

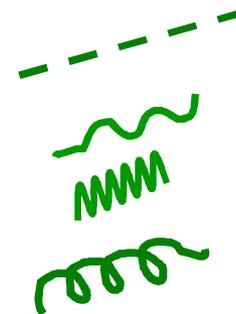
Particelle elementari e campi mediatori

4 interazioni fondamentali (e mediatori corrispondenti):

	campo mediatore	intensita'
1) gravitazionale(ad es. moti planetari);	gravitazionale	10^{-40}
2) debole (ad es. decadimento beta);	W/Z	10^{-5}
3) elettromagnetica;	fotone	10^{-2}
4) forte (ad es interazione tra nucleoni).	Gluone	1

Anche i campi mediatori delle interazioni sono particelle e possono essere prodotti e misurati

- Il gravitone ??
- I W/Z
- Il fotone
- Il gluone



La scoperta dei bosoni W e Z



The Nobel Prize in Physics 1984

"for their decisive contributions to the large project, which led to the discovery of the field particles W and Z, communicators of weak interaction"



Carlo Rubbia

🕒 1/2 of the prize

Italy

CERN
Geneva, Switzerland

b. 1934



Simon van der Meer

🕒 1/2 of the prize

the Netherlands

CERN
Geneva, Switzerland

b. 1925



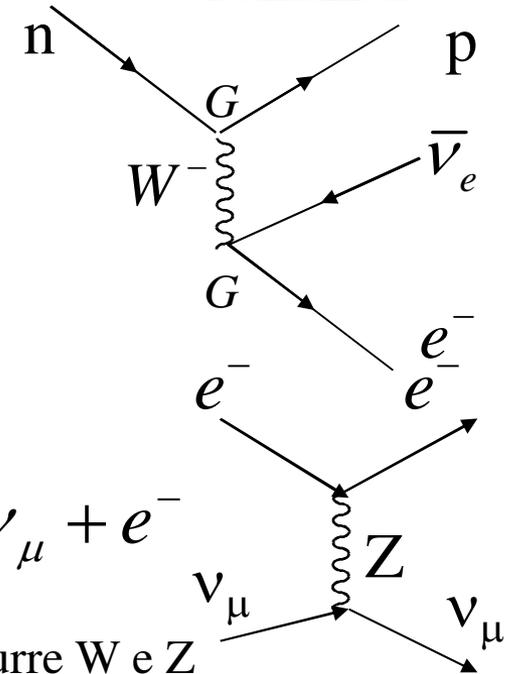
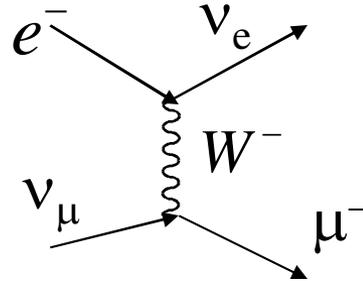
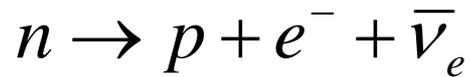
"for their decisive contributions to the large project, which led to the discovery of the field particles W and Z, communicators of the weak interaction"

Le interazioni deboli:

una storia iniziata con E. Fermi nel 1934



Il decadimento beta e le correnti deboli cariche:



1973 Scoperta delle correnti deboli neutre

e teoria della unificazione elettrodebole: $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$

In queste interazioni le energie in gioco sono troppo basse per produrre W e Z come particelle: essi sono mediatori "virtuali". Tuttavia da queste misure

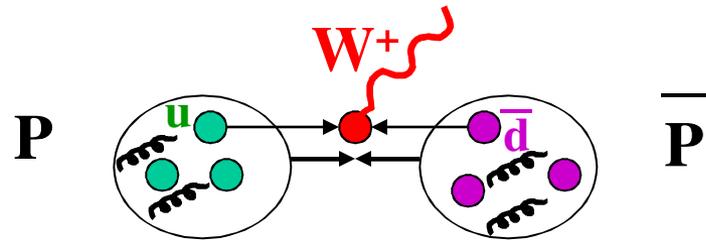
e' possibile predire la loro massa: **$m_W = 60-80 \text{ GeV}$, $m_Z = 75-95 \text{ GeV}$**

All'epoca, l'energia agli acceleratori era tale da generare masse di max di 30 GeV.

Se invece di far collidere particelle su bersaglio fisso se facciamo collidere fasci di particelle l'uno contro l'altro l'energia utile per creare masse e':

$$E_{cm} = 2E_{fascio}$$

Protone antiprotone: collisioni quark-antiquark (dominanti)



$$u + \bar{d} \rightarrow W^+$$

$$\bar{u} + d \rightarrow W^-$$

$$u + \bar{u} \rightarrow Z$$

$$d + \bar{d} \rightarrow Z$$

Richieste sull'energia:

Solo il 50% dell'energia del protone e dell'antiprotone è trasportata dai quark (uud) e antiquark ($\bar{u} \bar{u} \bar{d}$):

In media : energia del quark $\approx \frac{1}{6}$ (energia del protone)

➡ Energia del collider $\approx 6 \times$ massa $W/Z \approx 500 - 600 \text{ GeV}$

Il processo di produzione W/Z è raro \rightarrow tanti protoni e antiprotoni in condizione di collidere \rightarrow alta luminosità L :

Eventi/s = $L \sigma [s^{-1}]$ ($L \equiv$ luminosità: caratteristica dell'acceleratore)

Ad es. per $p + \bar{p} \rightarrow Z \rightarrow e^+ e^-$, $\sigma \sim 50 \text{ pb} = 50 \cdot 10^{-36} \text{ cm}^2$

➡ 1 evento / giorno $\Rightarrow L \approx 2.5 \times 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Acceleratori al CERN nel 1976

- 26 GeV proton synchrotron (PS) in operazione dal 1959
- 450 GeV proton synchrotron (SPS) appena partito, quindi utilizzandolo come collisionatore di protoni e antiprotoni circolanti in verso opposto nello stesso campo magnetico l'energia a disposizione e':

$E_{cm} = 450 + 450 \text{ GeV} = 900 \text{ GeV}$ sufficiente per produrre W e Z

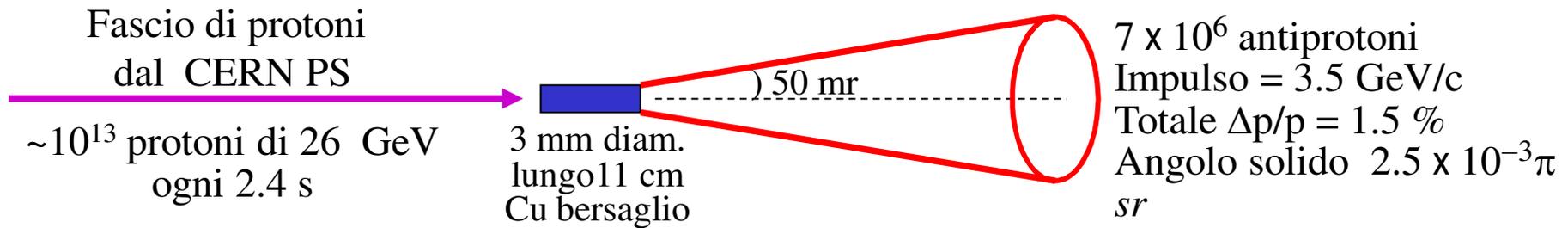


Tunnel SPS

La produzione di antiprotoni

Per ottenere $L \geq 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bisogna produrre tanti antiprotoni (3×10^{10} al giorno) e anche molto collimati

Produzione di antiprotoni:



La dispersione angolare e in impulso degli antiprotoni eccessiva:
prima di accelerarli a 450 GeV bisogna ridurla di un fattore $\geq 10^8$:

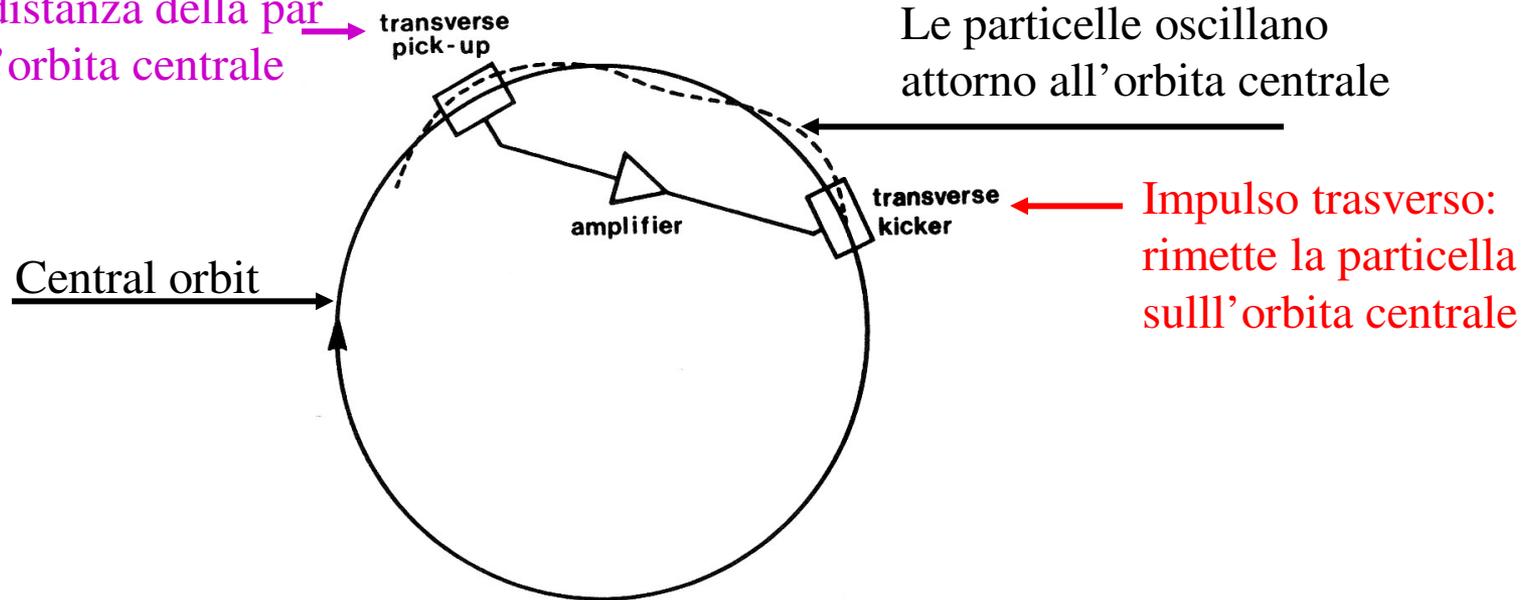
⇒ Raffreddamento stocastico

“Stochastic” cooling

(inventato al CERN da Simon van der Meer nel 1972)

Esempio: cooling del moto orizzontale

Misura la distanza della particella dall'orbita centrale



Il sistema the pick-up misura la distanza media dall'orbita centrale di un gruppo di particelle

Tre sistemi indipendenti di pick-up – kicker :

- moto orizzontale
- **moto verticale**
- **moto longitudinale (diminuisce $\Delta p/p$)**
(il segnale generato dal pick-up e' proporzionale a Δp)

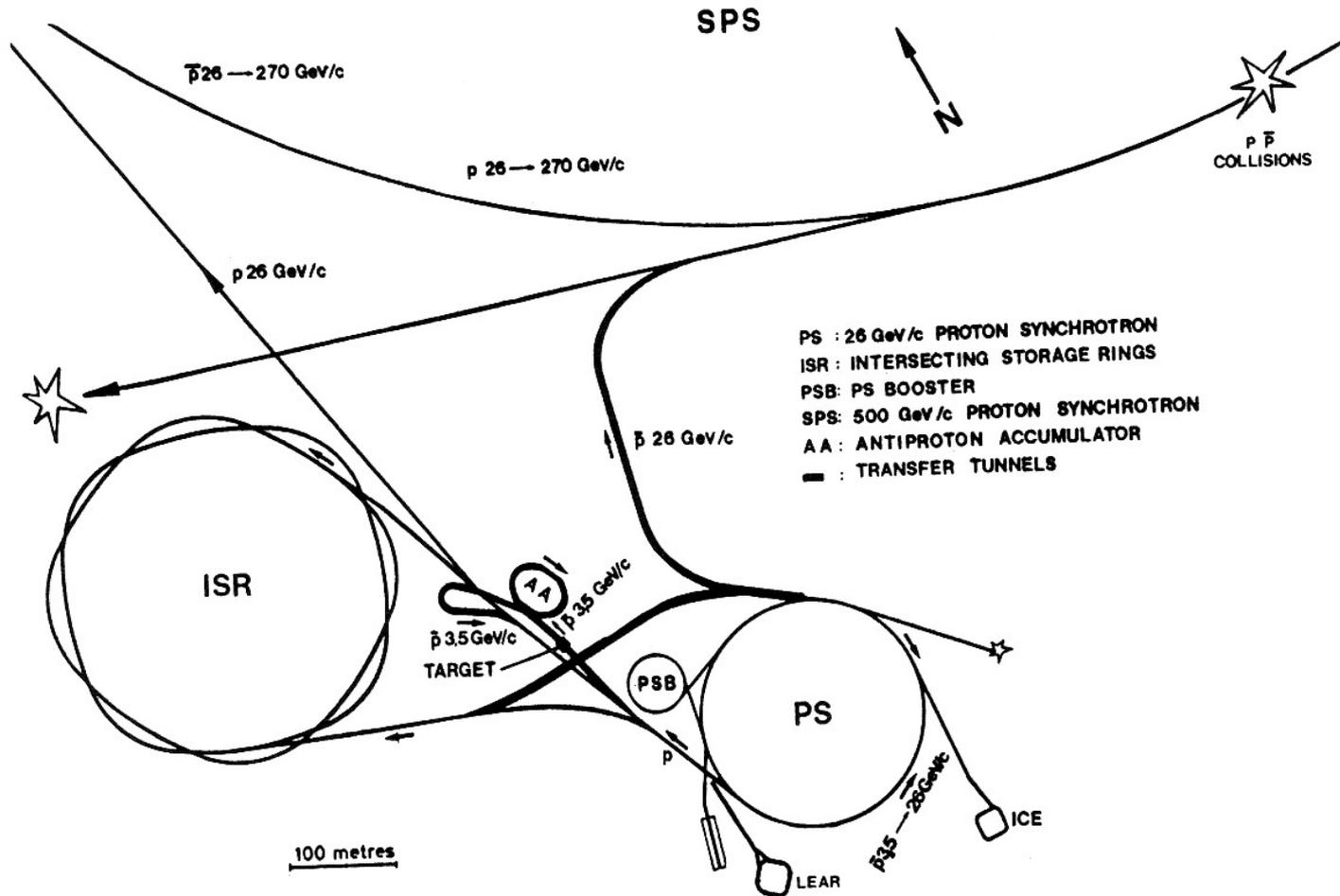
L'acceleratore di antiprotoni del CERN (AA)

Un anello di grande apertura per accumulare e raffreddare antiprotoni di $3.5\text{GeV}/c$



(durante la costruzione)

Il complesso degli acceleratori del CERN all'inizio del 1980



Storia del collider protone – antiprotone del CERN, 1981 - 90

Year	Collision Energy (GeV)	Peak luminosity ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Integrated luminosity (cm^{-2})
1981	546	$\sim 10^{27}$	2.0×10^{32}
1982	546	5×10^{28}	2.8×10^{34}
1983	546	1.7×10^{29}	1.5×10^{35}
1984-85	630	3.9×10^{29}	1.0×10^{36}
1987-90	630	$\sim 2 \times 10^{30}$	1.6×10^{37}

← Scoperta W
← Scoperta Z

1991: Fine delle operazioni

Il rivelatore UA1

Le particelle da misurare per la scoperta di W e Z sono elettroni, muoni e neutrini:

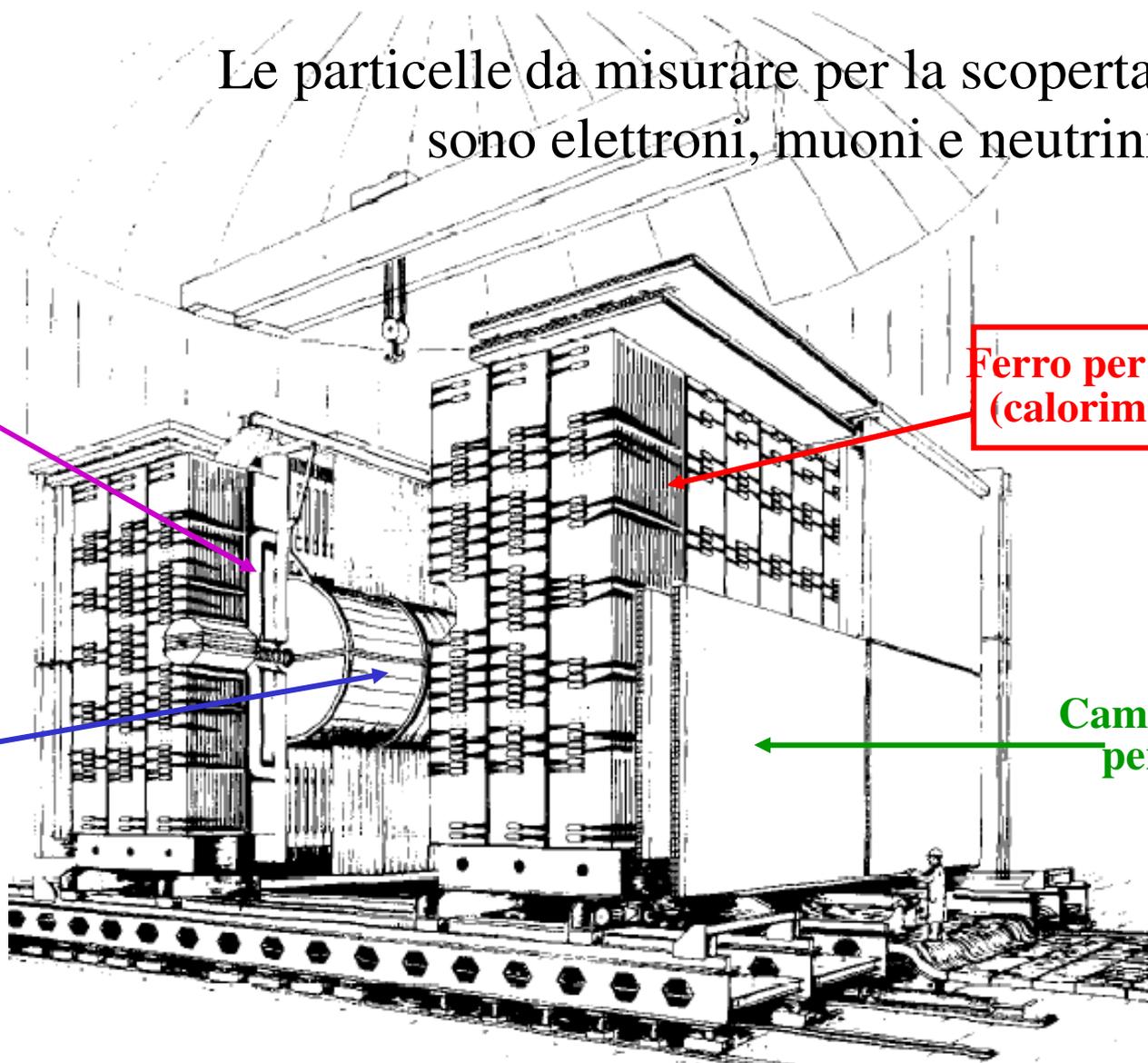
**Bobina del
magnete**

**Ferro per ritorno campo
(calorimetro adronico)**

**rivelatore
centrale
di tracce
cariche**

**Camere esterne
per i muoni**

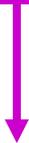
(nella figura le due meta' del magnete dipolare sono aperte)



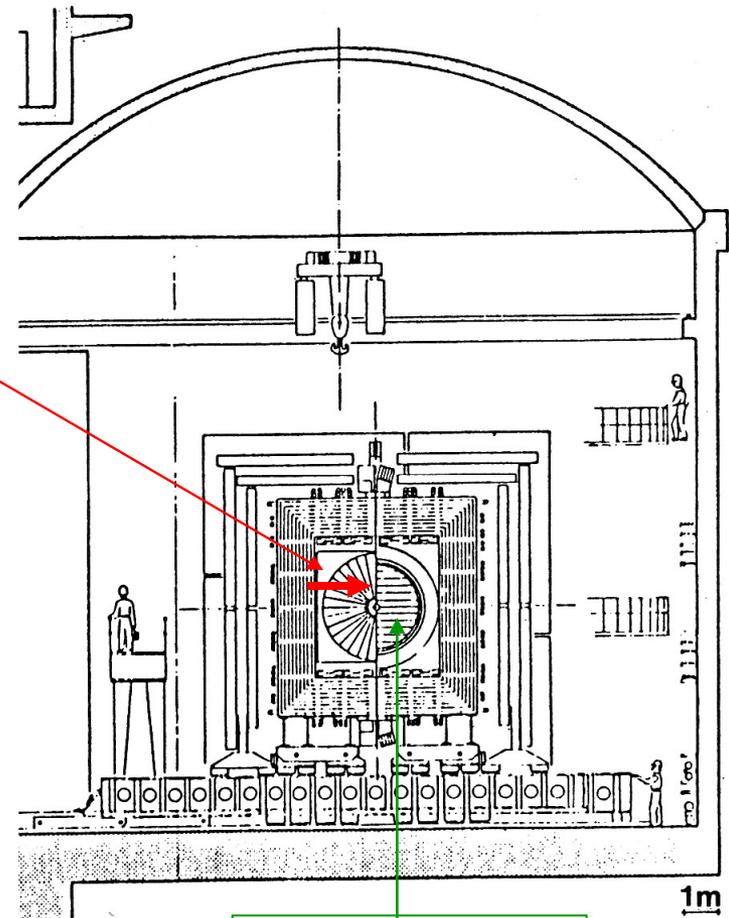
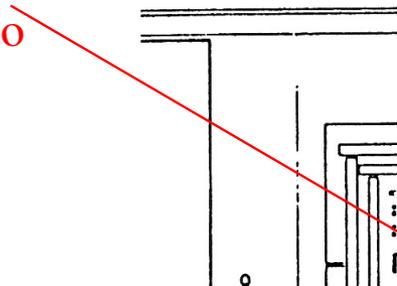
Vista normale
All'asse dei fasci



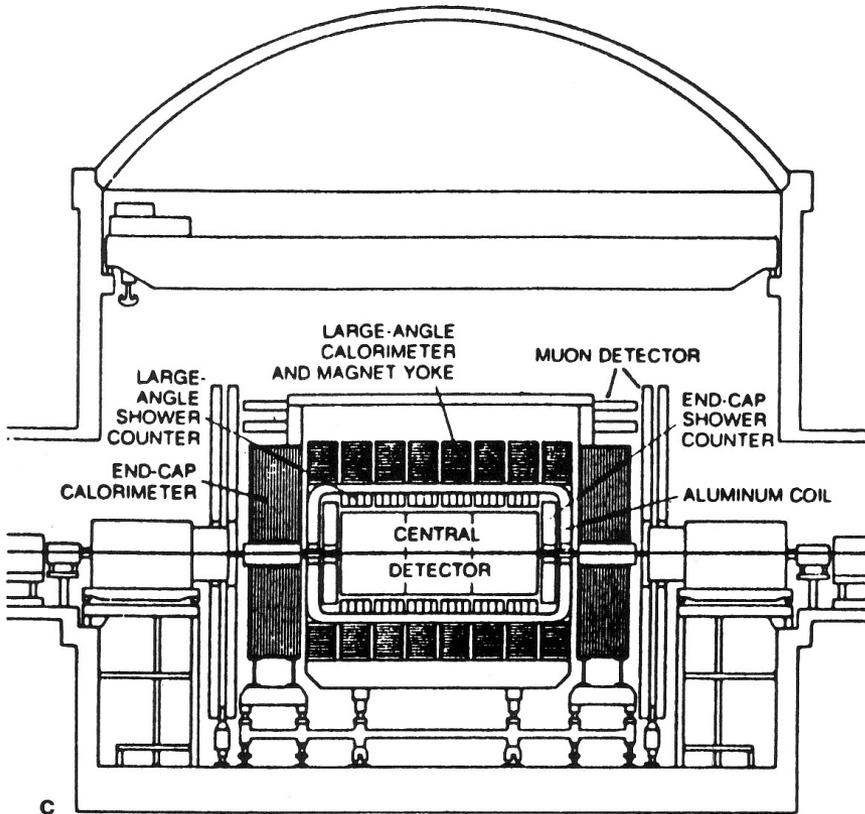
Sezione verticale
lungo l'asse dei fasci



direzione
Campo magnetico

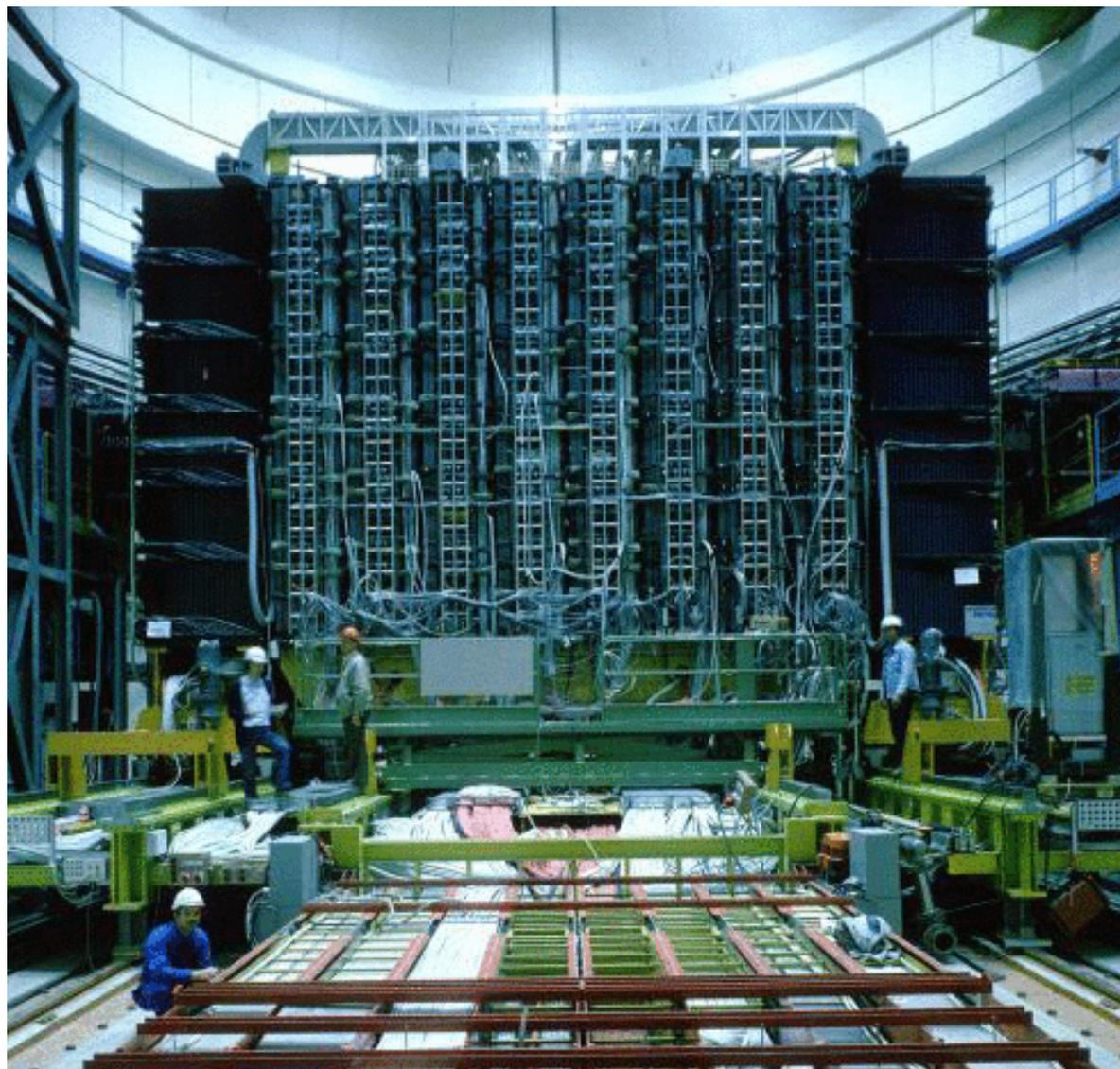


b
Calorimetro
elettromagnetico
centrale

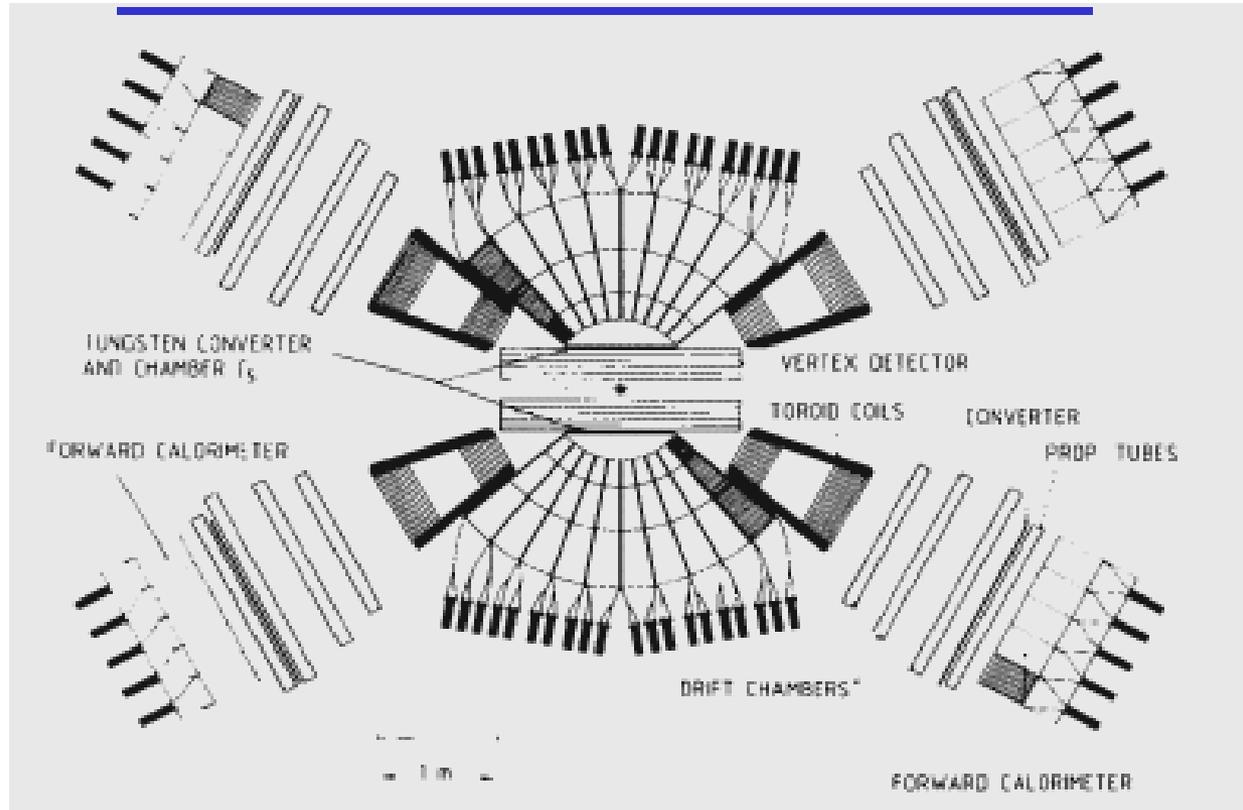


c

UA1 durante l'assemblaggio



Il rivelatore UA2 1981 - 85

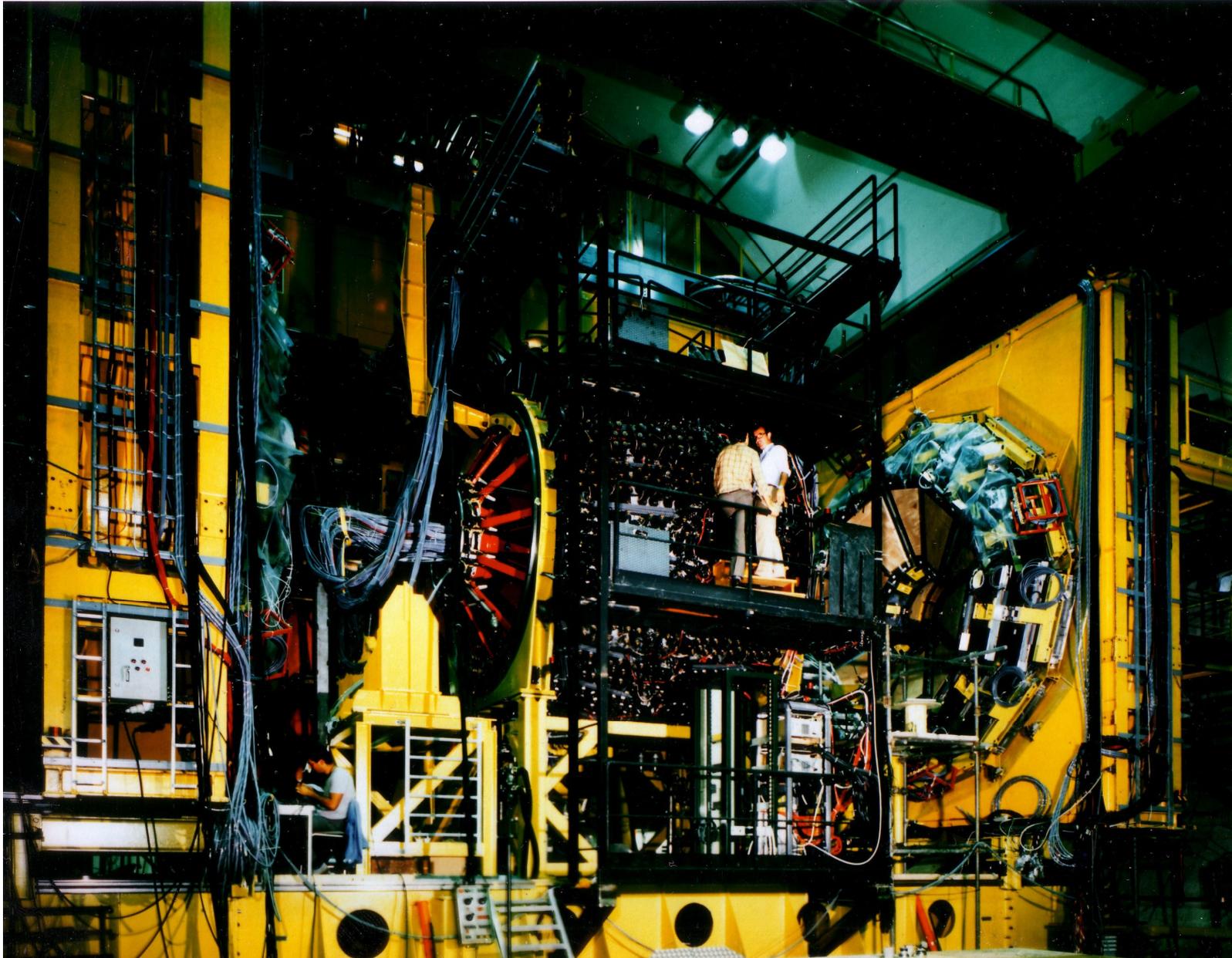


**La regione centrale : il rivelatore di tracce (“vertex detector”);
il rivelatore “pre-shower”
I calorimetri elettromagnetico e adronico
non c’è campo magnetico**

**Regione $20^\circ - 40^\circ$: campo magnetico toroidale;
rivelatori di tracce;
“pre-shower” e calorimetro elettromagnetico.**

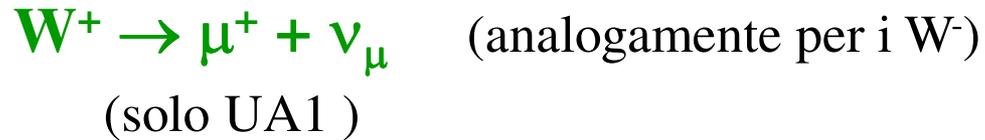
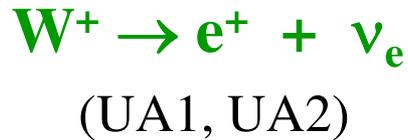
Non c’è misura dei muoni

UA2 durante l'assemblaggio



LA SCOPERTA DEL W

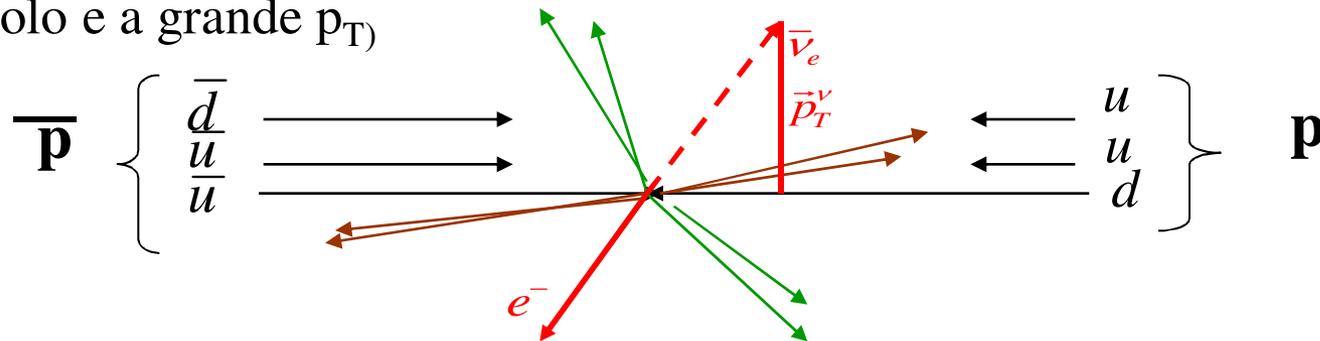
Decadimenti studiati:



Segnale da $W \rightarrow e \nu$:

- un elettrone isolato con grande impulso trasverso: $p_{Te} \sim m_W/2$
- la distribuzione in p_T ha un max a $m_W/2$ (“picco Iacobiano”)
- grande impulso trasverso “mancante” dal neutrino non misurato: $p_{T\nu} \sim m_W/2$

(W e' prodotto dall'annichilazione di quark-antiquark collineari, e.g. $\bar{u} + d \rightarrow W^+$, con l'asse dei fasci quindi l'elettrone e il neutrino del decadimento emessi a grande angolo e a grande p_T)



NOTA

L'impulso longitudinale mancante non puo' essere misurato a causa delle molte particelle di grande energia prodotte nell'interazione che sono emesse nel tubo a vuoto dell'acceleratore e quindi non misurabili

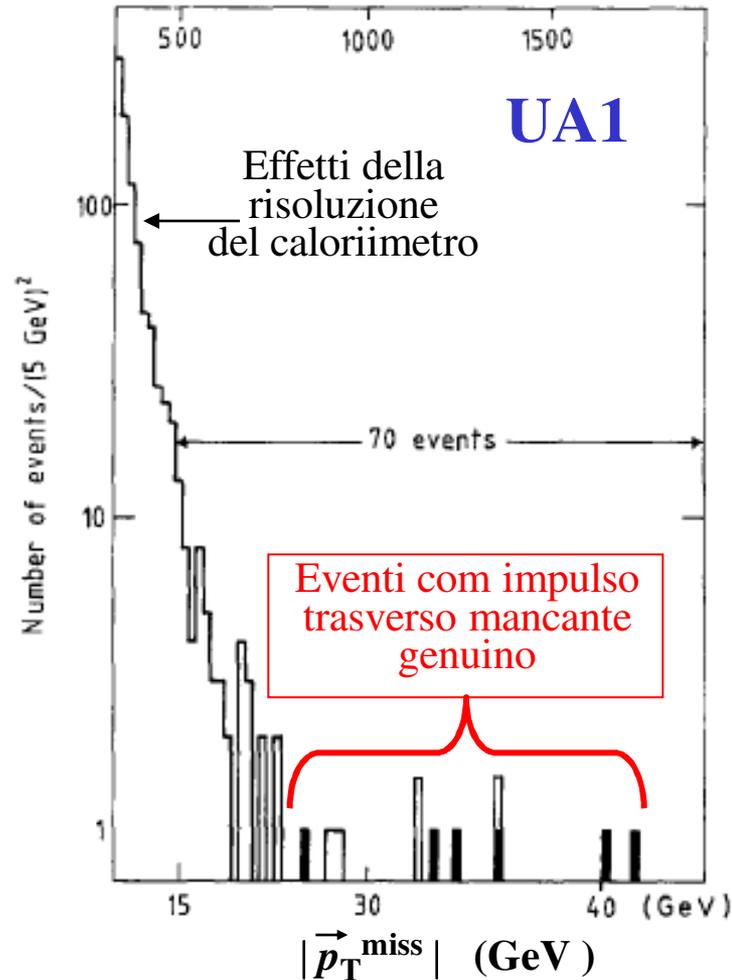
Impulso trasverso mancante (\vec{p}_T^{miss})

- l'impulso totale \vec{p} dell'evento (contributi neutri e carichi) si costruisce con il contributo
- delle varie celle del calorimetro con deposito > 0

Definizione:

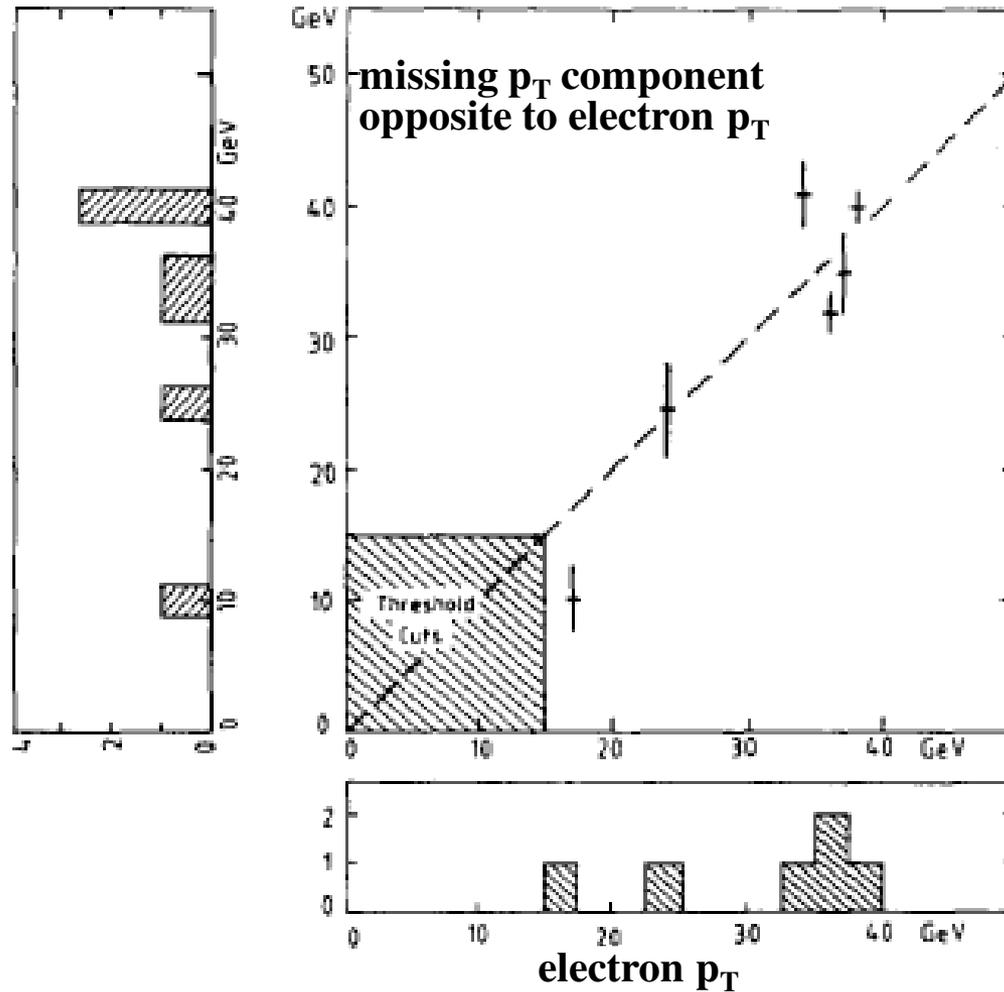
$$\vec{p}_T^{\text{miss}} + \sum_{\text{cells}} \vec{p}_T = 0$$

(conservazione dell'impulso
nel piano perpendicolare
all'asse del fascio)



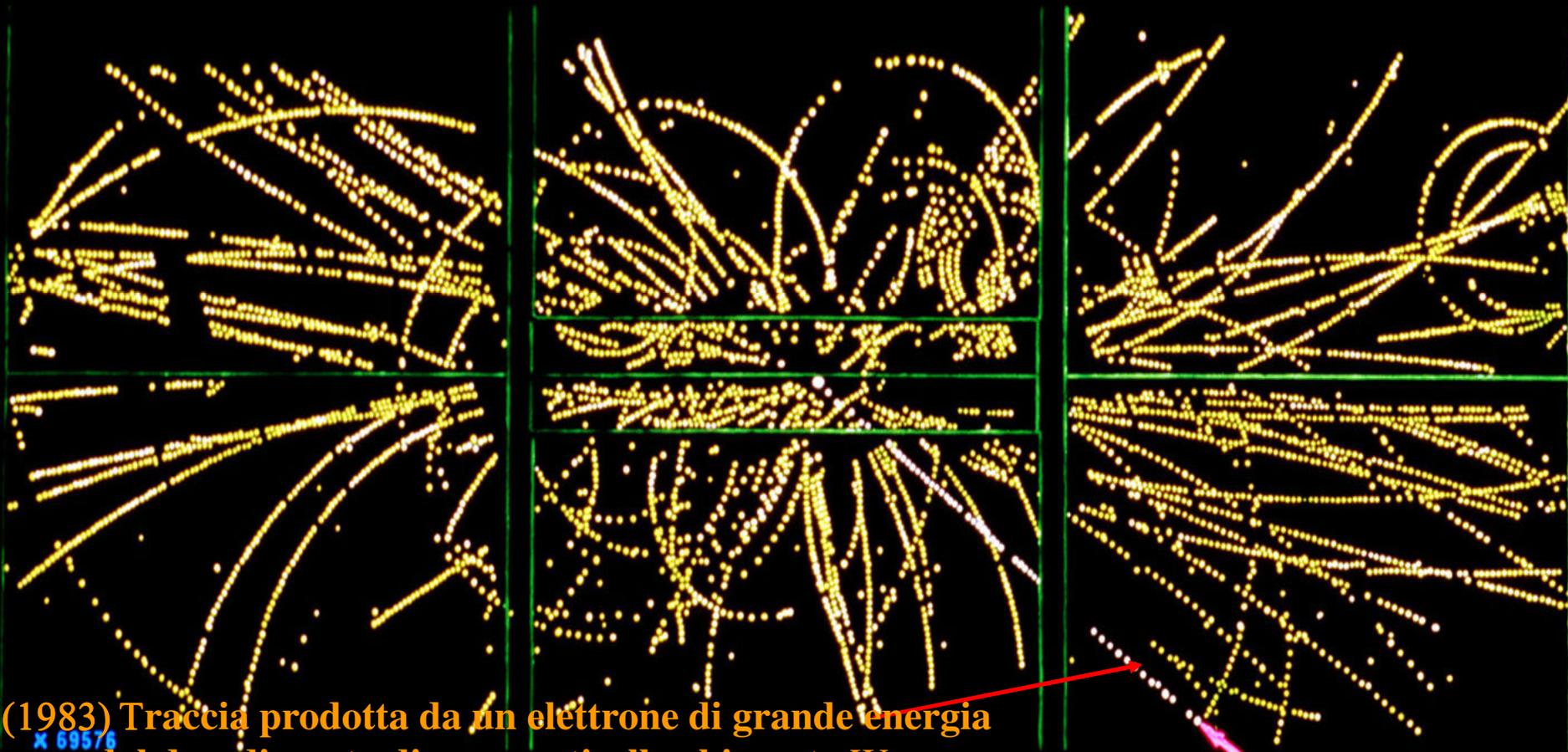
Sei eventi
contengono
un elettrone
di grande
impulso
trasverso.

UA1: correlazione tra p_T dell'elettrone e p_T mancante



Sei eventi con p_T elettrone grande bilanciato con grande p_T mancante consistente con il decadimento $W \rightarrow e \nu$
(Seminario al CERN del 20 gennaio, 1983)

EVENT 2958. 1279.

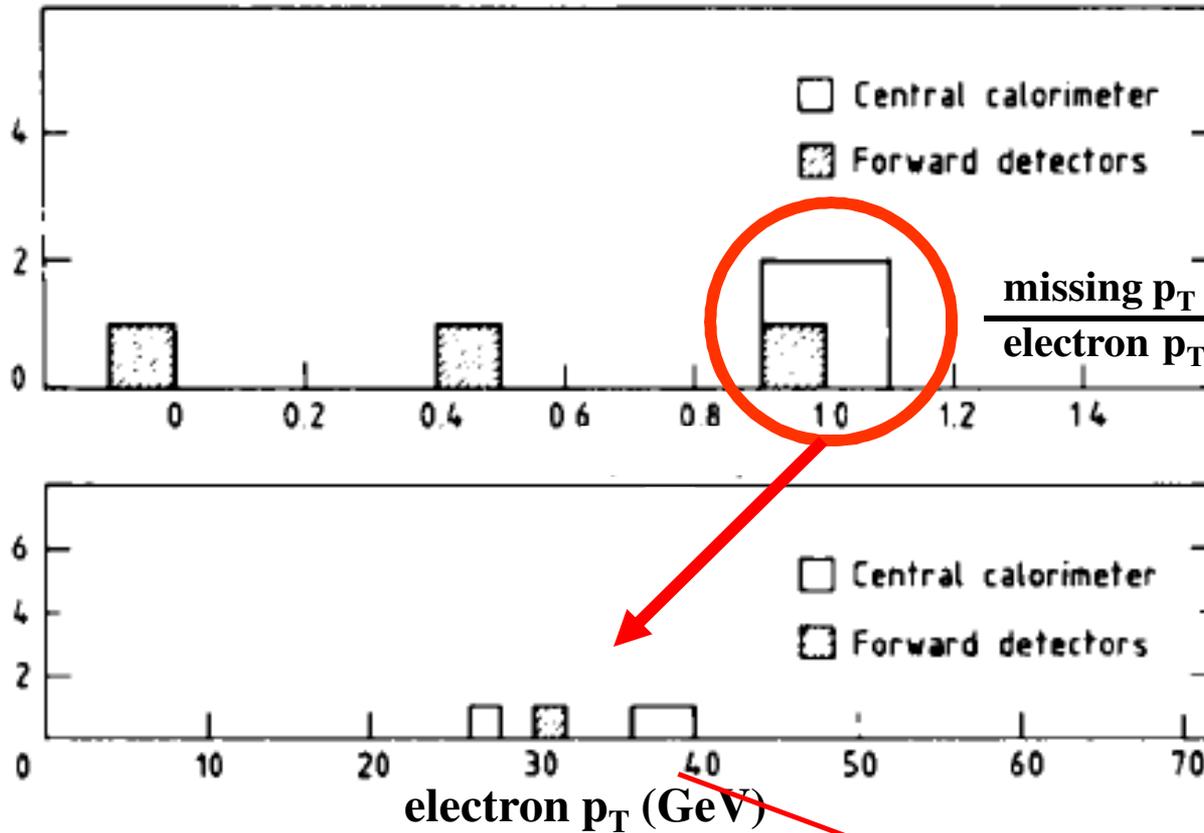


(1983) Traccia prodotta da un elettrone di grande energia
dal decadimento di una particella chiamata W
necessaria per il completamento della teoria di Fermi
delle interazioni deboli

x 69576

UA2: risultato presentato al CERN 21 gennaio, 1983

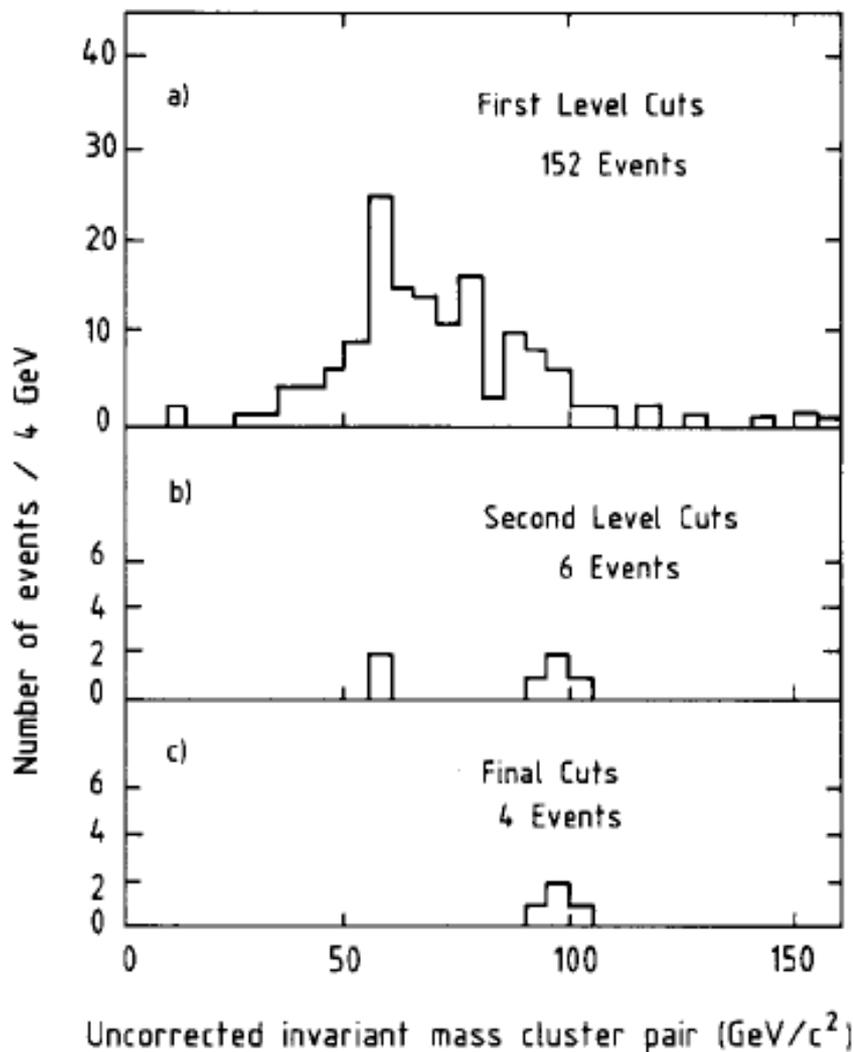
Sei eventi con un elettrone con $p_T > 15 \text{ GeV}$



Impulso trasverso $\sim M_W/2$

UA1: osservazione di $Z \rightarrow e^+ e^-$

(Maggio 1983)

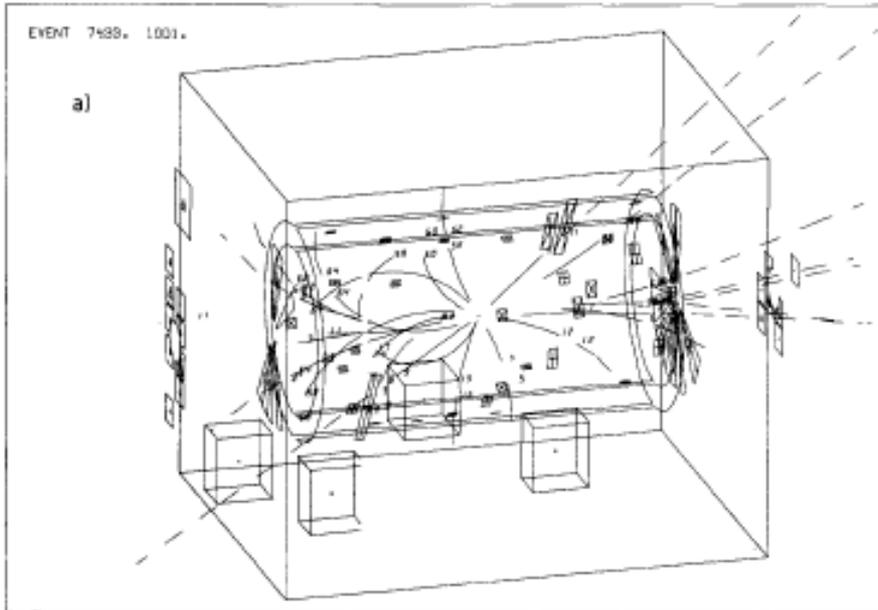


Due depositi localizzati di energia ($p_T > 25$ GeV) nel calorimetro elettromagnetico (elettroni o fotoni)

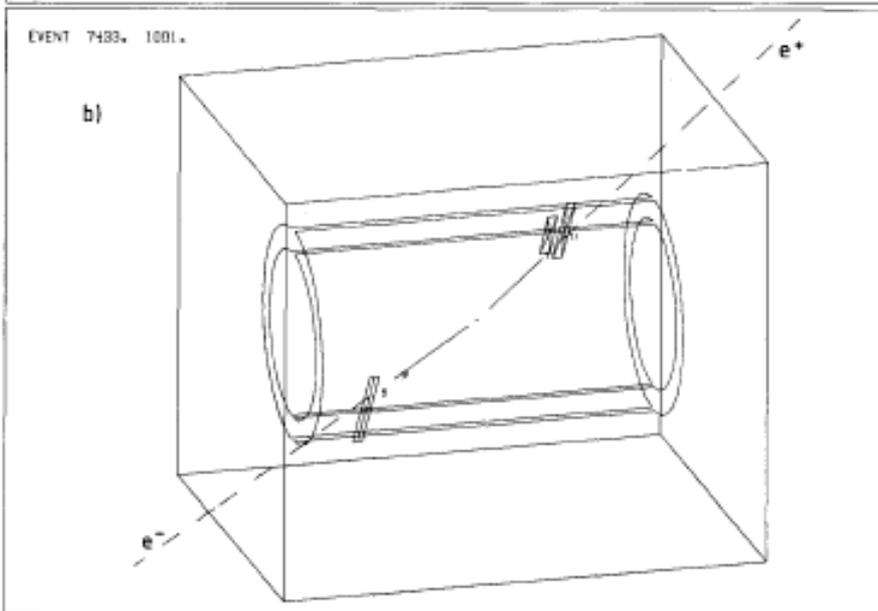
**Tracce cariche isolate con $p_T > 7$ GeV
Con almeno una che punta a un deposito calorimetrico**

**Entrambe le tracce con $p_T > 7$ GeV
puntano a un deposito calorimetrico**

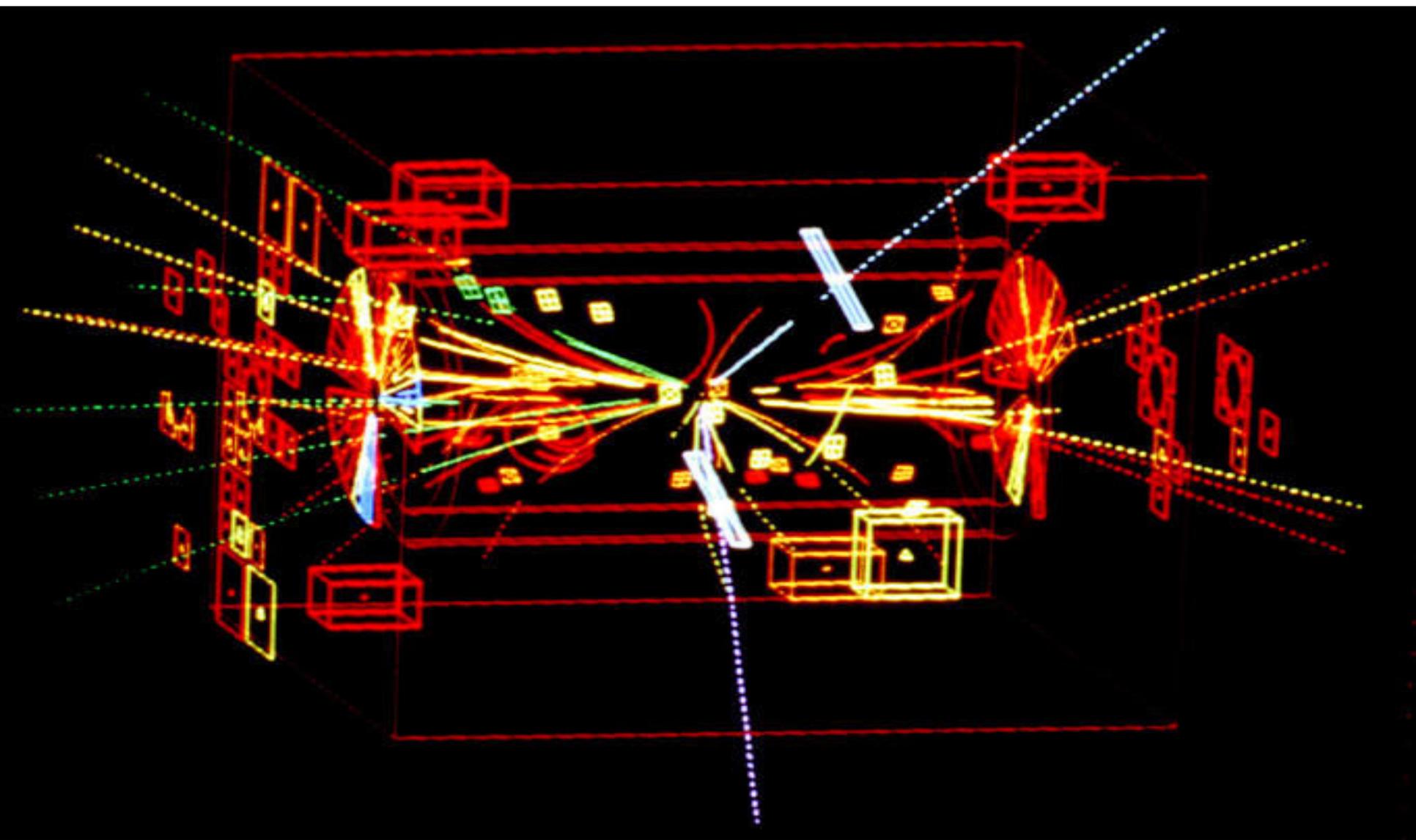
UA1 Z $\rightarrow e^+ e^-$ event



Evento con tutte le tracce e i depositi nel calorimetro elettromagnetico.

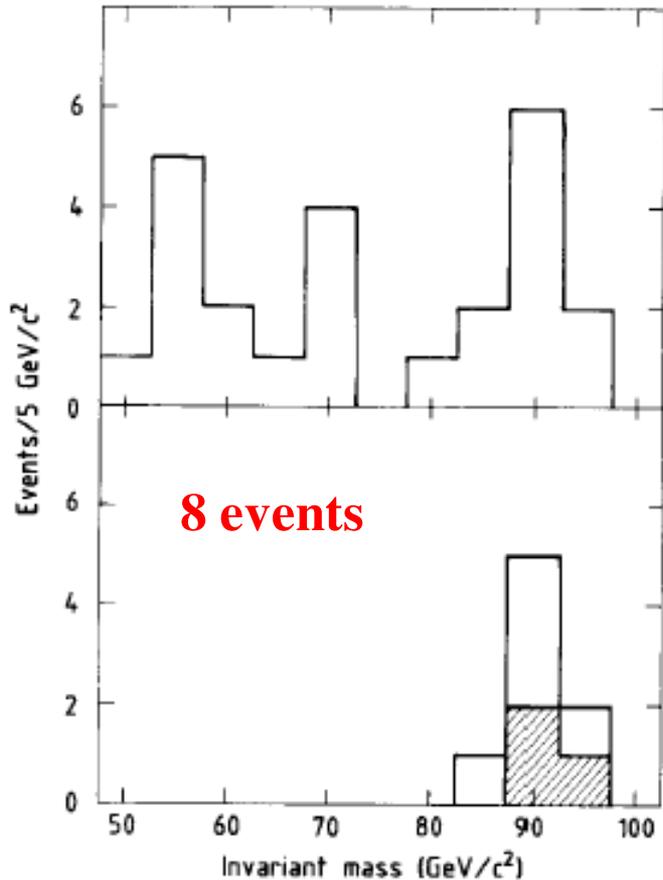


Richiesta che p_T sia > 2 GeV



UA2: osservazione di $Z \rightarrow e^+ e^-$

Giugno 1983)



Due depositi di energia localizzati nel calorimetro elettromagnetico con $p_T > 25$ GeV (elettroni o fotoni)

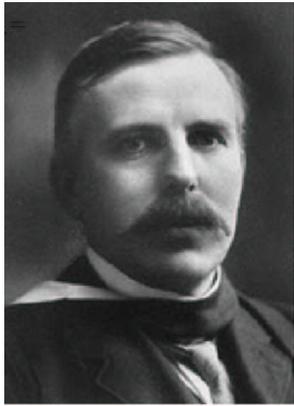
Una traccia carica isolata che punta ad almeno uno dei due depositi calorimetrici

 Track identified as an isolated electron pointing to both energy clusters

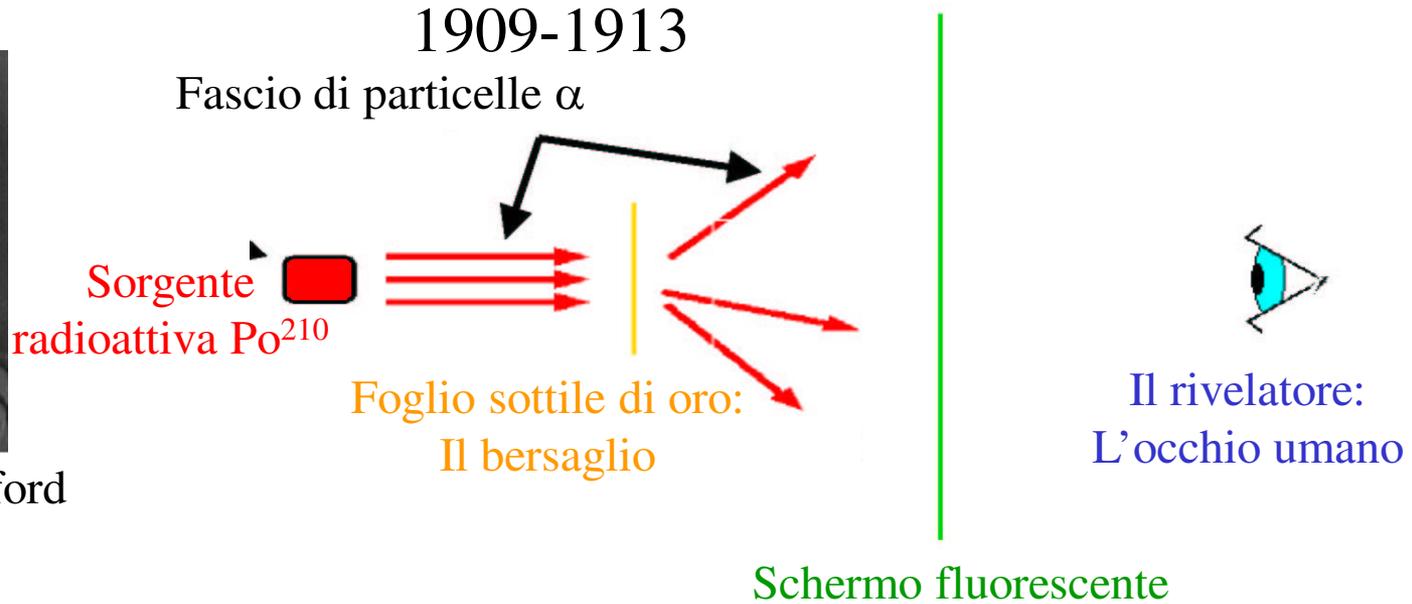
$$m_Z = 91.9 \pm 1.3 \pm 1.4 \text{ GeV}$$

(stat) (syst)

L'indagine sulla struttura della materia

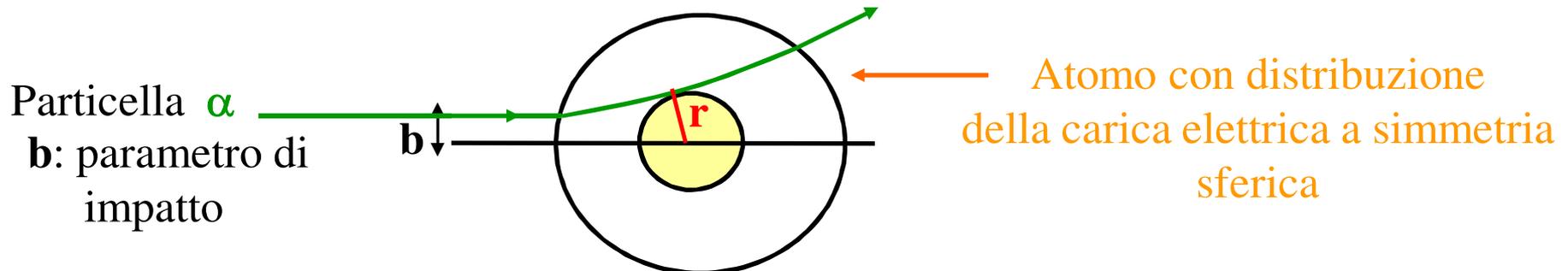


Ernest Rutherford



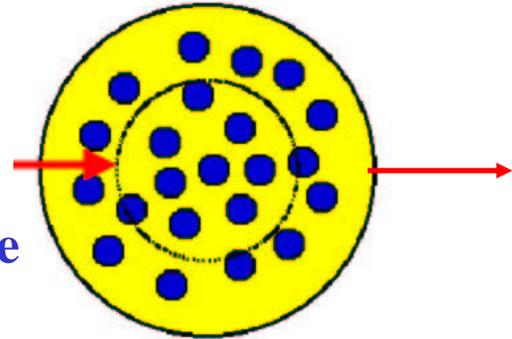
Particelle α : nuclei di **elio** (2 protoni e 2 neutroni) con carica elettrica +2 emessi dal Polonio con una velocità pari a $\sim 0.05 c$ (c velocità della luce)

La deflessione delle particelle α negli atomi è causata dalla **forza di Coulomb**

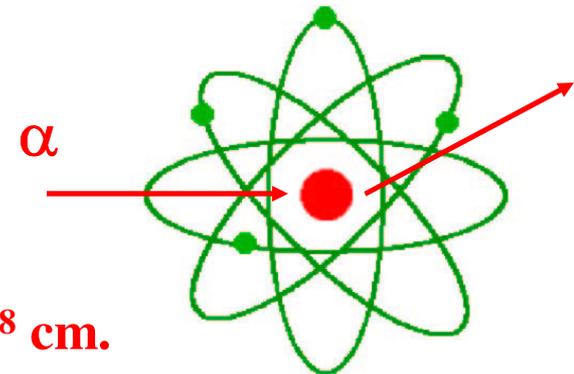


La particella α sente solo la forza di Coulomb dovuta alla carica contenuta nella sfera di raggio r (dal teorema di Gauss)

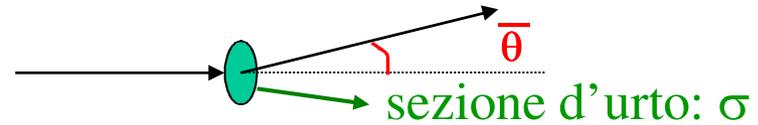
Nel modello atomico di Thomson la carica positiva e' distribuita sull'intero volume dell'atomo, cosi' come gli elettroni. Quindi, a qualunque distanza, **la particella α vede mediamente una carica nulla** dunque la forza e' nulla e la deviazione trascurabile



Le misure di Rutherford mostrarono invece che c'era un numero significativo di deviazioni anche a grande angolo in accordo con un modello dell'atomo **in cui la carica positiva pari a Ze e' concentrata in un volume molto piu' piccolo di quello dell'atomo: il nucleo il cui raggio e' $\sim 10^{-13}$ cm mentre quello dell'atomo e' $\sim 10^{-8}$ cm. Il nucleo, inoltre costituisce la quasi totalita' della massa dell'atomo: circa il 99.9%**

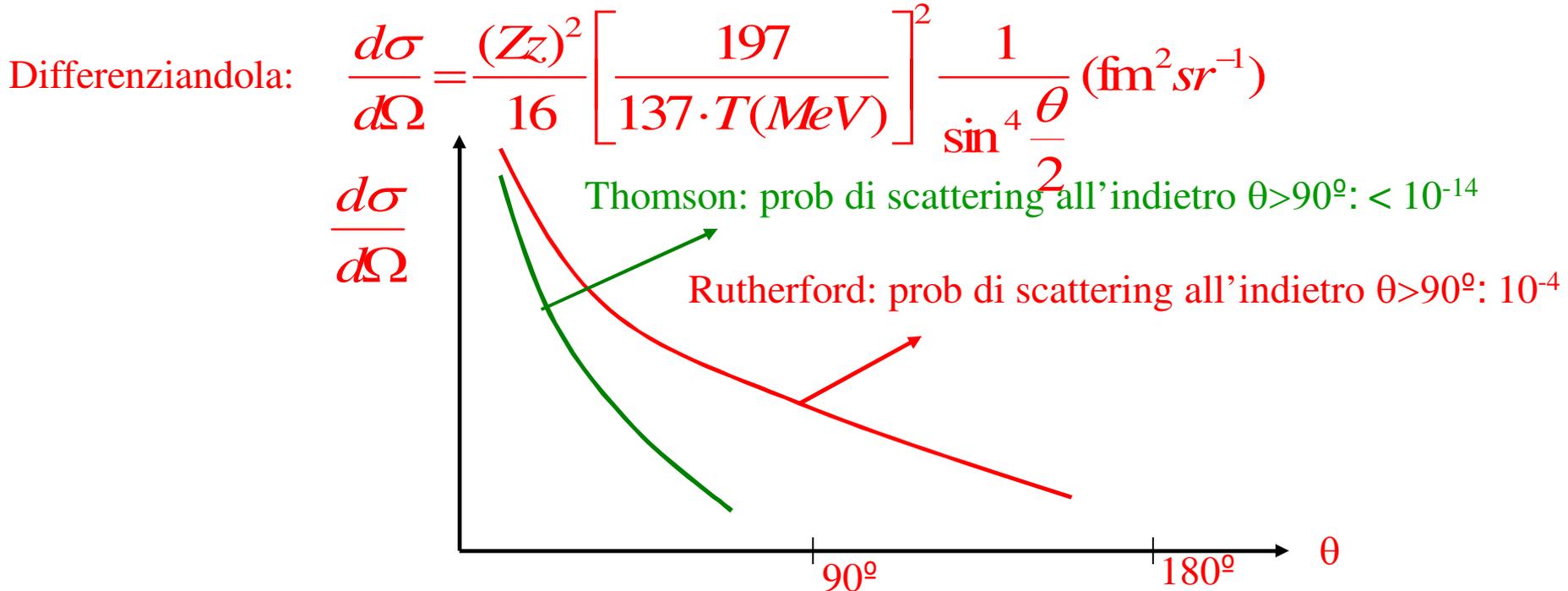


Quantitativamente



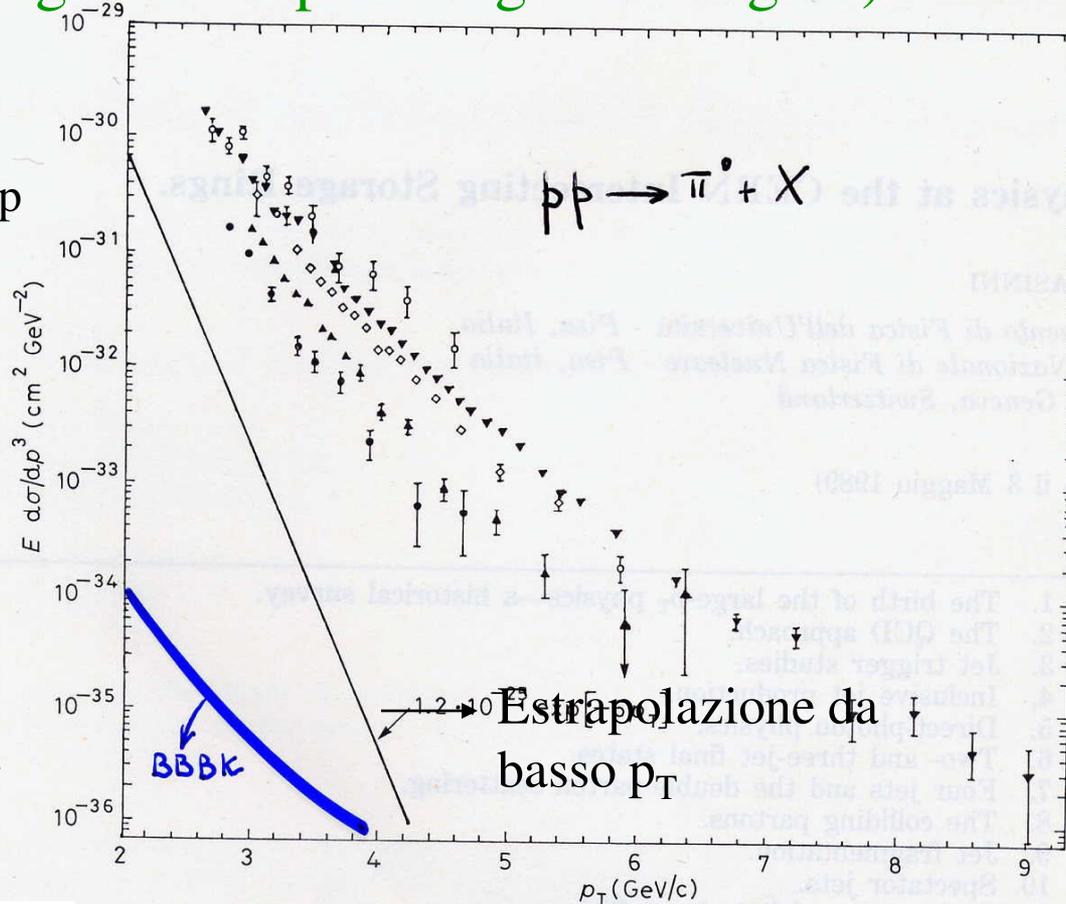
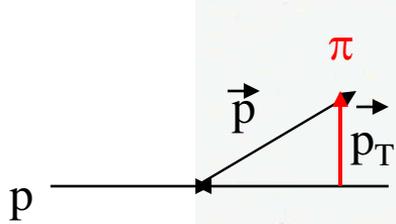
$$\sigma(\theta > \bar{\theta}) = \frac{\pi z^2 Z^2}{4} \left[\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right]^2 \frac{1}{T^2} \frac{1}{\tan^2 \frac{\bar{\theta}}{2}} = \frac{\pi z^2 Z^2}{4} \left[\frac{197}{137T(\text{MeV})} \right]^2 \text{fm}^2 \frac{1}{\tan^2 \frac{\bar{\theta}}{2}}$$

Se $T = 1 \text{ MeV}$, $\bar{\theta} = \pi/2$, $\sigma(\theta > \pi/2) = 1.6 \text{ fm}^2$, se $z=1$, $Z=1$



Le prime indicazioni di una nuova interazione (QCD) tra i costituenti del protone

Risultati dagli ISR al CERN (pp a $\sqrt{s}=23-62$ GeV) 1972:
 $pp \rightarrow \pi^0$ (di grande impulso trasverso) + X (grande impulso
 trasverso \Rightarrow grande impulso e grande angolo)



BBBK:
 interazione
 elettromagnetica
 tra quark

clusive π^0 yield at large p_T . The solid line is an exponential extrapolation from
 $p_T \leq 1 \text{ GeV}/c$ \bullet $\sqrt{s} = 23.5$ GeV, \blacktriangle $\sqrt{s} = 30.6$ GeV, \diamond $\sqrt{s} = 44.8$ GeV, \blacktriangledown $\sqrt{s} = 52.7$ GeV,
 \circ $\sqrt{s} = 62.4$ GeV.

$p_T < 2 \text{ GeV}/c$

-4 ordini di grandezza maggiore della previsione del modello BBBK;

NECESSITA' DI UN NUOVO TIPO DI INTERAZIONE
Simile all'elettrodinamica (Rutherford)
ma con una costante di accoppiamento maggiore di α

L'ipotesi dei costituenti (quark) era già stata introdotta negli anni 60 da Gell-Mann per spiegare la spettroscopia degli adroni:

I mesoni:qq

I barioni :qqq (es il protone: uud e antiprotone $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$)

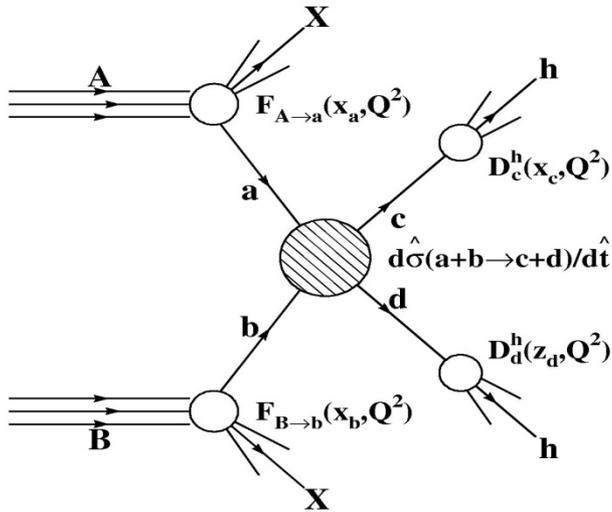
I quark hanno spin=1/2 e carica elettrica $Q=-1/3,2/3$

Nuova interazione → nuovo numero quantico (carica) che la governa:

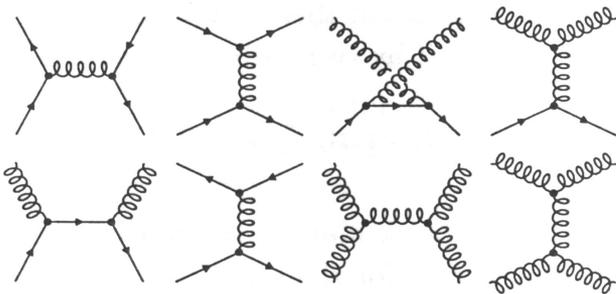
il COLORE:

Teoria della cromodinamica quantistica (QCD)

Sezioni d'urto di QCD in interazioni tra protoni

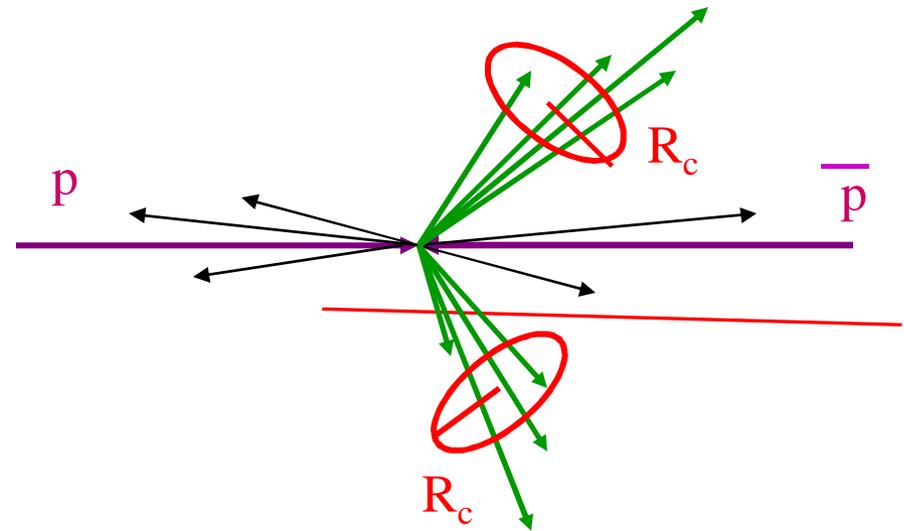
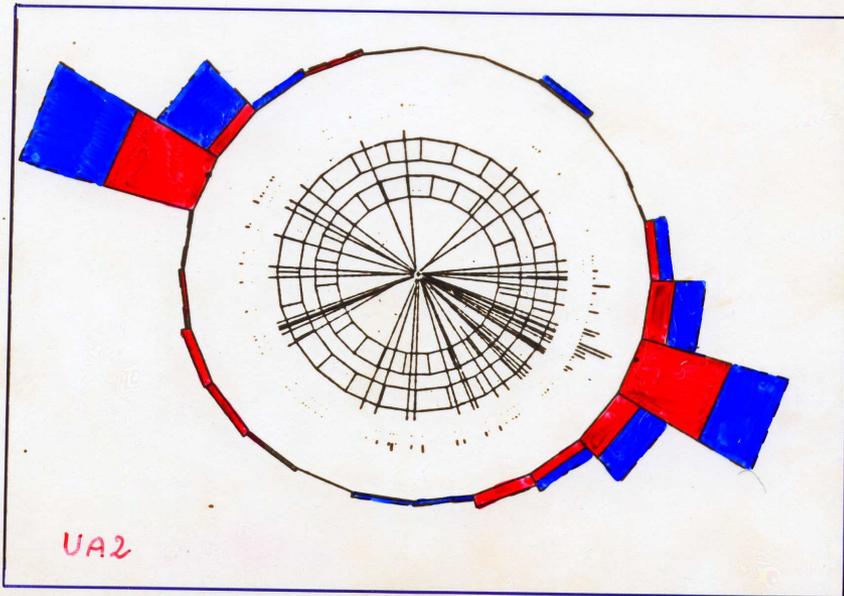
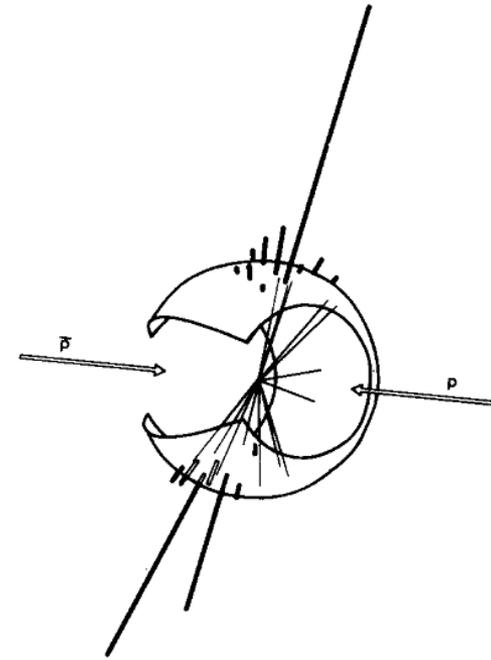
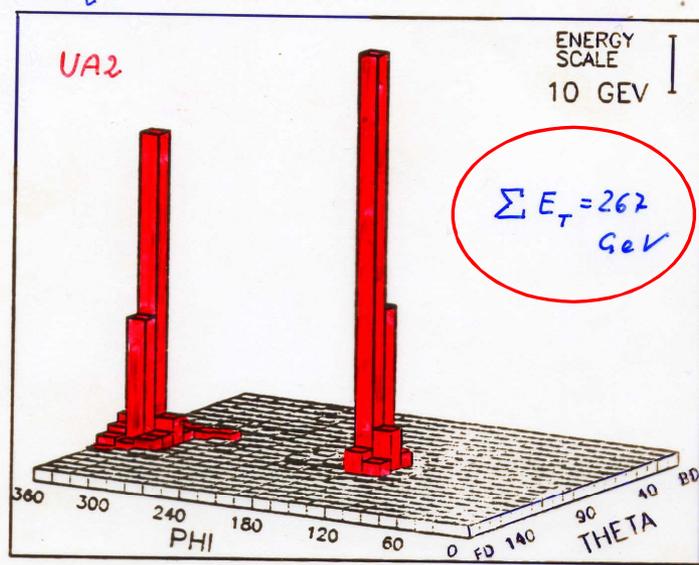


- L'interazione elementare dei costituenti degli adroni: quark (e gluoni)
- La frammentazione di quark e gluoni nello stato finale da' luogo a insiemi collimati di particelle , **i jet**, misurati dai rivelatori
- Le sezioni d'urto per produzione di jet dipendono dalla interazione elementare tra partoni e dalle funzioni di struttura e sono calcolabili.



Discrepanze tra predizioni e esperimento:

- **Nuovo effetto Rutherford?**
- **Nuova fisica?**



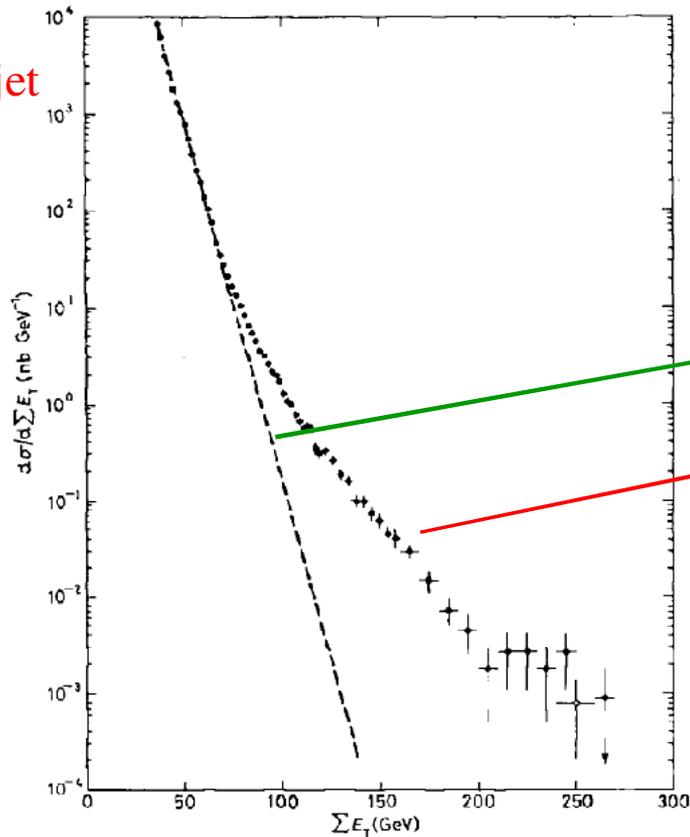
Jet di UA2
presa dati 1983

$$E_T = \sum E_i \sin \theta_i$$

1982 UA2 540 GeV: evidenza "alla Rutherford" di sottostrutture del protone

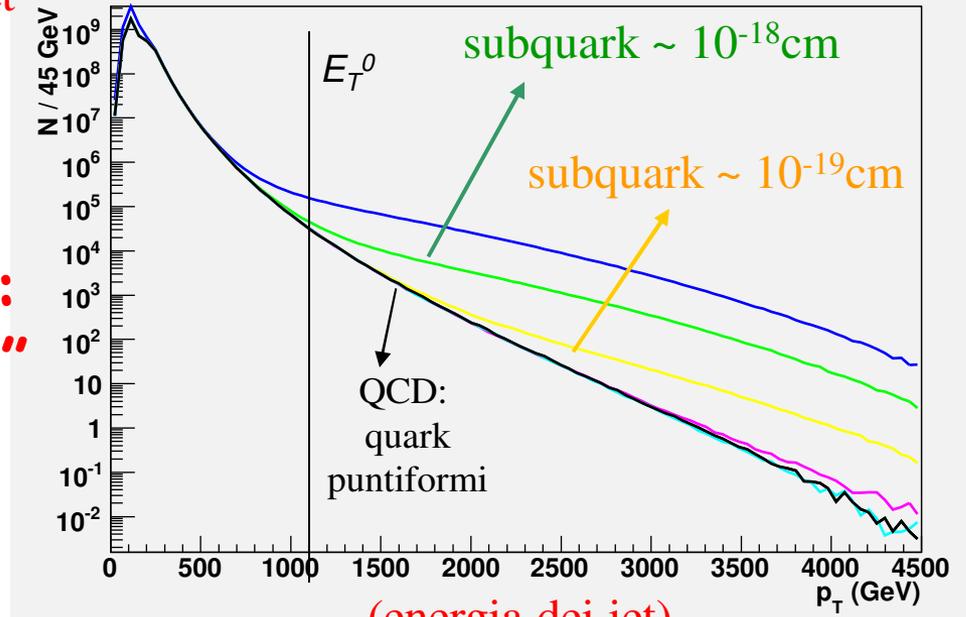
Il protone e' una distribuzione di materia uniforme

Il protone ha al suo interno strutture (quark)
molto piu' piccole



(energia dei jet)

Njet



(energia dei jet)

2010 ATLAS: 14000 GeV:
evidenza "alla Rutherford"
di sottostrutture
dei quark ???



Gli ultimi 30 anni sono stati fondamentali per la fisica delle particelle:

-W/Z

-QCD

•

•

-scoperta del quark top

-oscillazioni di neutrino

-connessioni con la cosmologia e l'astrofisica

LHC aprira' una nuova frontiera di energia e di possibili scoperte:

**il bosone di Higgs ,
nuove particelle,
struttura dei quark,**

...

Vedi presentazione di M. Mangano

Bibliografia

- “Particle physics, a very short introduction”
F.Close, Oxford University Press.
- ”Elementary particles building blocks of matter”
H. Fritzsche, World Scientific.
- ”In search of the ultimate building blocks”
G.t’Hooft, Cambridge University Press.
- ”Particles and waves”
C. Anastopoulos, Princeton University Press.
- ”Les quarks, histoire d’une decouverte”
D.Husson, ed. Ellispes.
- ”Antimatter”
F.Close, Oxford University Press.