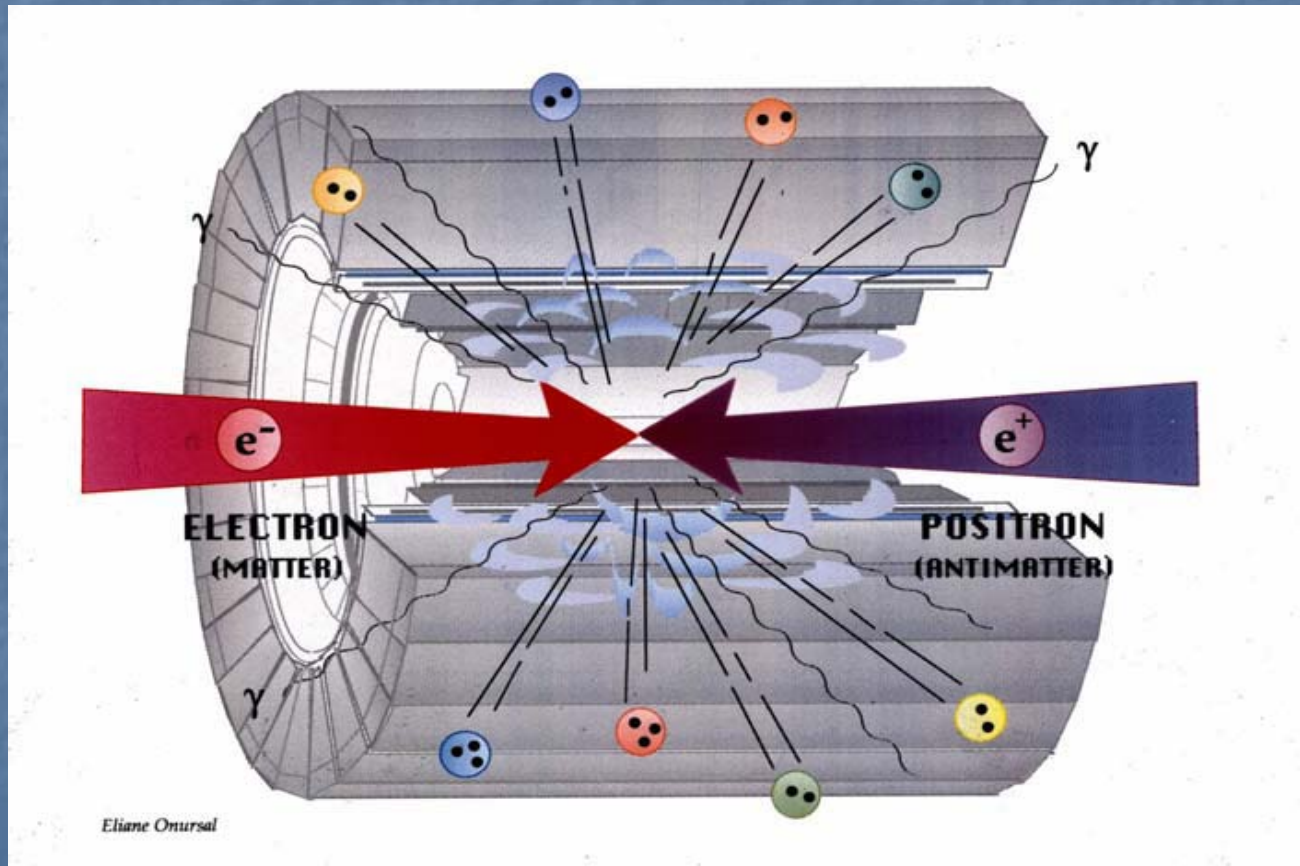


LA RIVELAZIONE DELLE PARTICELLE ELEMENTARI



RICERCA SPERIMENTALE NEL
CAMPO DELLA FISICA
NUCLEARE E SUBNUCLEARE

SONO CORRELATI

PROGRESSO TECNOLOGICO
DEGLI ACCELERATORI E
RIVELATORI DI PARTICELLE

La fisica delle alte energie
(HEP) studia le interazioni tra
particelle

IN CHE MODO?

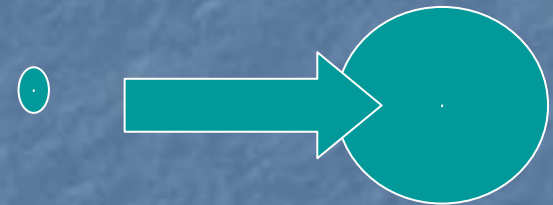
effettuando esperimenti di
diffusione tra particelle
differenti

INTERAZIONI TRA PARTICELLE

COLLISIONE $P_{TOT}=0$



A BERSAGLIO FISSO



Come risultato delle interazioni si ha:

Modifica della direzione, energia, impulso
delle particelle

creazione di nuove particelle



PERCHÉ ALTE ENERGIE ?

LUCE: onda elettromagnetica

$$E = h \nu$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

PERCHÉ ALTE ENERGIE ?

le particelle si comportano come onde

la meccanica quantistica ci dice che al "pacchetto d'onda" è associata una lunghezza d'onda

$$\lambda = h/(mv)$$

possiamo dunque usare particelle cariche accelerate e variare m e v a piacere

più aumenta l'energia più diminuisce λ
(diametro di un atomo: 0.1 nm);

PERCHÉ ALTE ENERGIE ?

PER ESPLORARE L'INFINITAMENTE PICCOLO

" E "

DEVE ESSERE MOLTO GRANDE

$$E = mc^2$$

Grande **energia** delle particelle incidenti



Grande **massa** delle particelle prodotte



Primi fasci di particelle:

particelle α (10 MeV)

raggi cosmici (imprevedibili)

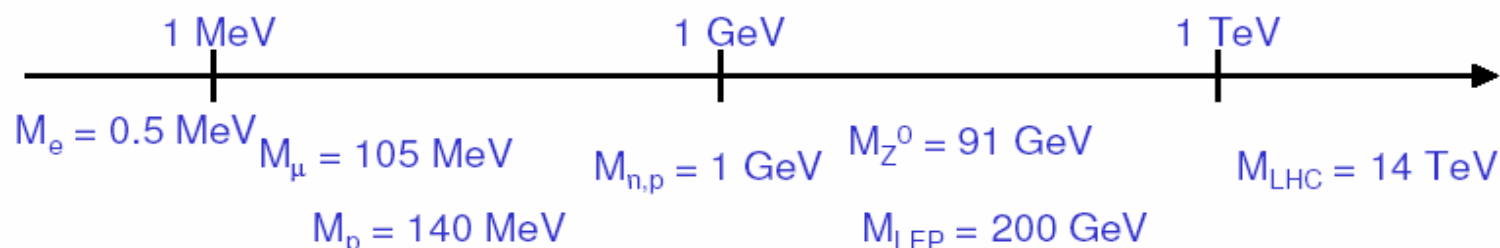
Servono fasci di particelle ad alta
energia e ripetibilità
per studi sistematici!!!!



ACCELERATORI

Energie in HEP

Scala energia e masse in HEP:



Paragone energie HEP con energie macroscopiche

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}, \quad c = 300.000 \text{ km/s} \rightarrow 1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$$



$$m_{ape} = 1 \text{ g} = 5.8 \cdot 10^{32} \text{ eV}/c^2$$

$$v_{ape} = 1 \text{ m/s} \rightarrow E_{ape} = 10^{-3} \text{ J} = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

$$E_{LHC} (1 \text{ protone}) = 1.4 \times 10^{13} \text{ eV}$$

Se però si considerano tutte le particelle in un fascio (10^{14}):

$$E_{tot} = 10^{14} \times 1.4 \times 10^{13} \text{ eV} \approx 10^8 \text{ J}$$

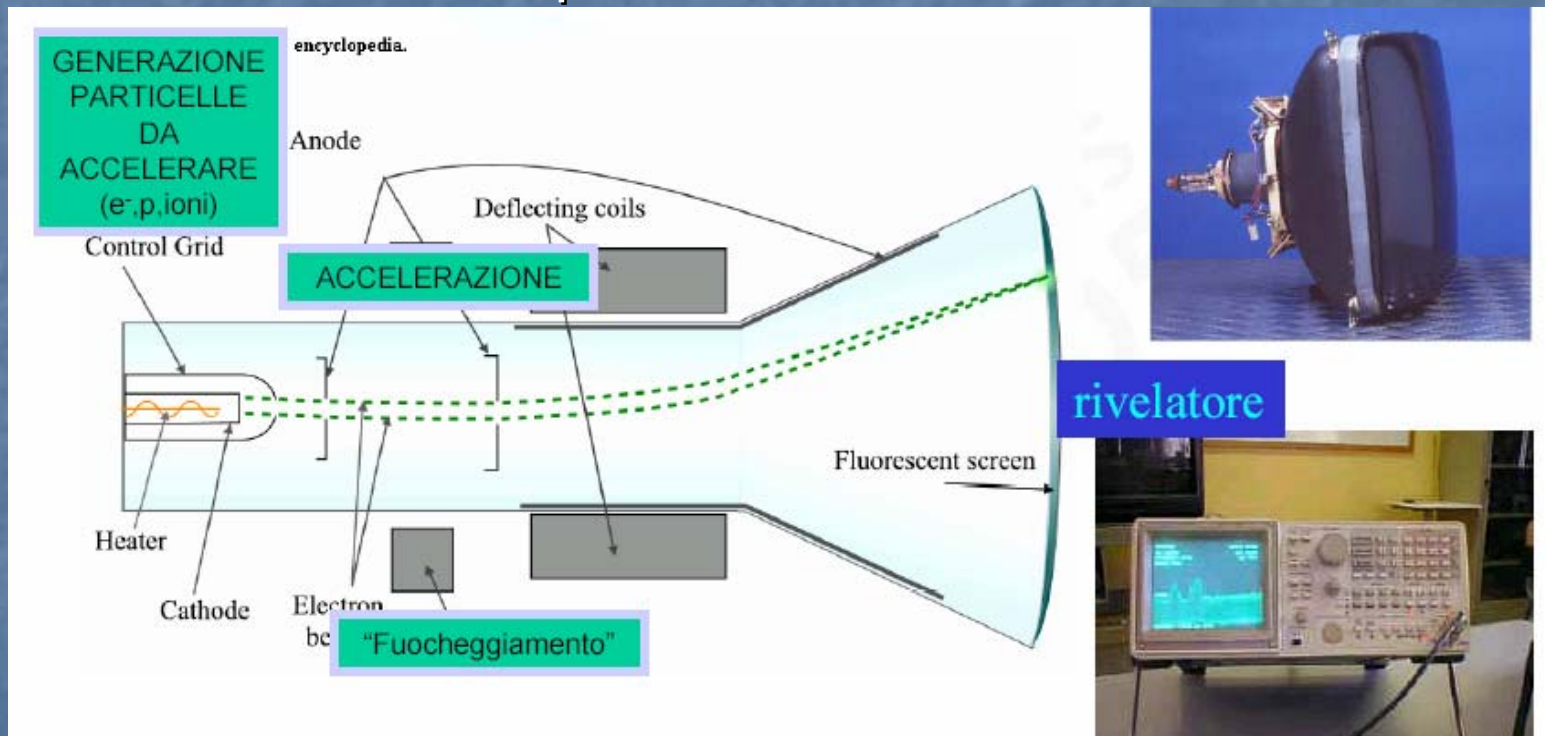


Energia cinetica
di un tir in corsa



Come funziona un acceleratore?

Il più comune



Una particella di carica e passando attraverso una differenza di potenziale V acquista una energia cinetica

$$E = e V$$

Per comodità l'energia si può misurare in elettron Volt :
1 eV = energia acquistata da un elettrone quando attraversa una d.d.p. $V = 1$ Volt

(carica $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb)

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

1 KeV = 10^3 eV, 1 MeV = 10^6 eV, 1 GeV = 10^9 eV,
1 TeV = 10^{12} eV...

I primi studi sugli acceleratori sono degli anni '20
I primi acceleratori sono realizzati negli anni '30

- Macchina di Cockroft_Walton
- Macchina di Van de Graff (MeV)
- 1928 Rolf Wideroe → LINAC
- 1930 Ernest Lawrence → CICLOTRONE
- 1934 Livingston rivela protoni e deutoni

La forza di Lorentz descrive il moto di una particella in un acceleratore

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = q \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

\vec{p} = impulso
 m = massa
 \vec{v} = velocità
 q = carica

ACCELERAZIONE

\vec{E} = campo elettrico

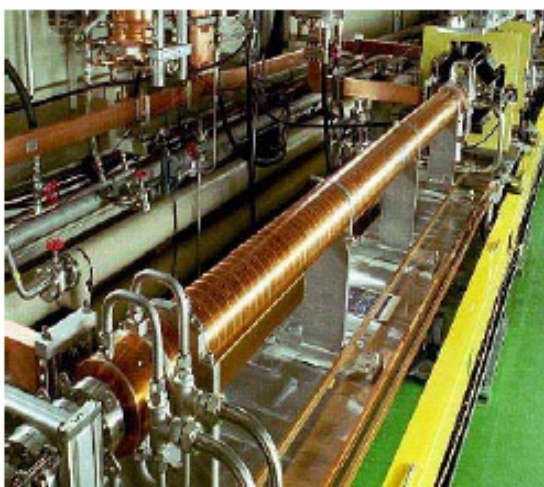
CURVATURA E
FOCHEGGIAMENTO

\vec{B} = campo magnetico

VARI TIPI DI ACCELERATORI

I diversi tipi di acceleratori si suddividono in base al processo di accelerazione in:

Lineari

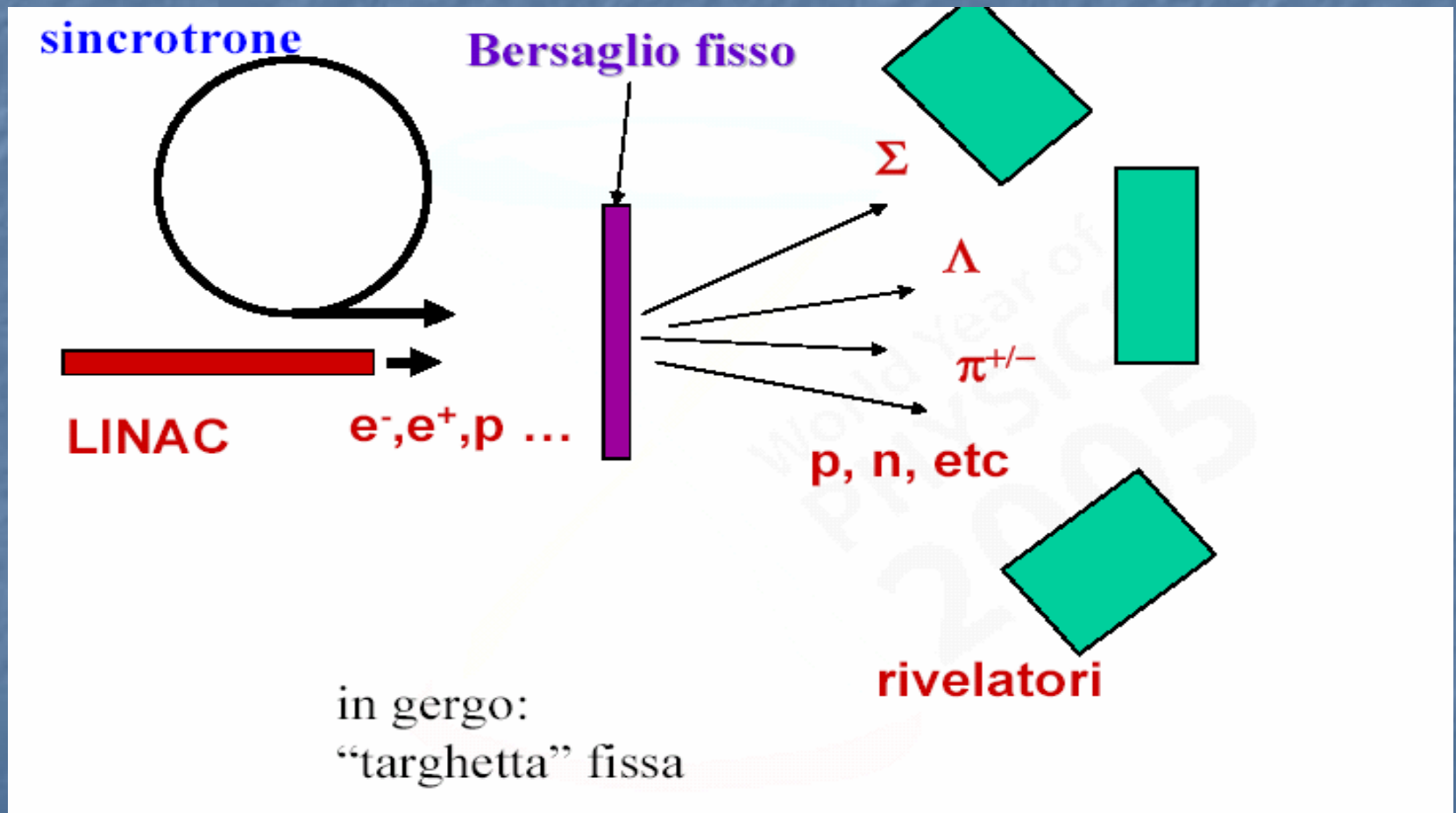


Circolari

Ciclotrone 1930
Betatrone 1940
Sincrotrone 1945
Microtrone 1946



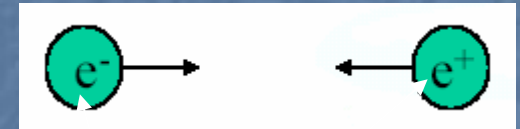
MODO DI UTILIZZO BERSAGLIO FISSO



COLLISORI

- Collider elettrone-positrone (es. LEP)

- $E_{\text{collisione}} = E_{e^-} + E_{e^+} = 2 E_{\text{fascio}}$
es. in LEP, $E_{\text{collisione}} \sim 90 \text{ GeV} = m_Z$.



sono particelle elementari

- Collider protone-protone (es. LHC)



- $E_{\text{collisione}} < (E_{\text{protone1}} + E_{\text{protone2}})$

LEP al CERN di Ginevra 1988-2001

Il collisore e^+e^- a più alta energia: $E_{CM}=209 \text{ GeV}$, Circonferenza
~ 27 Km



IL TEVATRON AL FERMILAB- Chicago

Il collisore protone-antiprotone a piu' alta energia:
2000 GeV



QUALI PARTICELLE VENGONO PRODOTTE IN UN ESPERIMENTO DI HEP?

■ PARTICELLE CARICHE

1. LEPTONI: e^{\pm} μ^{\pm} solo interazioni e.m. e deboli
2. ADRONI: p (protoni) subiscono anche interazioni forti
3. MESONI: π^{\pm} (pioni) subiscono anche interazioni forti

■ PARTICELLE NEUTRE

1. FOTONI propagatori dell'interazione e. m.
2. ADRONI neutroni
3. MESONI kaoni neutri
4. LEPTONI neutrini solo interazioni deboli

Come interagiscono con la materia?

- Le particelle cariche cedono energia tramite urti di natura elettromagnetica con gli elettroni del mezzo provocando eccitazione o ionizzazione degli atomi
- Le particelle neutre devono interagire attraverso una interazione intermedia che produca nello stato finale almeno una particella carica

Nessun progresso sarebbe stato possibile
in HEP se non fossero stati parallelamente
sviluppati

Nuovi sistemi di rivelazione delle
particelle

Che significa rivelare?

Osservare (vedere) un oggetto significa rivelare la **luce** che si è riflessa dalla sua superficie.

luce visibile

onde elettromagnetiche che il nostro occhio può rivelare;
lunghezza d'onda della luce visibile: tra 400 nm (violetto) e 700 nm (rosso).

■ Qual è il “rivelatore” più familiare?

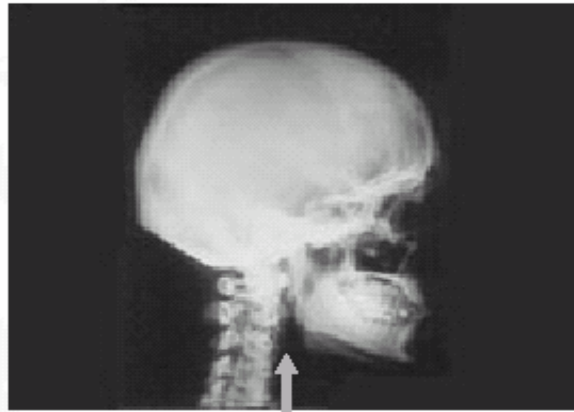
Cosa vuol dire vedere?



Non molto diverso da un “esperimento”

Ci sono altri modi per vedere?

Anche con il suono



luce “energetica” (raggi x)

4D



4D FETAL PROFILE

in questo caso gli oggetti da “vedere” non emettono un “fascio di suoni” ma ne vengono “illuminati” tramite un emettitore e si “vedono” le riflessioni (eco)

?? perché si usano
ultrasuoni e non suoni di
bassa frequenza?

gli effetti dell'interazione radiazione-materia in generale, non sono direttamente visibili.

COSA E' UN RIVELATORE?

è un “ponte”
che unisce mediante opportune amplificazioni,
Il nostro organo di senso con l'effetto prodotto
dall'interazione della particella che si vuole
rivelare con il rivelatore stesso.

QUALI GRANDEZZE SI POSSONO MISURARE?

- 4_IMPULSO (E, P_x, P_y, P_z)
- MASSA (in eV/c^2)
- CARICA ELETTRICA
- SPIN
- VITA MEDIA $\tau(\text{lab}) = \gamma \tau(\text{cm})$
- SPAZIO PERCORSO PRIMA DI DECADERE

4-impulso (E , P_x , P_y , P_z)

$$E = \gamma m_0 c^2 \text{ (energia in eV)}$$

$$\mathbf{P} = \gamma m_0 \mathbf{v} \text{ (impulso in eV/c)}$$

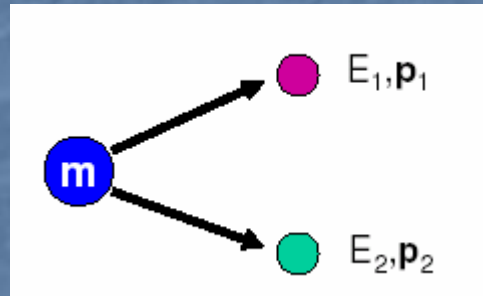
$$E^2 = \mathbf{P}^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\beta = v/c$$

Massa (in eV/c^2)

quantità "derivata" da E e **P**
misurata dai prodotti di decadimento



$$m_0^2 c^4 = (E_1 + E_2)^2 - (c\mathbf{p}_1 + c\mathbf{p}_2)^2$$

Tre sono stati i livelli di sviluppo più importanti che hanno interessato i rivelatori negli ultimi anni :

- Aumento delle dimensioni per rivelare gli "eventi" rari
- Incremento delle velocità di acquisizione
- Aumento della complessità degli apparati sperimentali

Tuttavia

Il principio fondamentale su cui tutti i rivelatori di particelle sono basati è lo stesso....

...il trasferimento di tutta o parte dell'energia della particella alla massa sensibile del rivelatore dove viene convertita in una forma più accessibile alla percezione degli strumenti a disposizione dell'uomo.

Classificazione Rivelatori

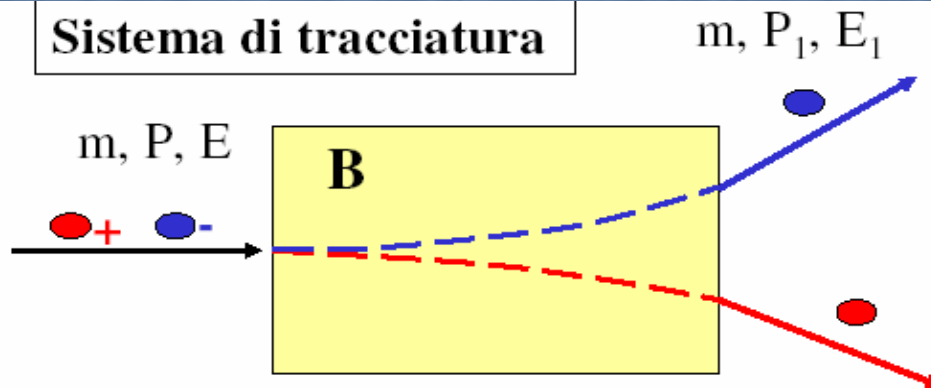
- Contatori → frequenza
- Traccianti → traiettoria, carica, momento
- Calorimetri → energia, tempo di volo

Combinando le informazioni di più rivelatori si ottengono informazioni più dettagliate come:

- massa,
- velocità,
- spin,
- tipo di particella.

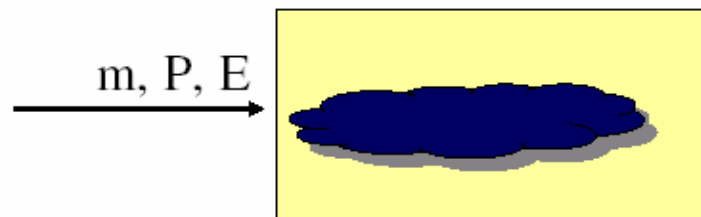
Caratteristiche generali

Sistema di tracciatura



- Il sistema di tracciatura determina la traiettoria della particella
- Se immerso in un campo magnetico **B** si riescono a determinare anche la carica **Q** ed il momento **P**
- La particella subisce una minima perdita d'energia nel sistema

Sistema Calorimetrico



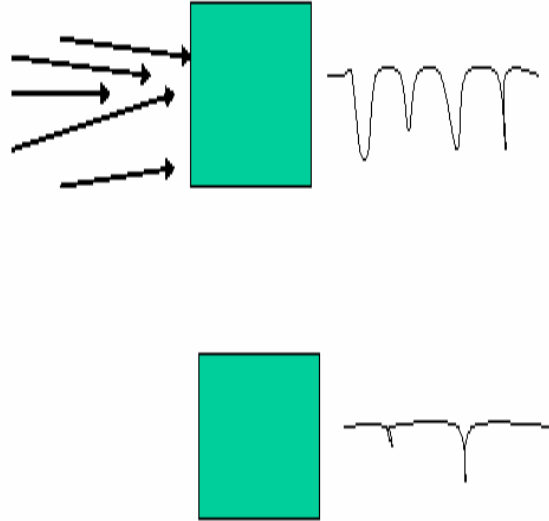
- In questo caso invece la particella viene quasi completamente assorbita
- Il segnale è proporzionale alla sua energia:

$$S = K E$$

Caratteristiche di un rivelatore ideale

L'efficienza di un rivelatore è il rapporto $\varepsilon = N_R / N_I$ tra il numero di particelle segnalate dal rivelatore e il numero di particelle incidenti.

Il rumore è dato dai segnali prodotti dal rivelatore non correlati alla particella in esame ma dovuti a fluttuazioni intrinseche del sistema (es: rumore elettronico).



- In un rivelatore ideale vorremmo essere in grado di ricostruire tutte le variabili in esame con:
- risoluzione perfetta
 - in tutto l'angolo solido
 - per tutte le particelle incidenti
 - con una velocità di risposta elevata
 - senza alcun rumore

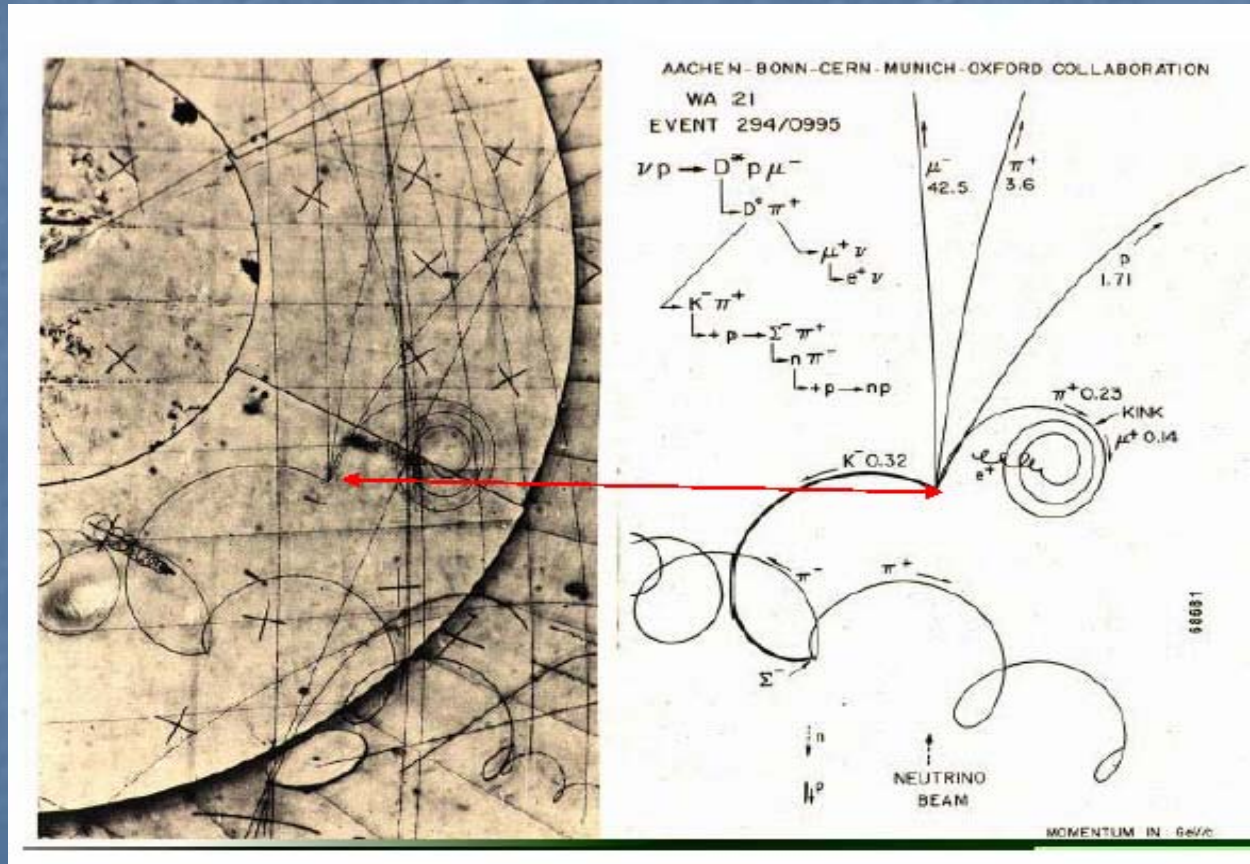
UN PO' DI STORIA

Il primo rivelatore:

la camera a bolle

1952 Donald Glaser

1954 viene rivelata la particella neutra sigma



Rivelatori a gas:

principio di funzionamento

Esistono diverse configurazioni per i rivelatori a gas.

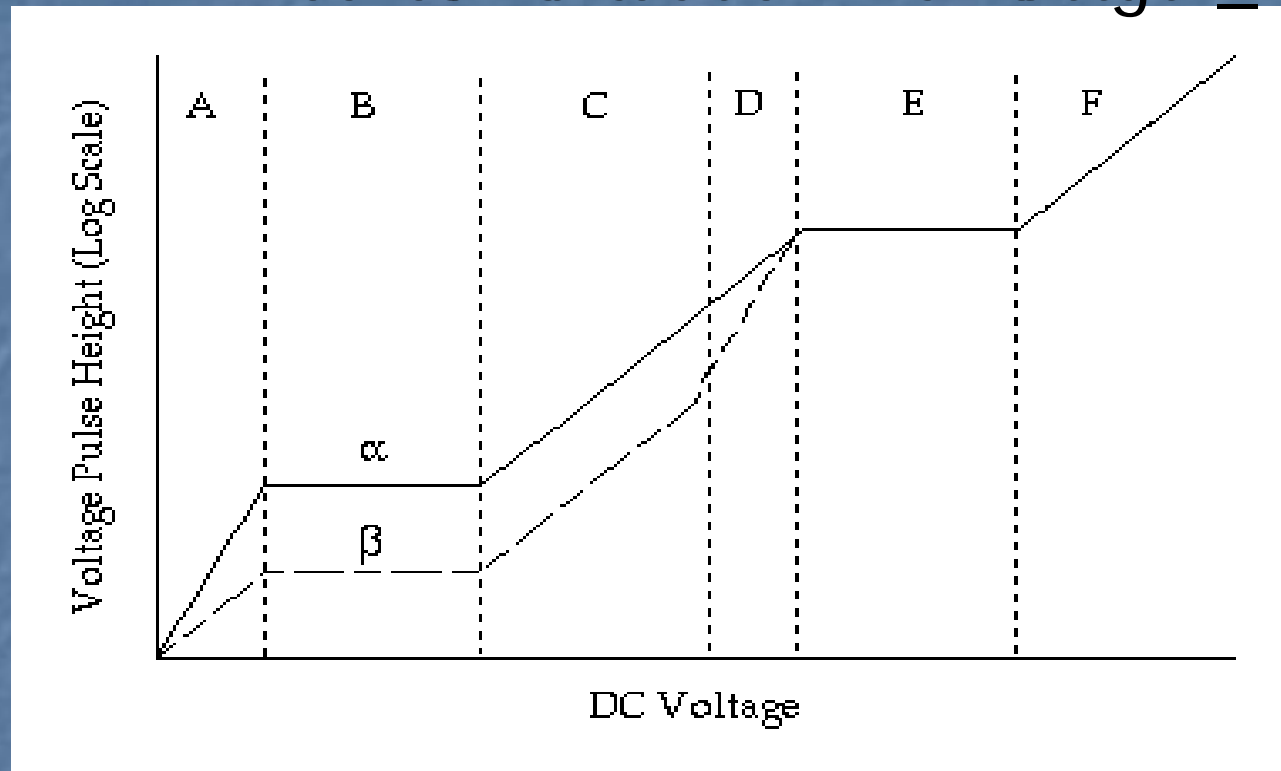
Sono costituiti da un contenitore riempito con un gas facilmente ionizzabile

Se una radiazione penetra nel rivelatore sarà creato un certo numero di coppie ione-elettrone, sia direttamente, se la radiazione è una particella carica, che indirettamente attraverso radiazioni secondarie, se la radiazione è neutra.

Il numero medio di coppie create è proporzionale all'energia depositata nel dispositivo. Sotto l'azione del campo elettrico, gli elettroni vengono accelerati verso l'anodo e gli ioni verso il catodo.

Rivelatore a gas

A ricambiamento C e D contatori proporzionali
B camera a ionizzazione Geiger-Müller



Il segnale in uscita dipende dal potenziale applicato

In regime di camera a ionizzazione si può ricavare informazione
su E, Z, posizione

RIVELATORI

A

SEMICONDUTTORE

Rivelatori a semiconduttore

I rivelatori a semiconduttore sono essenzialmente delle camere a ionizzazione in cui il gas è sostituito con un mezzo solido di bassa conducibilità.

Se una particella ionizzante attraversa questo mezzo, essa crea delle coppie elettrone-lacuna, che vengono separate dal campo elettrico e raccolte sugli elettrodi.

Mentre in un contatore a gas
occorrono circa 30 eV per creare
una coppia elettrone-lacuna,
nei rivelatori a semiconduttore ne
bastano solo 2-3.

Quindi a parità di altre condizioni
il segnale di uscita è in questi
ultimi circa 10 volte maggiore.

Scintillatori

I materiali scintillanti esibiscono la proprietà conosciuta come luminescenza.

Sollecitati da un'azione esterna (come luce, calore, radiazioni), assorbono e riemettono energia sotto forma di luce visibile.

Calorimetri

I calorimetri sono costituiti dai rivelatori capaci di fornire la misura dell'energia di una particella, ciò implica che questa debba essere completamente assorbita nel mezzo che costituisce il rivelatore.

(cristalli di tungstato di Pb)

Calorimetri

La risposta del rivelatore è proporzionale all'energia

$$S = S(E)$$

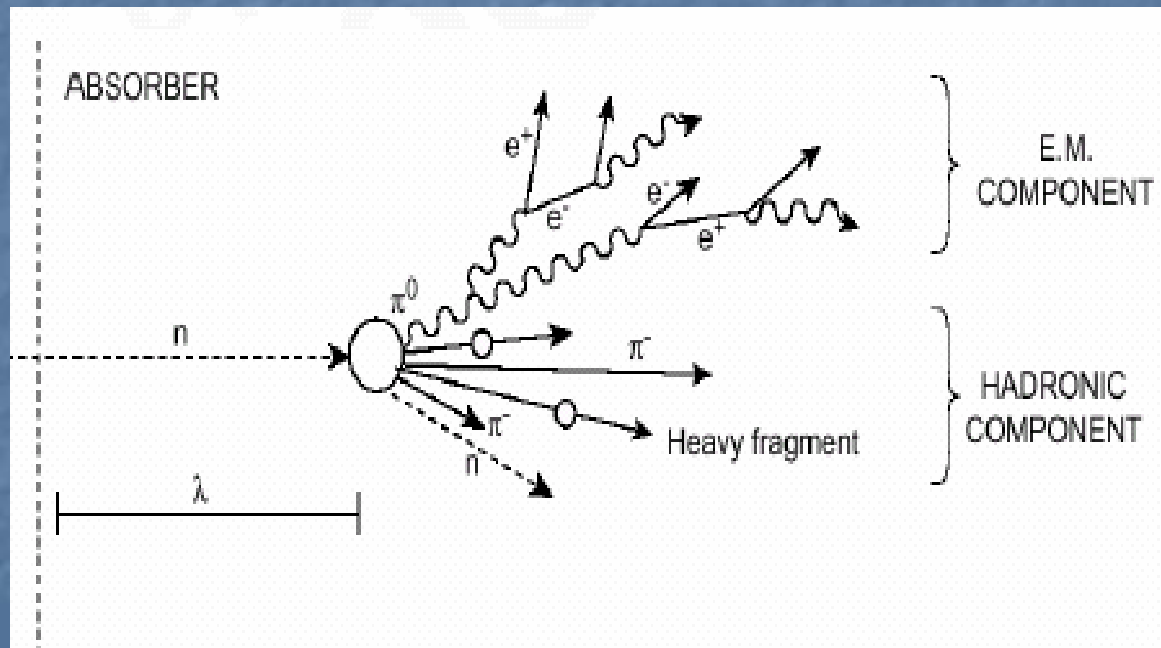
Essi sono capaci di lavorare sia con particelle cariche (e^\pm e adroni) che con particelle neutre (n).

Calorimetri

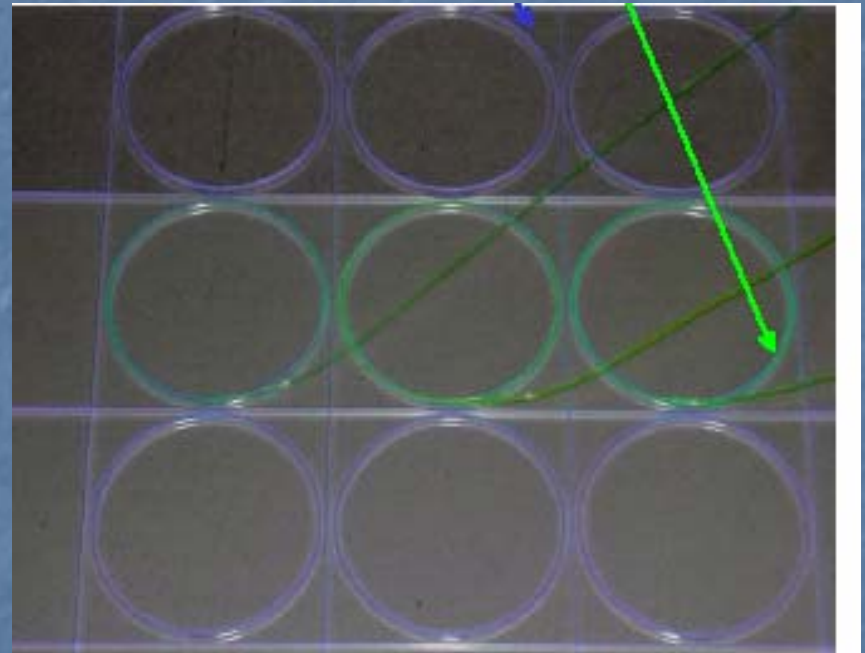
■ Calorimetri adronici

(particelle con interazione forte e neutre)

■ Calorimetri elettromagnetici (elettroni e fotoni)

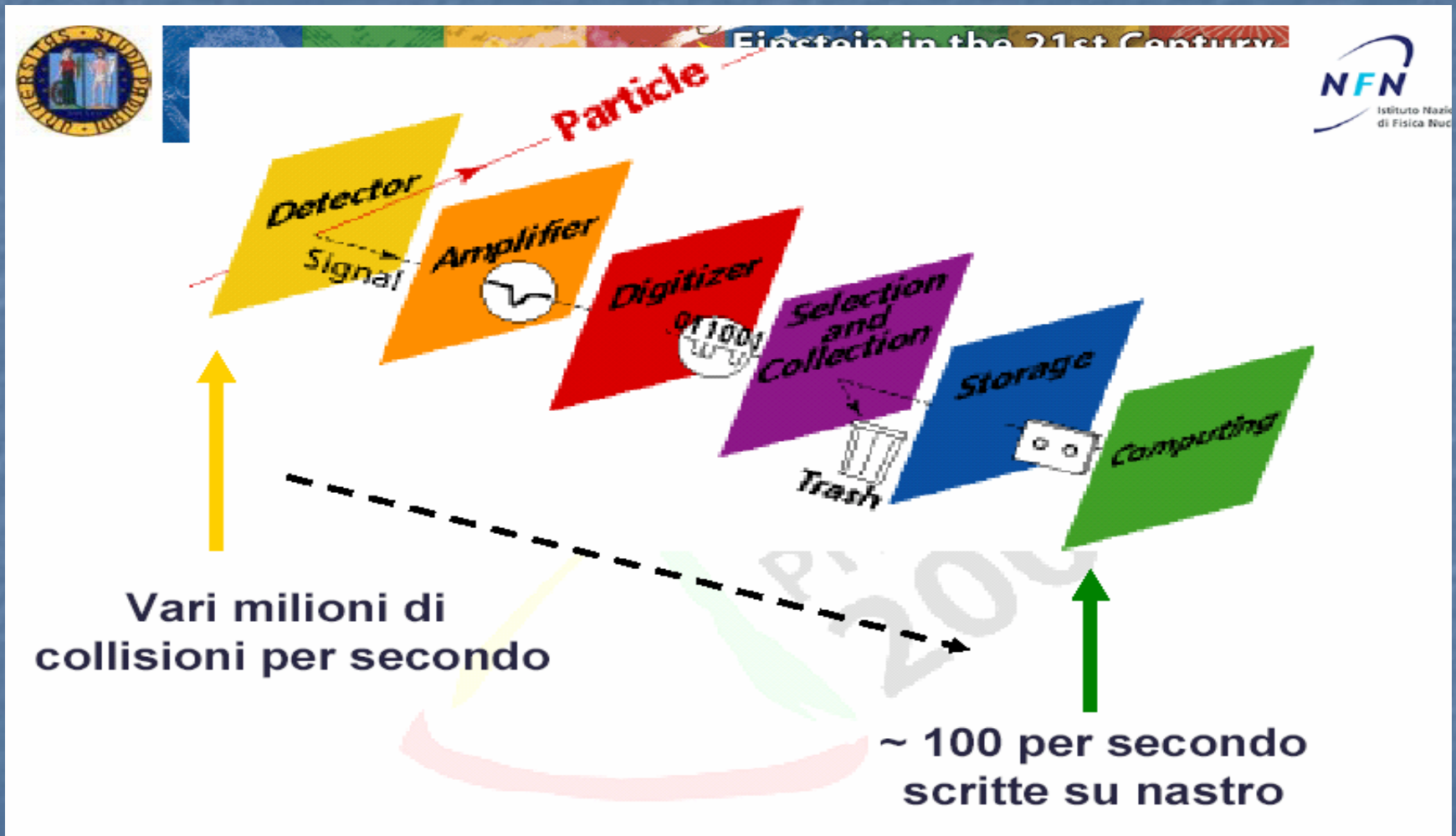


Tipica configurazione materiale denso assorbitore_scintillatore_



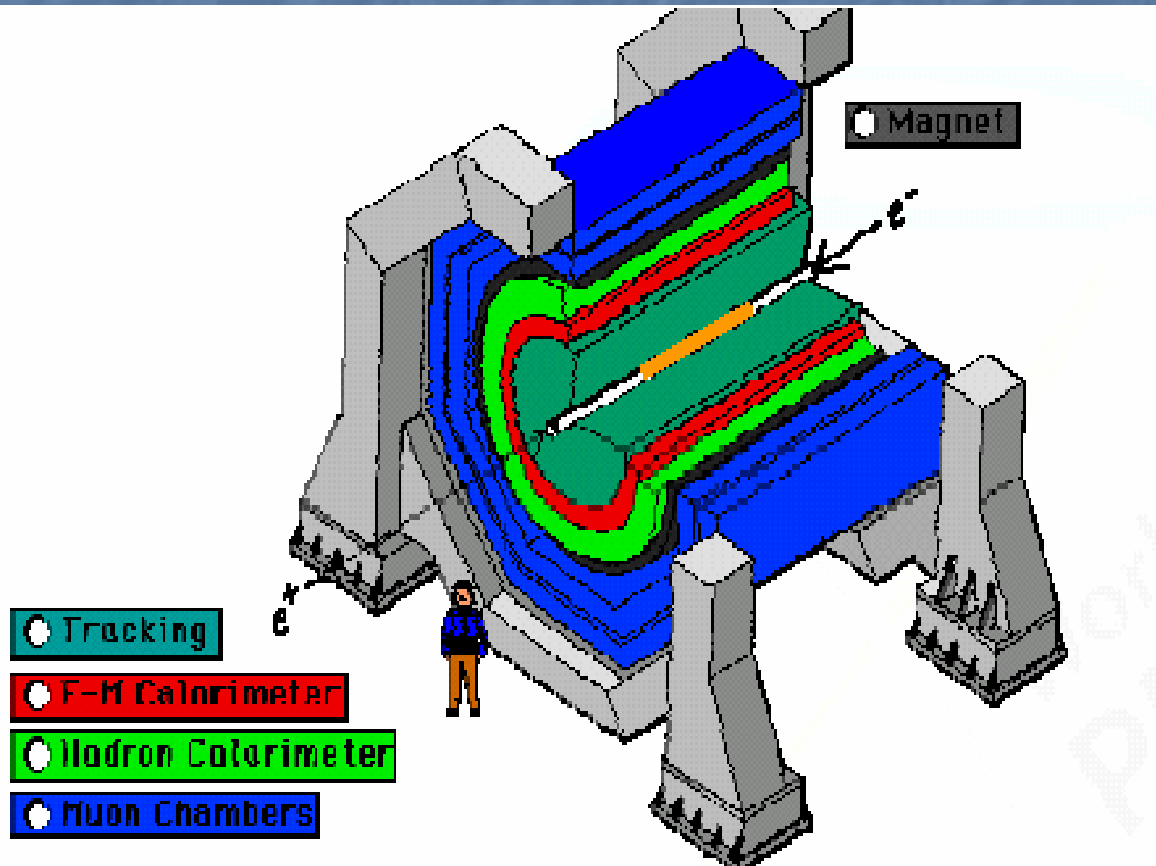
Fotorivelatore a fibre ottiche

Dispositivo tipico di rivelazione

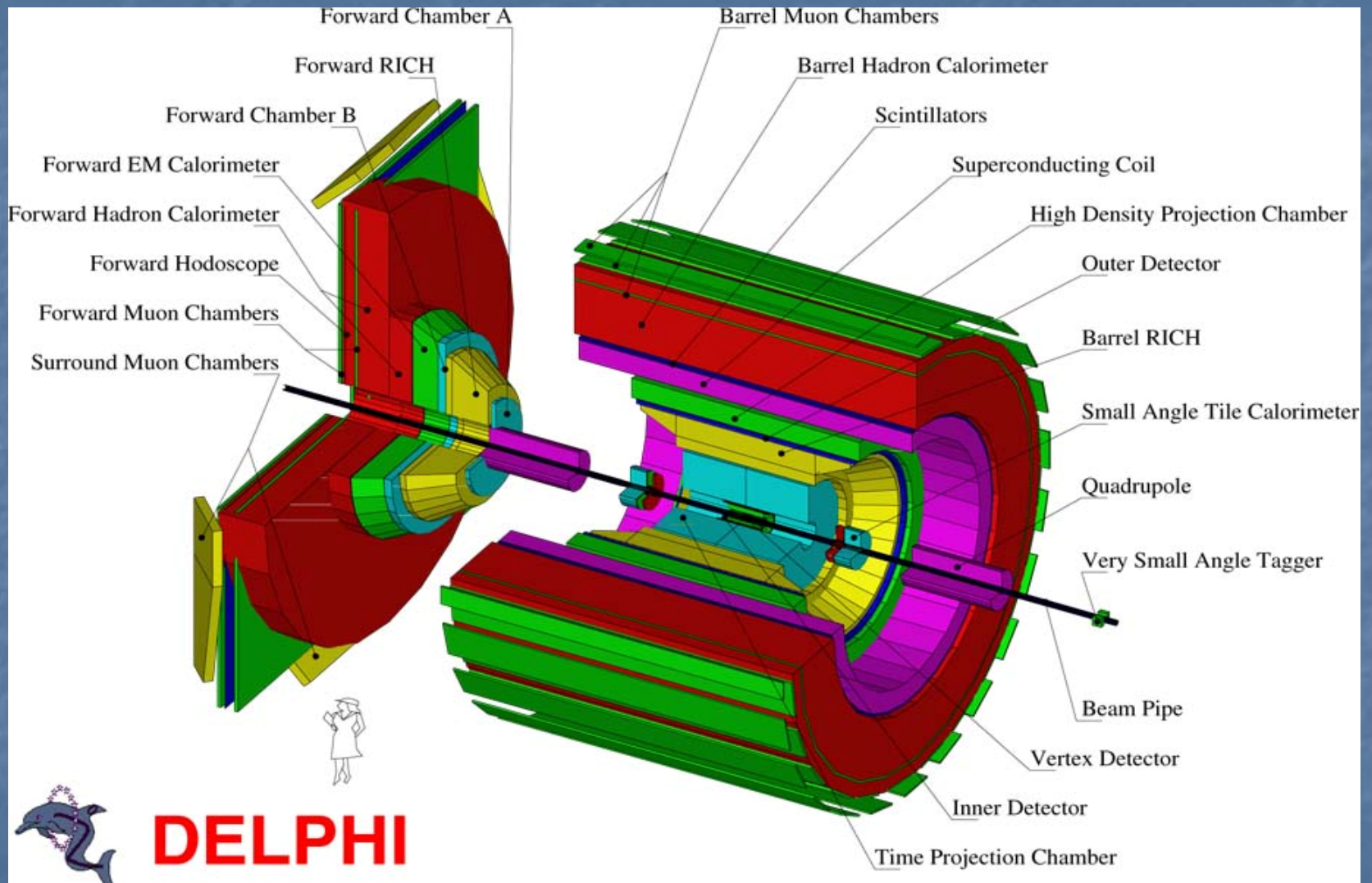


Rivelatore tipico

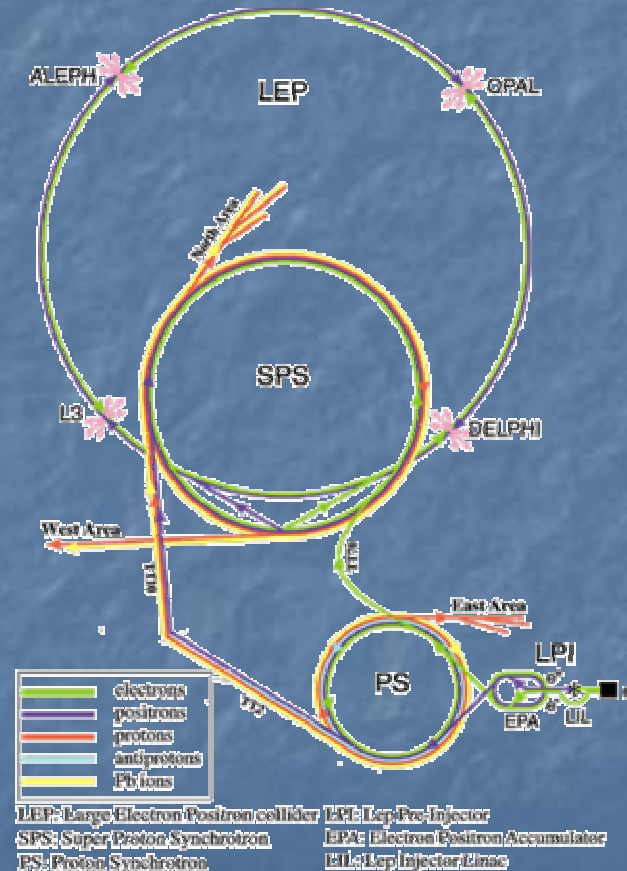
Struttura a cipolla
all'interno i
rivelatori di vertice,
poi i tracciatori,
i calorimetri e.m.
e adronico



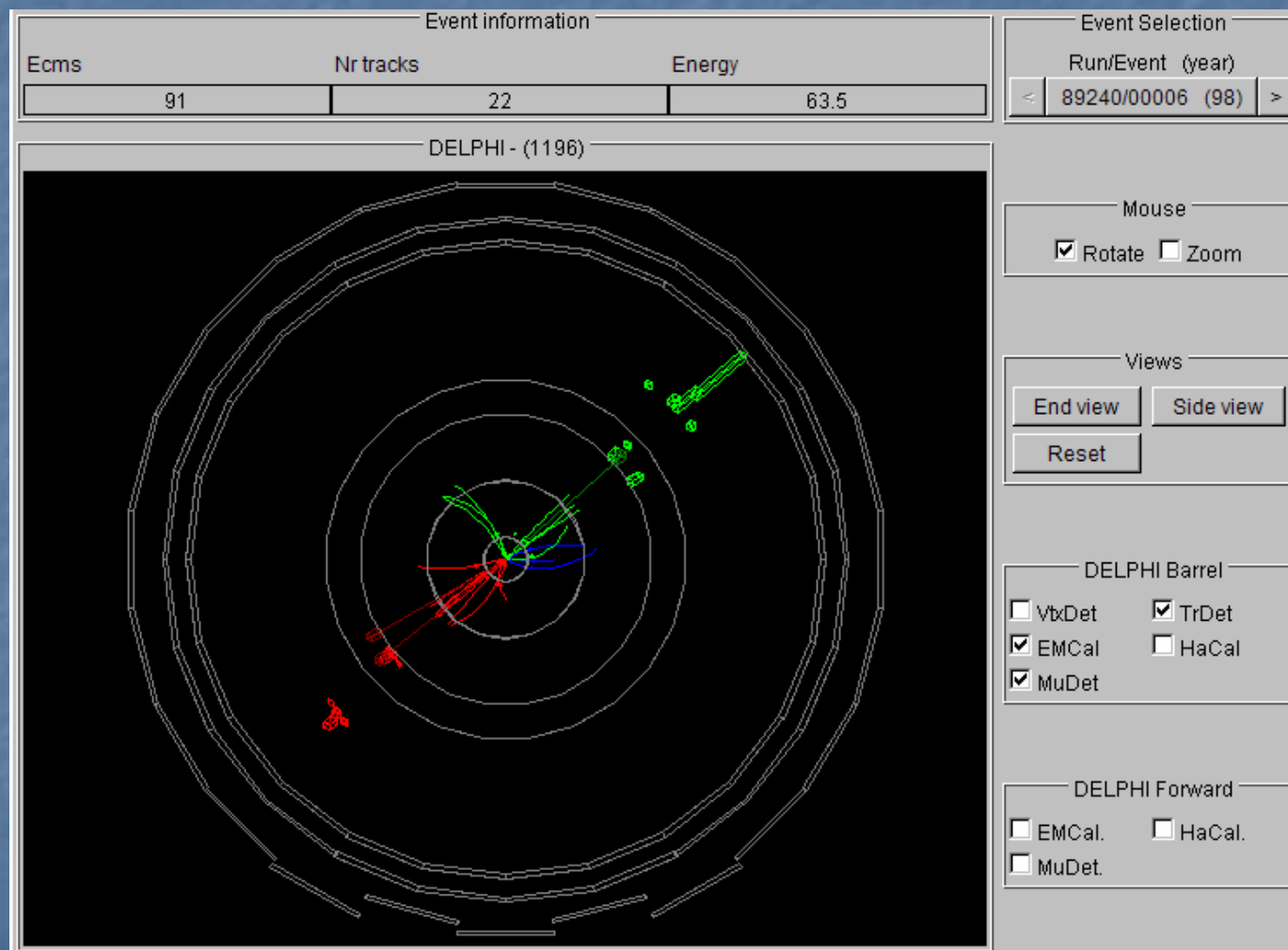
L'esperimento Delphi al LEP del CERN



Nel LEP fasci di elettroni e positroni collidono ad energie di 100 GeV .
Nella collisione vengono prodotte Z^0 la cui massa è di circa 91 GeV

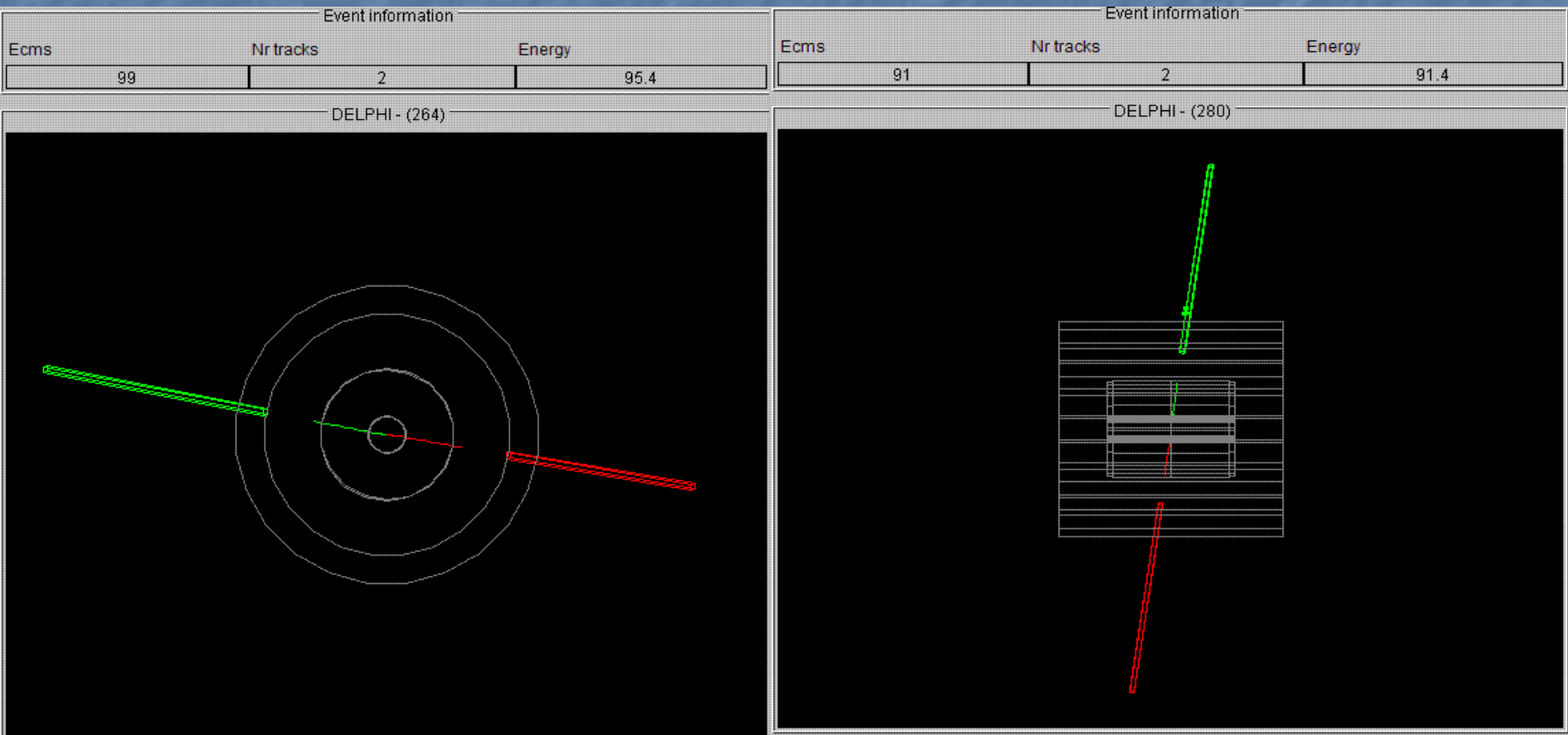


Usando un programma interattivo chiamato WIRED si possono analizzare le collisioni rivelate da DELPHI. Si possono riconoscere "a vista" a quale dei possibili casi corrisponde l'evento in esame.



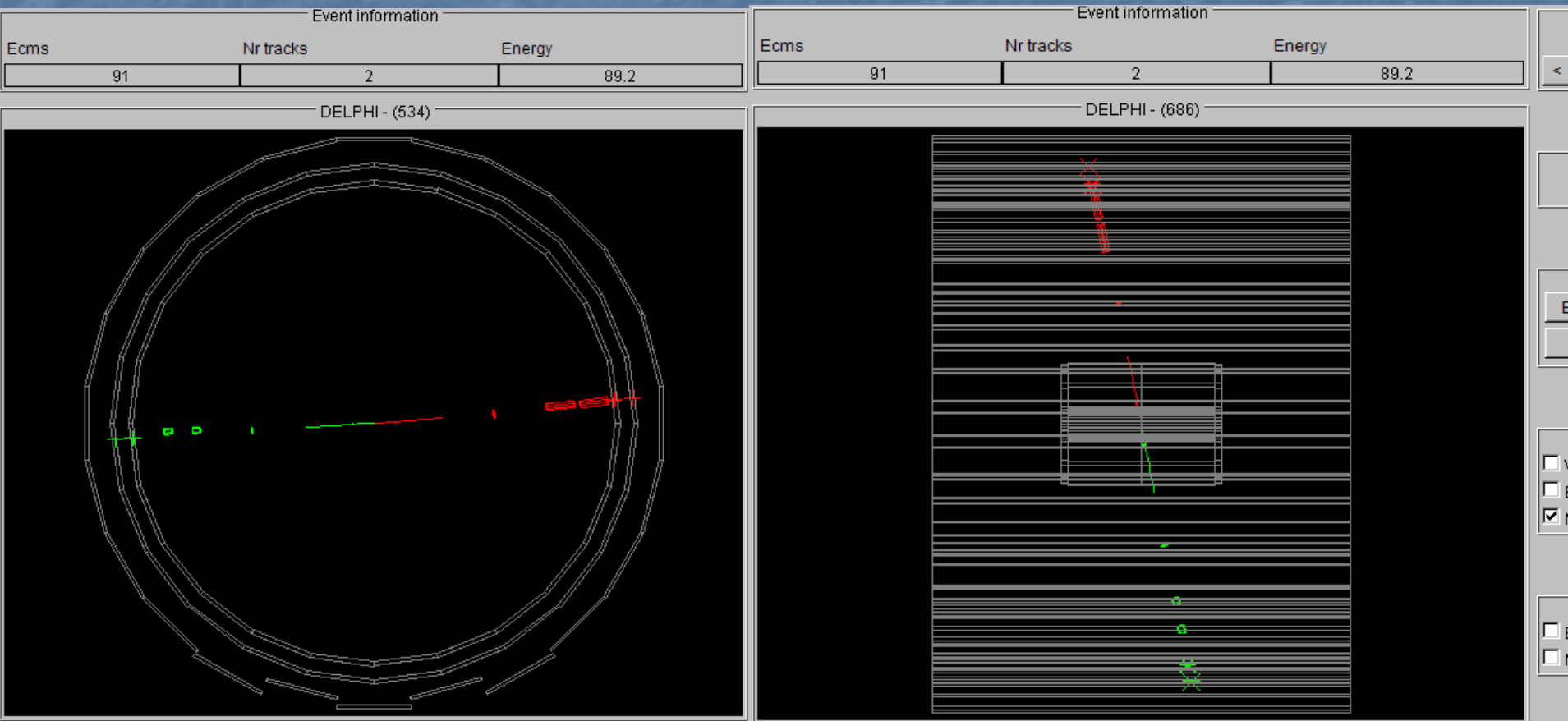
Riconoscimento degli eventi: $Z^0 \rightarrow e^-e^+$

Decadimento a 2 corpi \Rightarrow 2 tracce isolate e allineate
Vengono assorbite nel calorimetro elettromagnetico



Riconoscimento degli eventi: $Z^0 \rightarrow \mu^- \mu^+$

Decadimento a 2 corpi \Rightarrow 2 tracce isolate e allineate
Attraversano tutto il rivelatore e sono visti dalle
camere esterne



Conclusioni

- Gli acceleratori sono gli strumenti necessari per produrre e studiare le particelle elementari
- L' energia è indispensabile sia per produrre oggetti più pesanti che per ottenere strumenti di indagine più efficaci
- Le particelle benché piccole si possono "vedere"

Conclusioni

- La storia e l'utilizzazione dei rivelatori di particelle è senza fine
- la complessità e la dimensione degli esperimenti sta raggiungendo dei valori incredibili (frequenza degli eventi, dimensioni, numero di persone partecipanti all'esperimento ...)
- Le applicazioni dei rivelatori di HEP nella vita di tutti i giorni sono rilevanti particolarmente in medicina nucleare (rivelatori per PET), fisica dei materiali, biologia.

C'è bisogno di
nuovi esperimenti
e di nuove idee...

Le idee vengono soprattutto dai giovani...
questo è un invito rivolto a tutti voi!!!

