

Scoperta e studio dei bosoni W e Z al collider protone – antiprotone del CERN

Luigi Di Lella

CERN e Dipartimento di Fisica, Pisa

- **Breve introduzione storica**
- **Il collider protone – antiprotone**
- **Esperimenti e risultati**

Giornata per Mario Calvetti ed Enrico Iacopini

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Firenze, 21 giugno 2018

Dicembre 1930: lettera aperta inviata da Wolfgang Pauli ai partecipanti ad un congresso di fisica sulla radioattività a Tubinga

“ ho trovato un rimedio disperato per interpretare lo spettro continuo dei raggi β , che rispetta la legge di conservazione dell'energia. È possibile che esistano nei nuclei particelle elettricamente neutre, che chiamo neutroni, con spin $\frac{1}{2}$ La massa di questi neutroni dovrebbe essere dello stesso ordine di grandezza della massa dell'elettrone, e certamente non superiore a 1% della massa del protone. Lo spettro continuo dei raggi β si potrebbe spiegare assumendo che, nel decadimento β , vengano emessi simultaneamente un elettrone e un neutrone, in modo che la somma delle energie dell'elettrone e del neutrone abbia un valore costante. ”

1932: James Chadwick scopre il neutrone, con una massa leggermente superiore (~1.3‰) alla massa del protone

1932 - 33: Enrico Fermi propone un "tentativo di una teoria dei raggi β "

(articolo inviato alla rivista Nature, ma rifiutato perché "remoto dalla realtà fisica – infine pubblicato nel 1934 in italiano sul Nuovo Cimento, e in tedesco su Zeitschrift für Physik)

Un nuovo tipo di interazione tra le quattro particelle di spin $\frac{1}{2}$ (fermioni) implicate nel decadimento β : trasformazione di un neutrone in un protone, con la simultanea produzione di una coppia elettrone – neutrino (il neutrino è la particella leggera, elettricamente neutra, proposta da Pauli, chiamata "neutrino" da Fermi).

Fermi assume una interazione puntiforme, proporzionale alla sovrapposizione delle funzioni d'onda delle quattro particelle nello stesso punto dello spazio.

Le funzioni d'onda sono interpretate come operatori di creazione e distruzione, secondo il formalismo matematico inventato da Jordan e Klein nel 1927.

→ l'elettrone e il neutrino emessi nel decadimento β non esistono nel nucleo ma vengono "creati" all'istante del decadimento.

La teoria di Fermi permette il calcolo delle frequenze di decadimento β dei nuclei radioattivi, e la distribuzione in energia degli elettroni emessi, in funzione di una sola costante G_F (la costante di accoppiamento di Fermi).

L'interazione puntiforme implica un raggio di interazione NULLO.

Problemi dell'interazione di Fermi con raggio nullo:

- Il calcolo delle ampiezze di decadimento al 2° ordine in G_F implica integrali divergenti;
- La sezione d'urto dei neutrini aumenta indefinitamente con l'energia:

$$\sigma \approx 4\pi G_F^2 E^2 \quad (E : \text{energia totale nel sistema del baricentro})$$

in contrasto con il limite previsto dal teorema ottico per collisioni con raggio di interazione nullo:

$$\sigma < 16\pi / E^2$$

1938: Oskar Klein suggerisce che l'interazione di Fermi sia dovuta allo scambio di un bosone pesante di massa M , dotato di carica elettrica.

Il raggio dell'interazione è inversamente proporzionale alla massa del bosone:

$$R \approx \frac{\hbar}{Mc}$$

La teoria di Fermi è una approssimazione valida ad energie $E \ll Mc^2$, dove gli effetti dovuti allo scambio del bosone sono trascurabili.

1945 – 50: L'interazione di Fermi (denominata "interazione debole") viene estesa ad altri tipi di reazioni

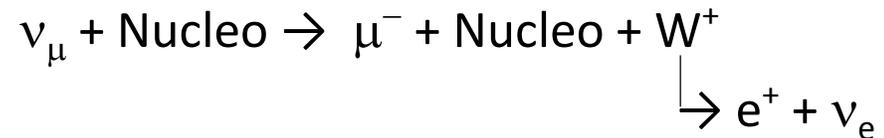
Esempi: decadimento del muone $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$

cattura nucleare del muone negativo $\mu^- + p \rightarrow n + \nu$

1956: Scoperta che l'interazione debole viola la simmetria di Parità

(agisce solo su particelle con spin $\frac{1}{2}$ antiparallelo all'impulso, e su antiparticelle con spin antiparallelo all'impulso)

Anni 1960: Ricerca dell'ipotetico bosone carico W in esperimenti con fasci di neutrini presso i nuovi sincrotroni a protoni di alta energia (PS al CERN, 25 GeV ; AGS al Laboratorio Nazionale di Brookhaven, 30 GeV):



(presenza di coppie $\mu^{-} e^{+}$ nello stato finale)

Nessuna evidenza sperimentale \rightarrow limite inferiore alla massa: $M_W > 2.5 \text{ GeV}/c^2$

Anni 1960: Formulazione di una teoria unificata delle interazioni elettromagnetica e debole basata sulla invarianza della Lagrangiana per trasformazioni $SU(2) \times U(1)$
→ interazione elettrodebole (Glashow 1961; Salam, Weinberg 1967)

La simmetria $SU(2) \times U(1)$ richiede l'esistenza di 4 bosoni vettoriali (spin = 1) che trasmettono l'interazione tra fermioni e interagiscono fra loro:

W^+ W^0 W^- richiesti dalla simmetria $SU(2)$

B^0 richiesto dalla simmetria $U(1)$

Gli stati fisici dei due bosoni elettricamente neutri sono combinazioni ortogonali di W^0 e B^0 :

$$\text{fotone } (\gamma): \quad A_\mu = \cos(\theta_W) B_\mu + \sin(\theta_W) W_\mu^0$$

$$Z^0: \quad Z_\mu = -\sin(\theta_W) B_\mu + \cos(\theta_W) W_\mu^0$$

θ_W : angolo di mixing debole (detto anche "angolo di Weinberg")

La massa dei bosoni W^+ , W^- , Z è generata dall'accoppiamento dei bosoni con un campo scalare complesso con rottura spontanea della simmetria $SU(2) \times U(1)$ ("meccanismo di Higgs")

Relazione tra la costante di accoppiamento di Fermi e la carica dell'elettrone nella interazione elettrodebole

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{e^2}{8[M_W \sin(\theta_W)]^2} = \frac{\pi\alpha}{2[M_W \sin(\theta_W)]^2} \quad \alpha = 1/137.036$$

$$M_W = \left(\frac{\pi\alpha}{\sqrt{2}G_F} \right)^{1/2} \frac{1}{\sin(\theta_W)} = \frac{37.281 \text{ GeV}/c^2}{\sin(\theta_W)} \quad \frac{M_W}{M_Z} = \cos(\theta_W)$$

W[±] : bosoni scambiati nelle interazioni di “corrente carica (CC)”

$$\nu_\mu + \text{nucleo} \rightarrow \mu^- + \text{adroni} \quad (\text{scambio } W^+)$$

$$\bar{\nu}_\mu + \text{nucleo} \rightarrow \mu^+ + \text{adroni} \quad (\text{scambio } W^-)$$

Z : bosone scambiato nelle interazioni di “corrente neutra (NC)”

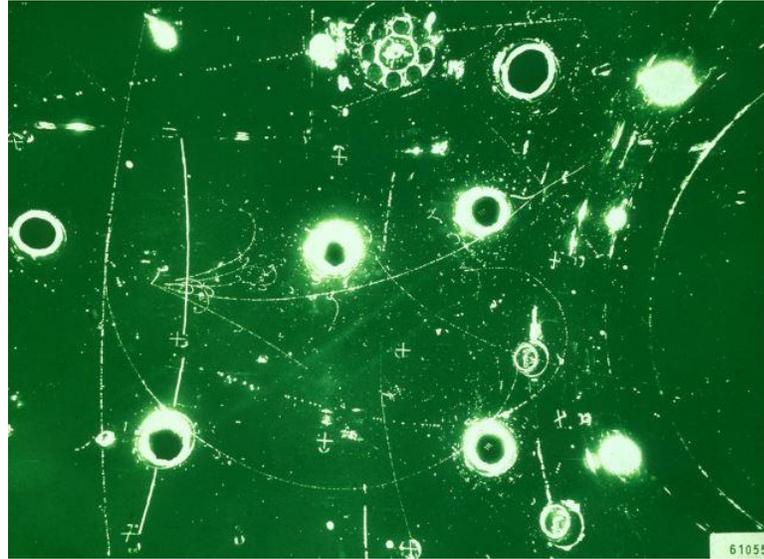
$$\nu_\mu + \text{nucleo} \rightarrow \nu_\mu + \text{adroni}$$

$$\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$$

(reazioni mai osservate in precedenza)

1973: prima evidenza sperimentale della teoria elettrodebole

Scoperta delle interazioni di corrente neutra al CERN con un fascio di neutrini prodotti dal PS e la grande camera a bolle Gargamelle riempita di CF_3Br (Freon)



Misura del rapporto della frequenza di eventi $(\text{NC} / \text{CC}) = 0.21 \pm 0.03$

→ Misura dell'angolo di mixing debole θ_W → predizione di M_W , M_Z

$$M_W = 60 - 80 \text{ GeV}/c^2$$

$$M_Z = 75 - 95 \text{ GeV} /c^2$$

→ Produzione dei bosoni W e Z energeticamente impossibile presso gli acceleratori in funzionamento negli anni 1970

1976: una nuova idea per produrre bosoni W and Z

(presentata al congresso Neutrino 1976, Aachen)

PRODUCING MASSIVE NEUTRAL INTERMEDIATE VECTOR BOSONS WITH EXISTING ACCELERATORS*)

C. Rubbia and P. McIntyre

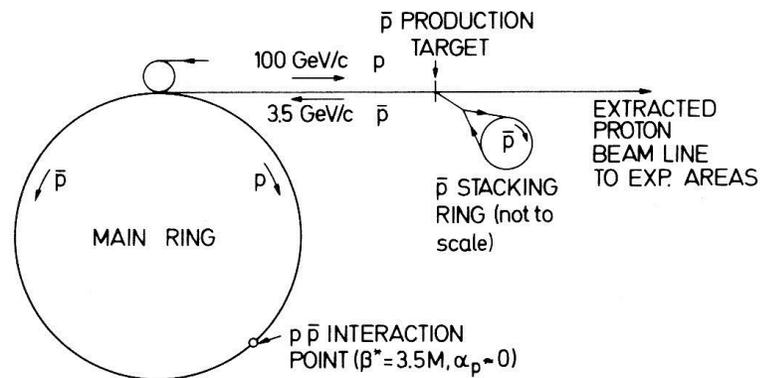
Department of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138
and

D. Cline

Department of Physics, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin 53706

Presented by C. Rubbia

Abstract: We outline a scheme of searching for the massive weak boson ($M = 50 - 200 \text{ GeV}/c^2$). An antiproton source is added either to the Fermilab or the CERN SPS machines to transform a conventional 400 GeV accelerator into a $p\bar{p}$ colliding beam facility with 800 GeV in the center of mass ($E_{\text{eq}} = 320,000 \text{ GeV}$). Reliable estimates of production cross sections along with a high luminosity make the scheme feasible.



Acceleratori al CERN nel 1976

- **Sincrotrone a protoni da 25 GeV (PS)**
- **Sincrotrone a protoni da 450 GeV (SPS)**



Vista dell'SPS

Produzione di W e Z al collider protone - antiprotone:



■ Requisiti per l'energia:

l'impulso del protone (antiprotone) ad alte energie è costituito da gluoni (~ 50%) e quarks (antiquarks) di valenza (~ 50%)

In media: impulso di un quark $\approx \frac{1}{6} \times$ impulso del protone

 **Energia del collider $\approx 6 M_Z \approx 500 - 600 \text{ GeV}/c^2$**

■ Requisiti per la luminosità:

Sezione d'urto inclusiva per $\bar{p} + p \rightarrow Z + X$ a $\sim 600 \text{ GeV}$: $\sigma \approx 1.6 \text{ nb}$

Frazione di decadimenti $Z \rightarrow e^+ e^-$ decay $\approx 3\%$

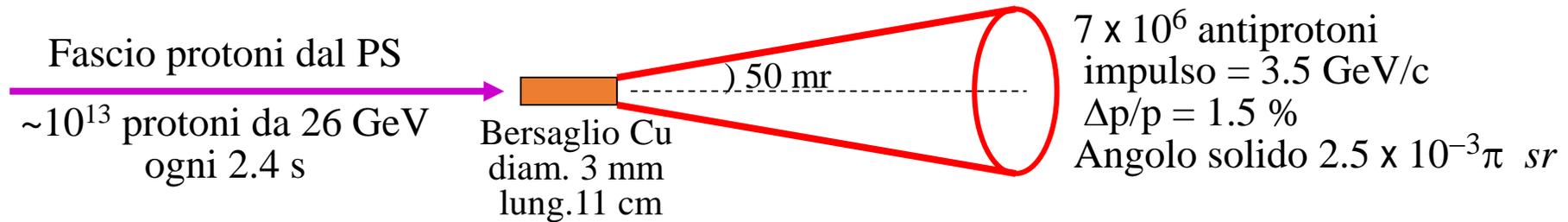
$$\sigma(\bar{p}p \rightarrow Z \rightarrow e^+ e^-) \approx 50 \text{ pb} = 5 \times 10^{-35} \text{ cm}^2$$

Frequenza eventi = $L \sigma$ [s^{-1}] (L \equiv luminosità)

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

Per ottenere luminosità $\geq 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ è necessaria una sorgente di antiprotoni in grado di produrre $3 \times 10^{10} \bar{p}$ / giorno distribuiti in pochi (3 – 6) pacchetti con divergenze angolari e spettro di impulso compatibili con l'accettanza dell'SPS

Produzione di antiprotoni:



Numero di antiprotoni / ciclo PS OK

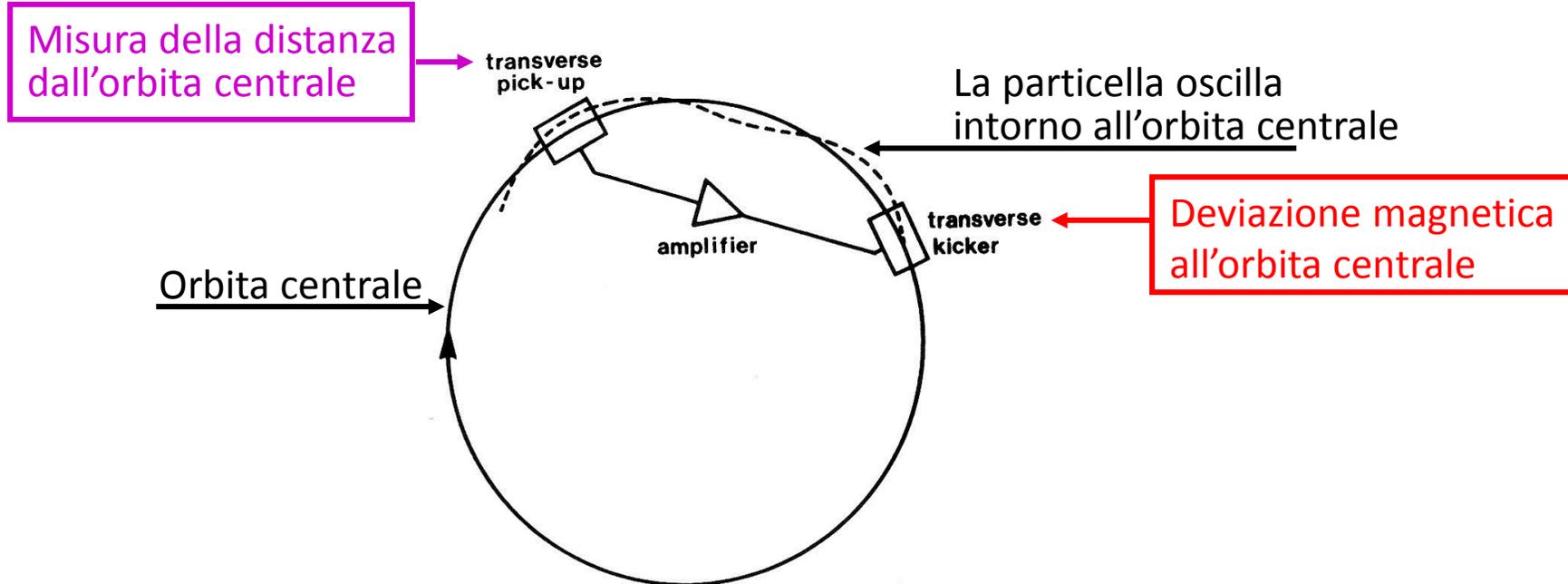
ma contenuti in un volume dello spazio delle fasi $\sim 10^8$ volte maggiore dell'accettanza dell'SPS



È necessario aumentare la densità degli antiprotoni nello spazio delle fasi di un fattore $\geq 10^8$ prima di iniettarli nell'SPS ("raffreddamento")

Raffreddamento “stocastico” (inventato al CERN da Simon van der Meer nel 1972)

Esempio: raffreddamento della divergenza angolare nel piano orizzontale



In pratica, gli elettrodi di pick-up misurano la distanza media di un gruppo di particelle dall'orbita centrale

Tre sistemi indipendenti di raffreddamento:

- divergenza angolare nel piano orizzontale
- divergenza angolare nel piano verticale
- riduzione della dispersione in impulso (Δp) del fascio circolante
(il segnale dell'elettrodo di pick-up, proporzionale a Δp , serve a modulare una cavità RF)

Anni 1977 – 78

- **Esperimento ICE (Initial Cooling Experiment):** verifica sperimentale del raffreddamento stocastico mediante l'uso di un anello magnetico "riciclato" da un esperimento precedente;
- **Raffreddamento di un fascio di antiprotoni e misura della vita media dell'antiprotone;**

Volume 78B, number 1

PHYSICS LETTERS

11 September 1978

MEASUREMENT OF ANTIPROTON LIFETIME USING THE ICE STORAGE RING

M. BREGMAN¹, **M. CALVETTI²**, G. CARRON, S. CITTOLIN, M. HAUER, H. HERR³,
H. KOZIOL, F. KRIENEN, P. KRISTENSEN, G. LEBÉE, D. MÖHL, G. PETRUCCI, C. RUBBIA,
D. SIMON, G. STEFANINI, L. THORND AHL, S. van der MEER, T. WIKBERG

CERN, Geneva, Switzerland

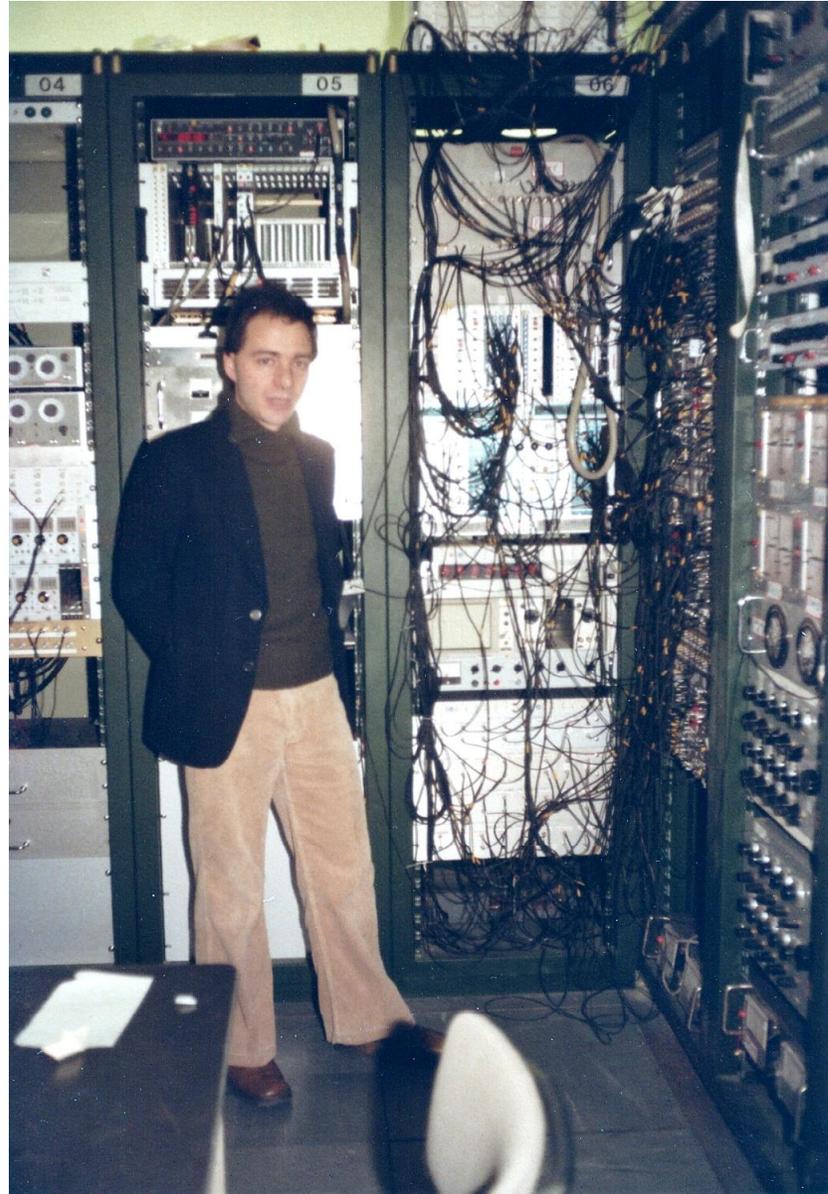
Received 16 August 1978

Antiprotons have been stored in the ICE Storage Ring and held for 85 h with the help of stochastic cooling. We set a limit of at least 32 h for the antiproton lifetime (in its rest frame).

- **Luglio 1978: approvazione della trasformazione dell'SPS in collider protone – antiprotone;**
- **Approvazione di due esperimenti: UA1 (luglio 1978); UA2 (dicembre 1978).**



M. Calvetti CERN



ACCUMULATORE DI ANTIPROTONI DEL CERN (AA)

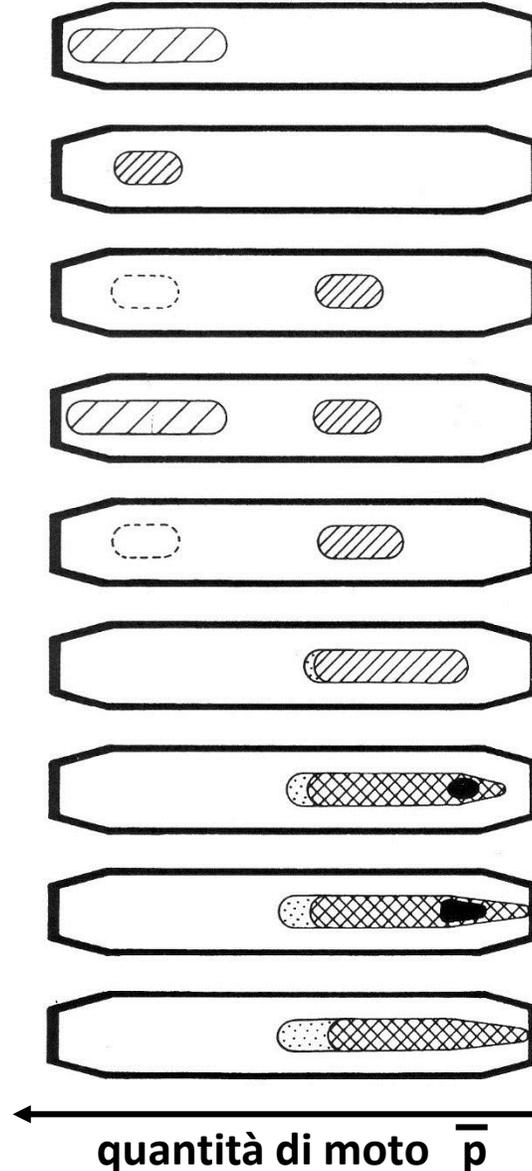
Anello magnetico di grande apertura
per accumulazione e raffreddamento di antiprotoni ($p = 3.5 \text{ GeV}/c$)



(durante la costruzione)

Funzionamento dell'AA

Sezione camera a vuoto AA



Iniezione del primo impulso di 7×10^6 antiprotoni

Il pre-raffreddamento riduce la dispersione della quantità di moto degli antiprotoni

Trasferimento del primo impulso di antiprotoni alla regione di accumulazione e raffreddamento

Iniezione del 2° impulso di antiprotoni dopo 2.4 s

Accumulazione del 2° impulso dopo pre-raffreddamento

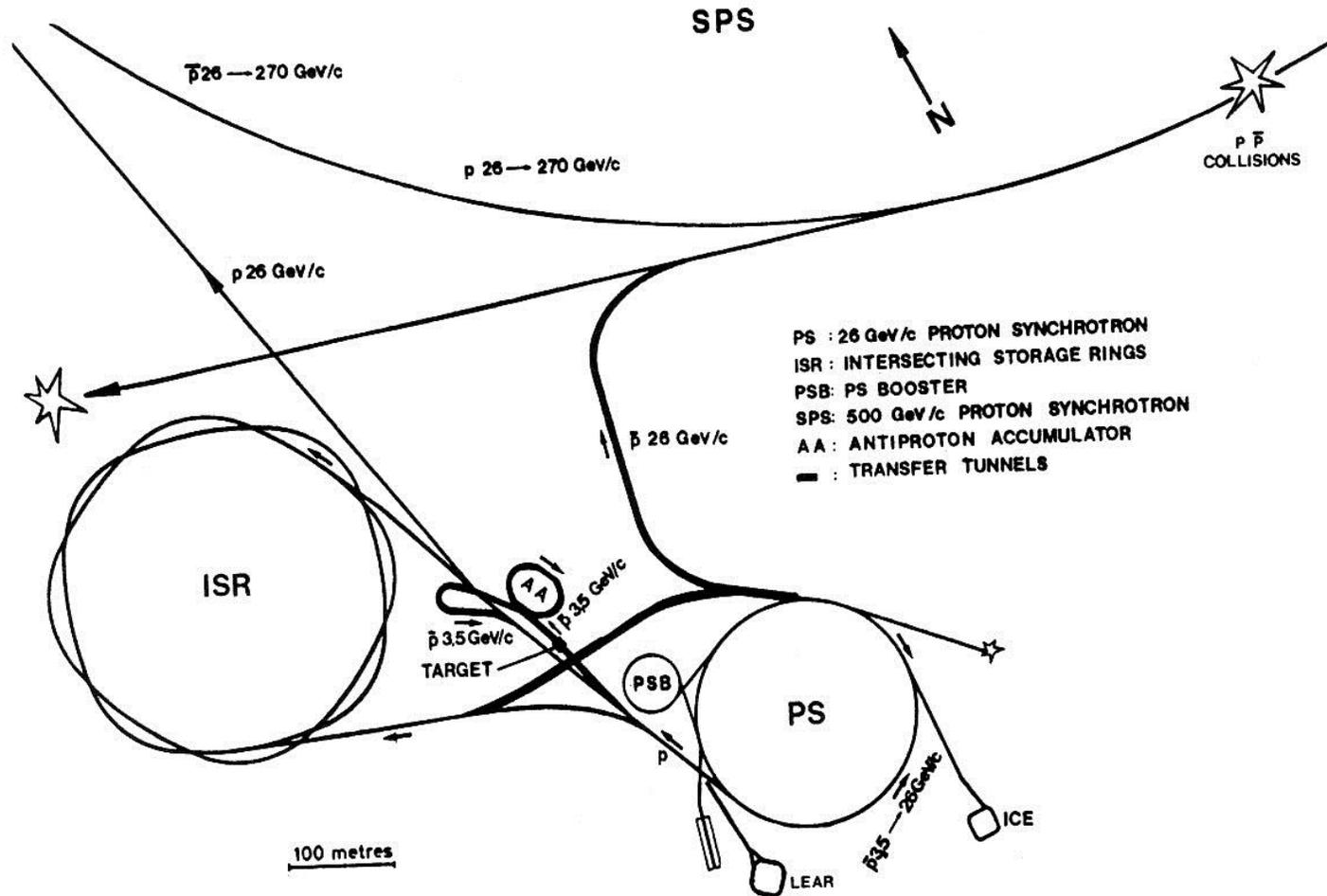
Dopo 15 impulsi il fascio accumulato contiene 10^8 antiprotoni

Dopo 1 ora una regione di alta densità comincia a formarsi

Dopo 1 giorno gli antiprotoni nella regione di alta densità vengono trasferiti in numero sufficiente all'SPS

Gli antiprotoni residui vengono usati per l'accumulazione successiva

Schema degli acceleratori del CERN nei primi anni 1980



Il collider protone – antiprotone del CERN 1981 - 90

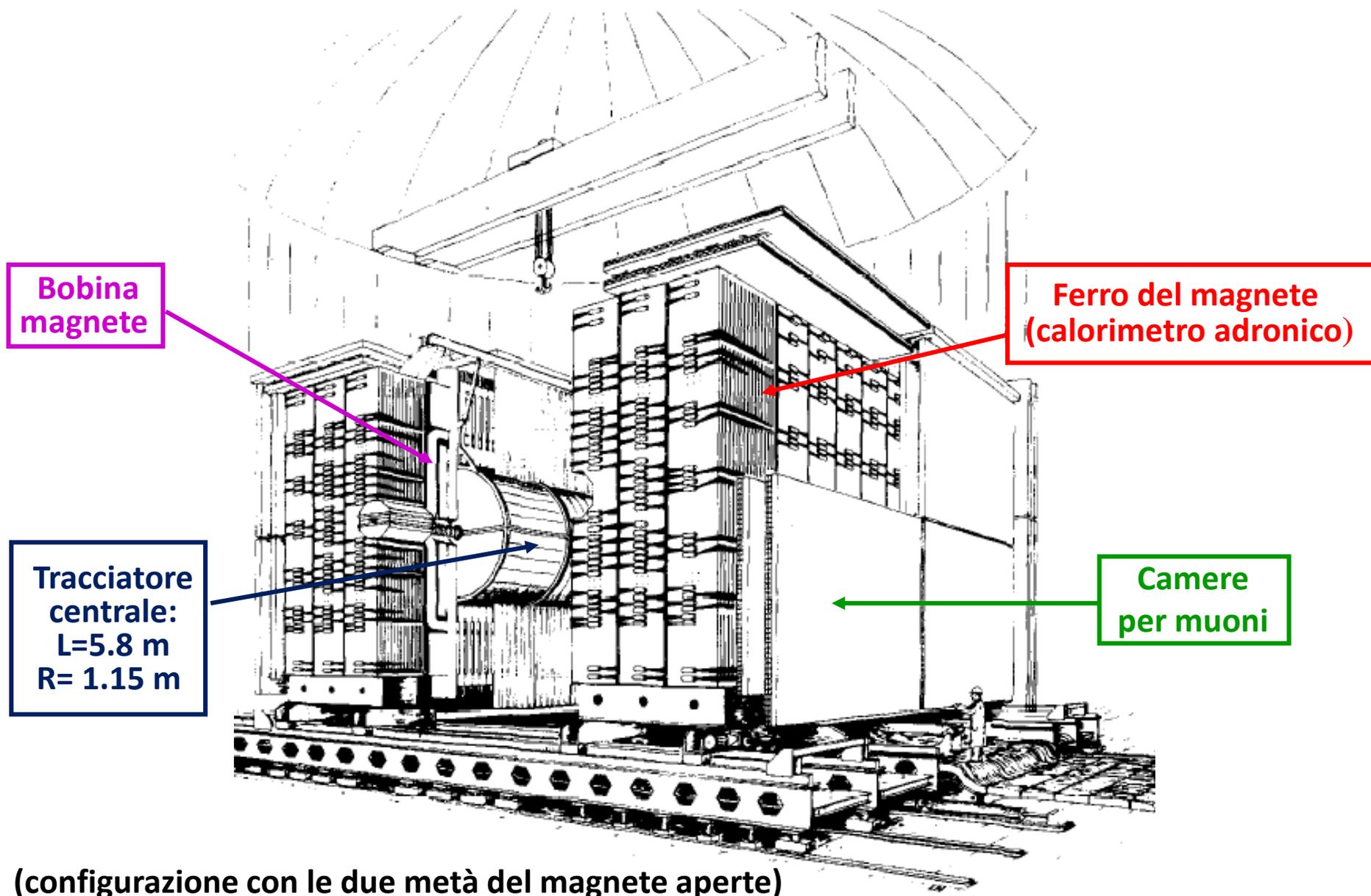
Anno	Energia collisioni (GeV)	Luminosità al picco ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Luminosità integrata (cm^{-2})
1981	546	$\sim 10^{27}$	2.0×10^{32}
1982	546	5×10^{28}	2.8×10^{34}
1983	546	1.7×10^{29}	1.5×10^{35}
1984-85	630	3.9×10^{29}	1.0×10^{36}
1987-90	630	$\sim 2 \times 10^{30}$	1.6×10^{37}

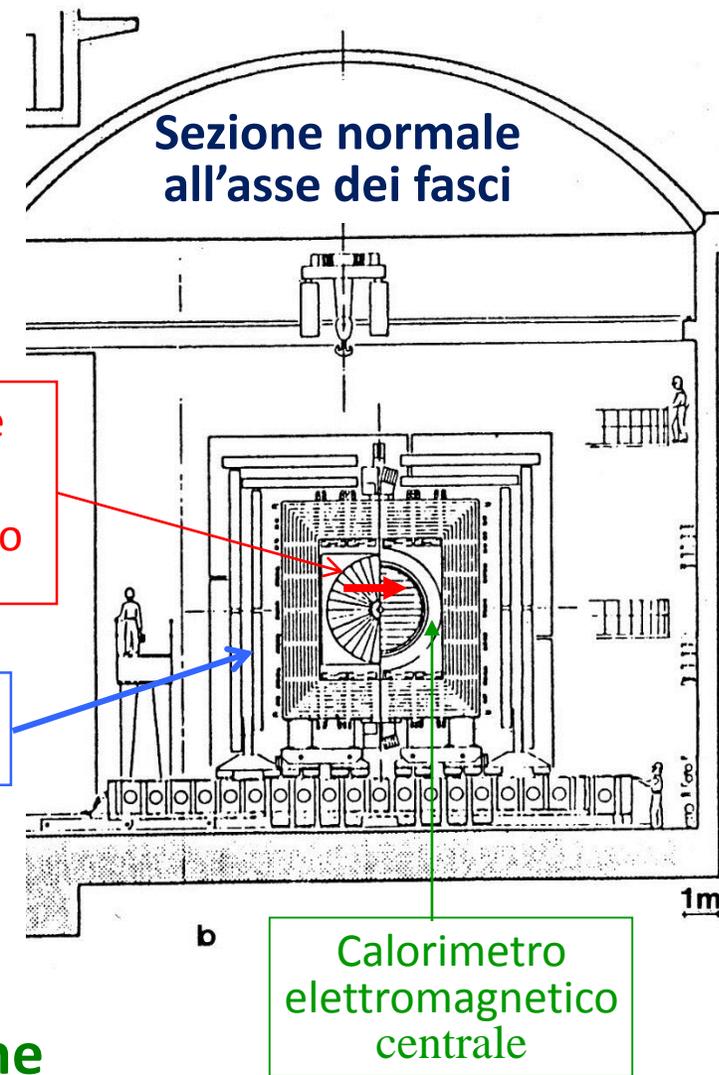
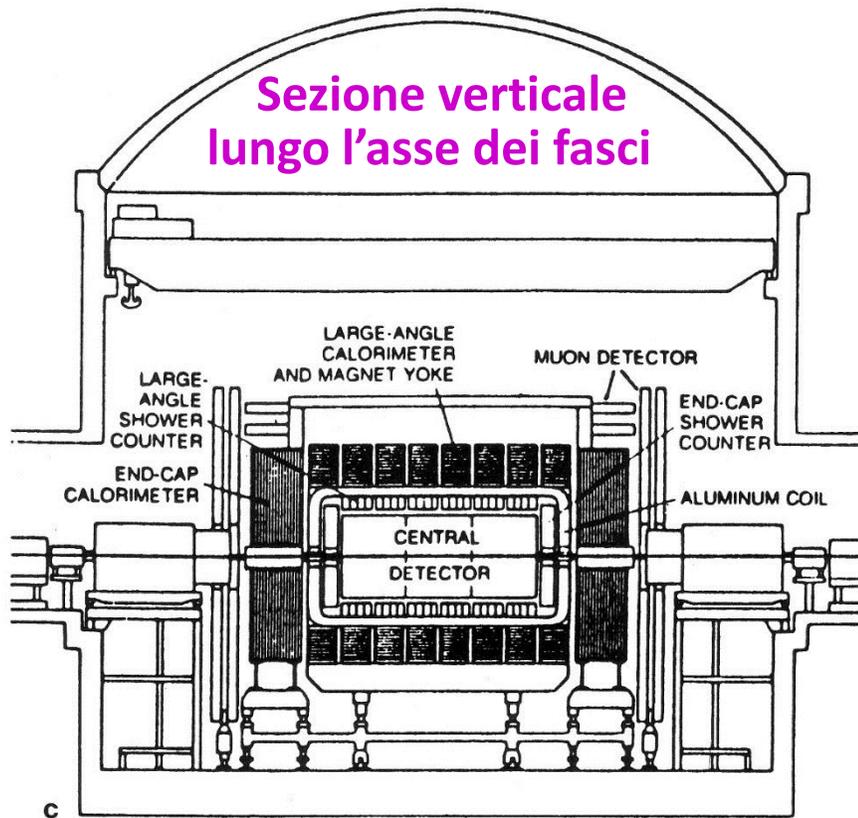
← Scoperta W

← Scoperta Z

1991: chiusura del collider protone – antiprotone del CERN

L'esperimento UA1



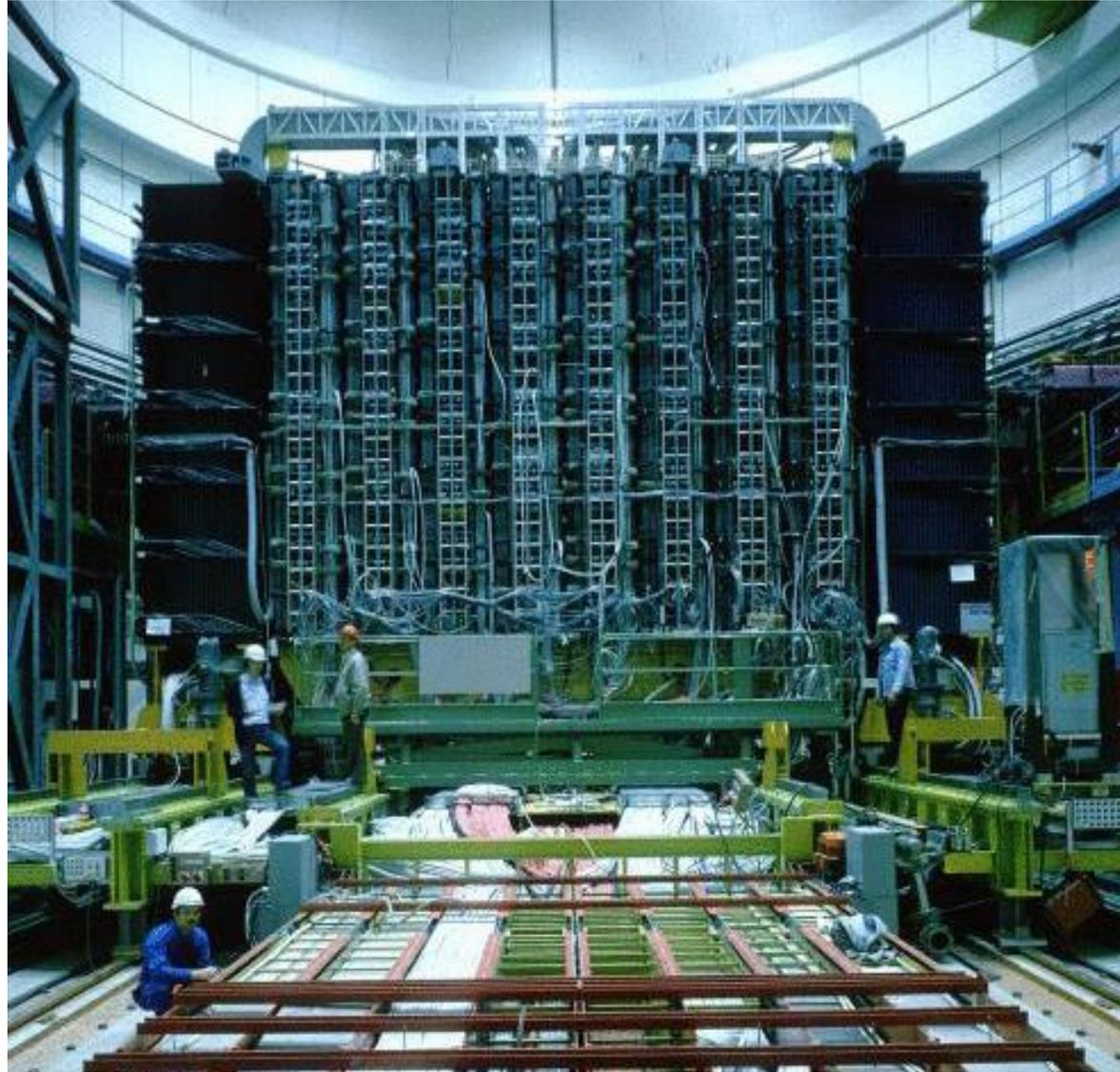


Misura dell'impulso delle particelle cariche
dalla curvatura delle tracce nel tracciatore centrale.

Risoluzione in impulso: $\sigma(1/p) \approx 5 \times 10^{-3} (\text{GeV}/c)^{-1}$

$\sigma_p \approx 10 \text{ GeV}/c$ per $p = 45 \text{ GeV}/c$

Rivelatore UA1 durante il montaggio



Tracciatore centrale del rivelatore UA1

Sistema di camera a deriva, volume 25 m³, 6110 fili di lettura

~100 punti / traccia nella proiezione ortogonale al campo magnetico

Nuclear Instruments and Methods 176 (1980) 175–180

© North-Holland Publishing Company

THE CONSTRUCTION OF THE CENTRAL DETECTOR FOR AN EXPERIMENT AT THE CERN \bar{p} - p COLLIDER

M. BARRANCO LUQUE, M. CALVETTI, L. DUMPS, C. GIRARD, H. HOFFMANN, G. MAURIN,
L. NAUMANN, J. PEREZ, G. PIANO MORTARI, A. PLACCI, P. QUERU, M. RIJSSENBECK, C. RUBBIA,
B. SADOULET and C. TAO

UA1 Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland

Nuclear Instruments and Methods 176 (1980) 255–262

© North-Holland Publishing Company

ELECTRONICS AND RESULTS FOR THE CENTRAL DETECTOR

M. CALVETTI, S. CITTOLIN, C. COCHET, C. ENGSTER, B. HALLGREN, H. HOFFMAN, V. KARIMAKI *,
L. VAN KONINGSVELD, J.P. LAUGIER **, B. LOVSTEDT, G. MAURIN, A. NORTON, P. PETIT, G. PIANO
MORTARI, A. PLACCI, P. QUERU, M. RIJSSENBECK, C. RUBBIA, B. SADOULET, W. SCOTT,
K. SUMOROK †, C. TAO and H. VERWEIJ

UA1 Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland

Collisioni inelastiche “periferiche”

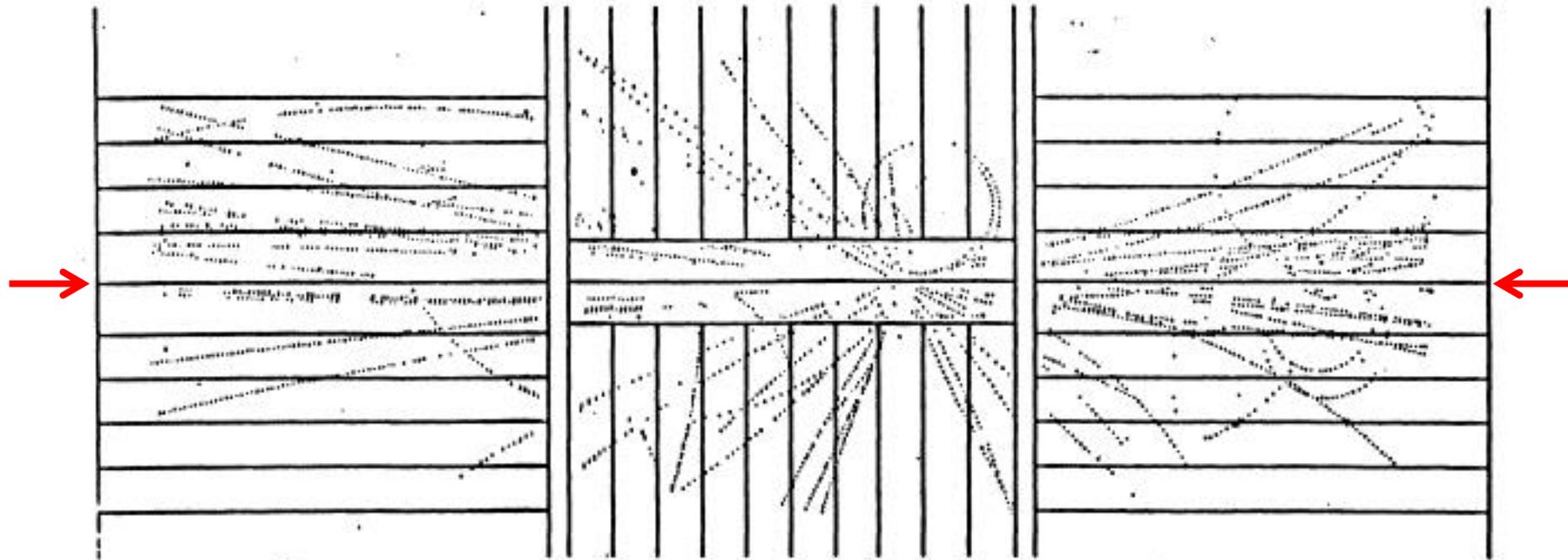
(la maggior parte delle collisioni protone – antiprotone)

Molteplicità media particelle cariche (principalmente mesoni π^\pm) ≈ 30

Molteplicità media particelle neutre (principalmente mesoni π^0) ≈ 15

Impulso trasverso medio $\langle p_T \rangle = \langle p \sin \theta \rangle \approx 300 \text{ MeV}/c$

(p impulso della particella prodotta ; θ angolo di emissione rispetto ai fasci)



Tracce di particelle cariche prodotte in una tipica collisione periferica nel rivelatore UA1

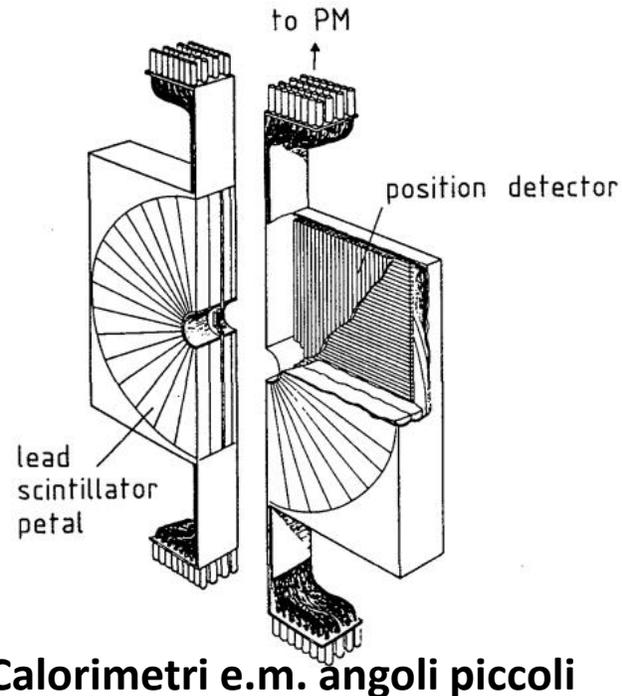
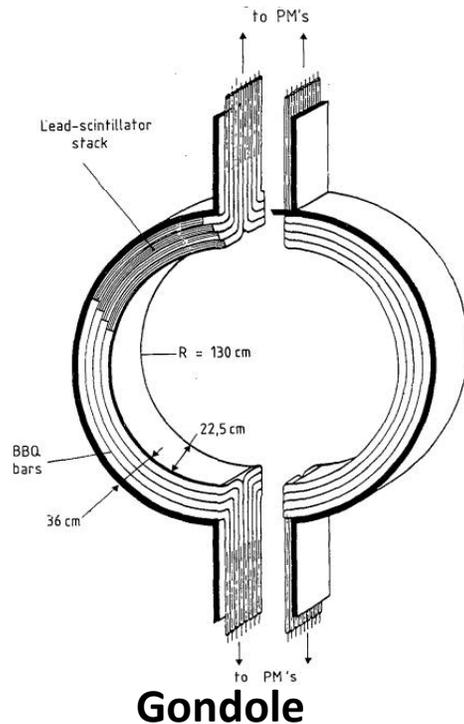
Calorimetri UA1

Calorimetri a “campionamento” : alternanza di materiale passivo (Pb, Fe) e scintillatore plastico

Calorimetri elettromagnetici

Zona centrale ($25^\circ < \theta < 155^\circ$) : strati alternati di scintillatore e Pb :
2 x 24 “gondole”; una gondola: $\Delta\theta = 5^\circ$, $\Delta\phi = 180^\circ$, spessore totale $26 X_0$.

Zone angoli piccoli ($5^\circ < \theta < 25^\circ$, $155^\circ < \theta < 175^\circ$) strati alternati di scintillatore e Pb:
2 x 32 settori azimutali, spessore $27 X_0$.



Risoluzione in energia:
 $\sigma_E \approx 0.15 \sqrt{E}$ (E in GeV)
($\sigma_E \approx 1$ GeV per $E = 45$ GeV)

Calorimetri adronici UA1

Calorimetri integrati nel ferro del magnete (laminato):

Strati alternati di scintillatore (1 cm) e Ferro (5 cm);

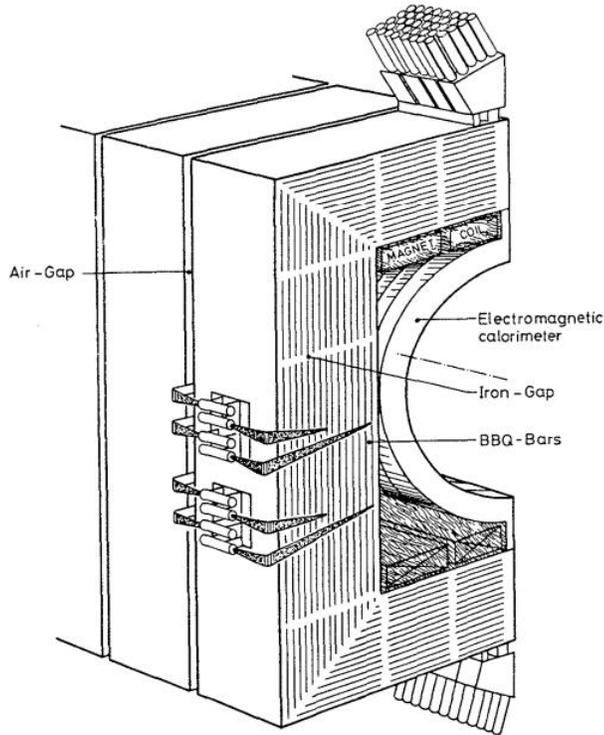
450 celle indipendenti : $\Delta\theta \times \Delta\phi = 15^\circ \times 18^\circ$ (zona centrale, spessore $\sim 5 \lambda$);

$\Delta\theta \times \Delta\phi = 5^\circ \times 10^\circ$ (zona angoli piccoli, spessore $\sim 7 \lambda$);

Risoluzione in energia:

$$\sigma_E \approx 0.7 \sqrt{E} \quad (E \text{ in GeV})$$

$$(\sigma_E \approx 4.7 \text{ GeV per } E = 45 \text{ GeV})$$



Dettaglio calorimetro adronico UA1

Zona centrale

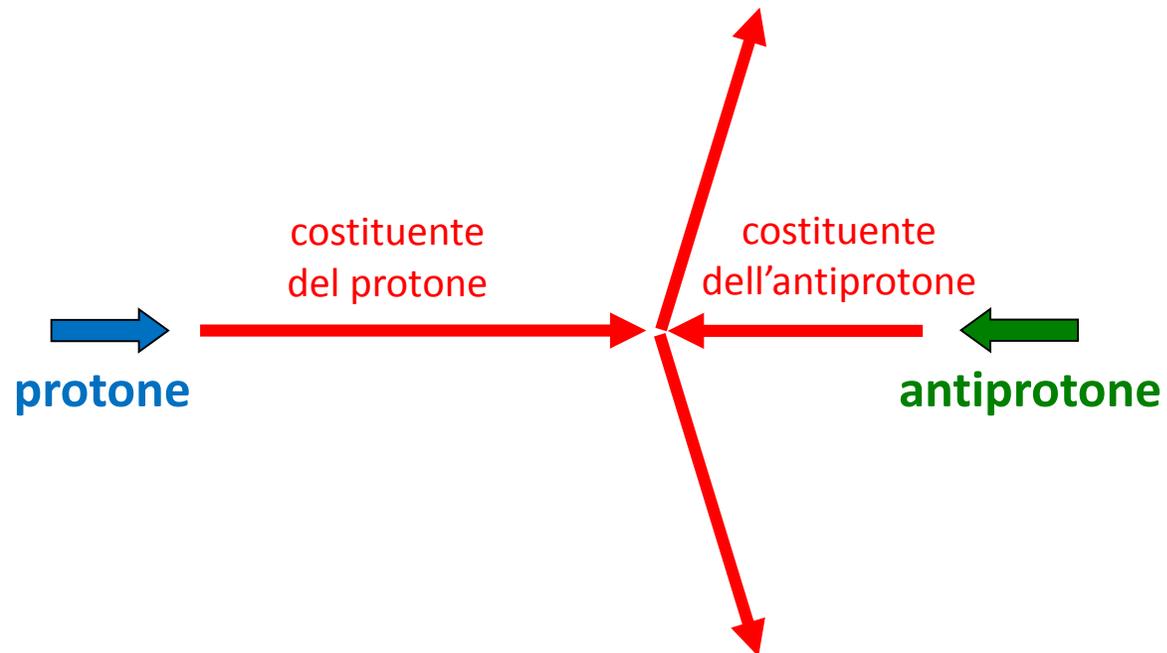
La risposta (rapporto Energia / ampiezza segnale) dei calorimetri non può essere prevista *a-priori* (dipende dalla qualità dello scintillatore, dall'efficienza della raccolta di luce, dal guadagno dei fotomoltiplicatori ...)

È necessario “calibrare” i calorimetri utilizzando fasci di elettroni e adroni di energia nota prodotti dall'SPS, e controllare la stabilità della calibrazione durante la presa – dati al collider protone – antiprotone

➡ incertezza sistematica (tipicamente 1% - 3%) sull'energia misurata

Collisioni “centrali”

Diffusione (“scattering”) quark – antiquark, quark – gluone, gluone – antiquark, gluone – gluone,
a grande angolo \longrightarrow due “getti” (“jets”) di adroni



Collisioni “centrali” con produzione di bosoni W^\pm o Z

Annichilazione quark – antiquark:

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



Decadimenti principali dei bosoni W e Z (~70%) in coppie quark – antiquark \rightarrow due getti adronici:
segnale molto debole rispetto al fondo di eventi a due getti da diffusione a grande angolo $q \bar{q}, q g, g \bar{q}, g g$

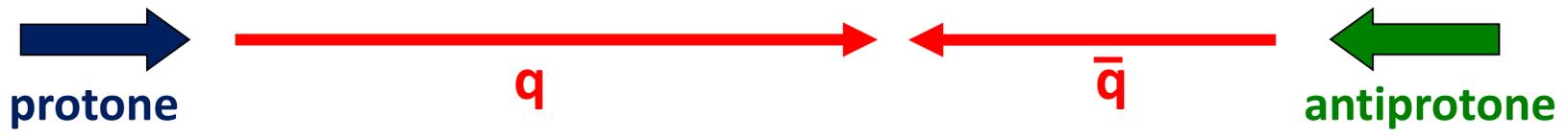
Rapporto segnale / fondo più favorevole per i decadimenti in due leptoni :

$$W^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e (\bar{\nu}_e) \quad W^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$$

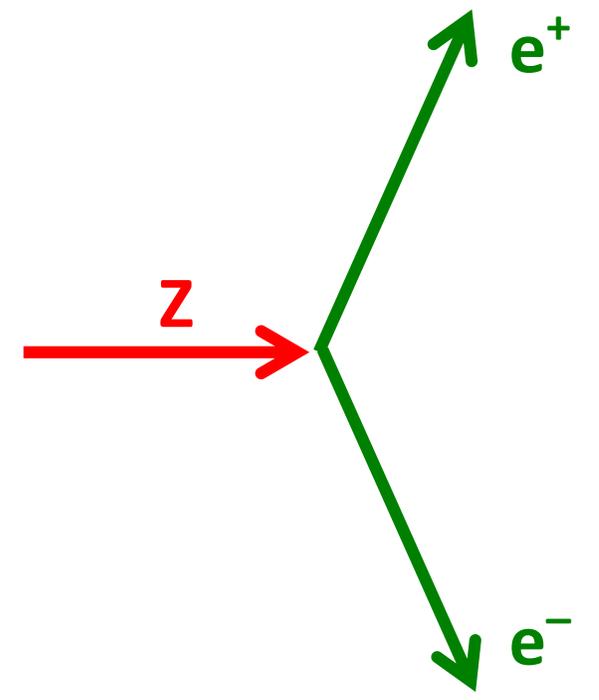
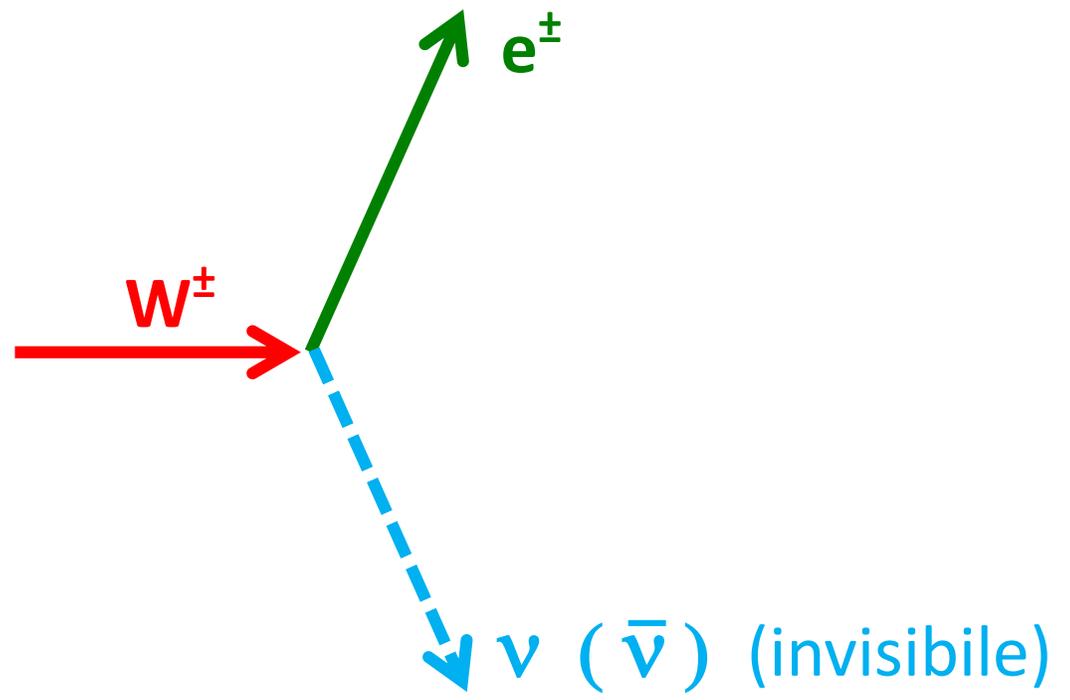
$$Z \rightarrow e^+ + e^- \quad Z \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$

(UA1, UA2)

(UA1)



Esempi di decadimenti $W^\pm \rightarrow e^\pm \nu (\bar{\nu})$, $Z \rightarrow e^+e^-$



La reazione quark-antiquark $\rightarrow W$ (p. es. $u + \bar{d} \rightarrow W^+$) produce in generale bosoni W con piccolo impulso trasverso, in pratica paralleli all'asse dei fasci. Elettrone e neutrino da decadimento del W emessi a grande angolo rispetto all'asse dei fasci hanno un grande impulso trasverso:

$$p_T = \underbrace{p \sin \theta}_{\text{Variabili nel sistema del laboratorio}} = \underbrace{p^* \sin \theta^*}_{\text{Variabili nel sistema di riposo del W}} = \frac{m_W}{2} \sin \theta^* \quad \longrightarrow \quad \sin \theta^* = \frac{2p_T}{m_W}$$

Variabili nel sistema del laboratorio

Variabili nel sistema di riposo del W

m_W : massa del W

Distribuzione in p_T :

$$\frac{dN}{dp_T} = \frac{dN}{d \cos \theta^*} \left| \frac{d \cos \theta^*}{dp_T} \right| = \frac{dN}{d \cos \theta^*} \left| \frac{d \sqrt{1 - 4p_T^2 / m_W^2}}{dp_T} \right| = \frac{dN}{d \cos \theta^*} \frac{4p_T / m_W^2}{\sqrt{1 - 4p_T^2 / m_W^2}}$$

funzione singolare per $p_T = m_W/2$

Nella realtà fisica:

- Larghezza intrinseca del W (≈ 2.1 GeV)
- $p_T(W) > 0$
- risoluzione sperimentale

} presenza di un picco non singolare per $p_T \approx m_W / 2$

Scoperta del bosone W^\pm

Sezione d'urto per $p + \bar{p} \rightarrow W^\pm + \text{adroni}$

$$\downarrow \rightarrow e^\pm + \nu (\bar{\nu})$$

$\sigma(W \rightarrow e \nu) \approx 0.5 \text{ nb} = 0.5 \times 10^{-33} \text{ cm}^2$ (energia di collisione $p \bar{p}$ 546 GeV)

Sezione d'urto inelastica $\sigma(p \bar{p} \rightarrow \text{adroni}) \approx 45 \text{ mb} = 4.5 \times 10^{-26} \text{ cm}^2$

→ 1 evento $W \rightarrow e + \nu$ in $\sim 9 \times 10^7$ collisioni $p \bar{p}$

Caratteristiche del segnale da decadimento $W \rightarrow e \nu$:

- **elettrone isolato con grande impulso trasverso**
- **neutrino non rivelato → grande impulso trasverso mancante**
- **la distribuzione dell'impulso trasverso dell'elettrone presenta un picco a $p_T \approx m_W / 2$**

**EXPERIMENTAL OBSERVATION OF ISOLATED LARGE TRANSVERSE ENERGY ELECTRONS
WITH ASSOCIATED MISSING ENERGY AT $\sqrt{s} = 540$ GeV**

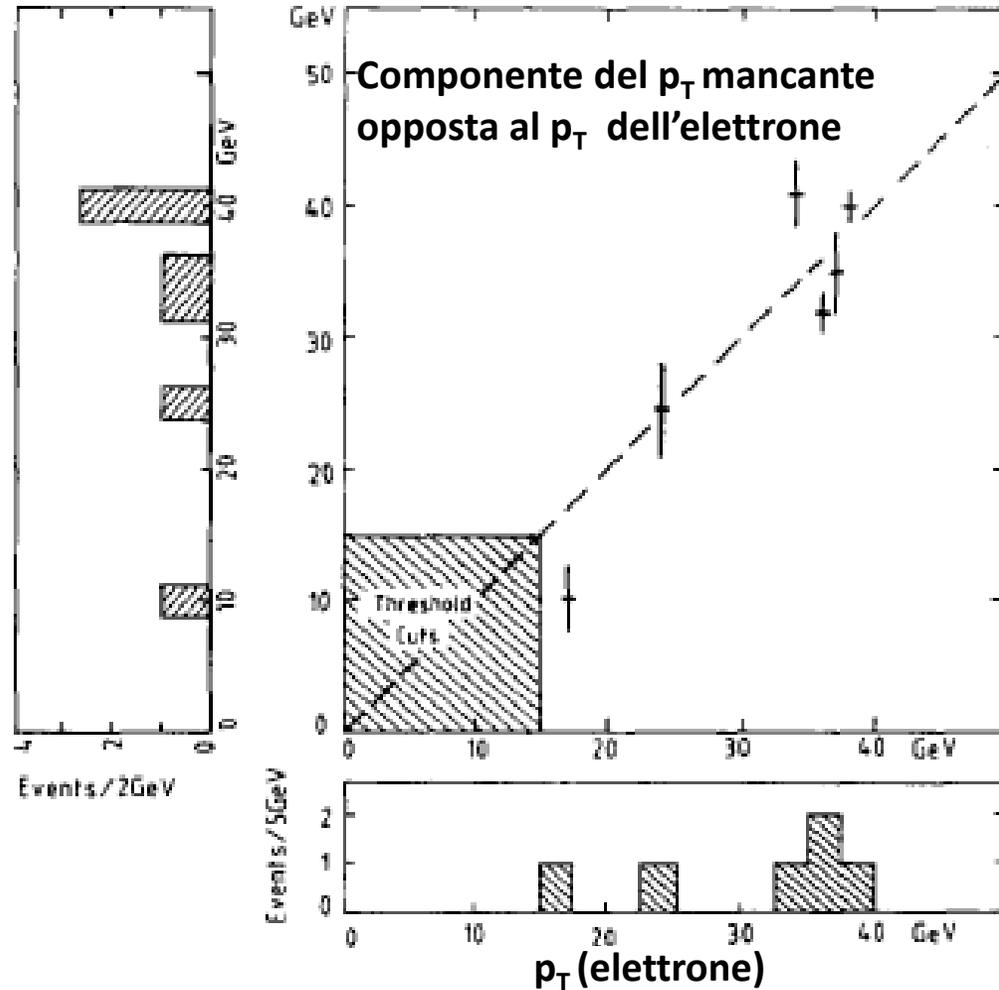
UA1 Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland

G. ARNISON^j, A. ASTBURY^j, B. AUBERT^b, C. BACCIⁱ, G. BAUER^l, A. BÉZAGUET^d, R. BÖCK^d,
T.J.V. BOWCOCK^f, **M. CALVETTI^d**, T. CARROLL^d, P. CATZ^b, P. CENNINI^d, S. CENTRO^d,
F. CERADINI^d, S. CITTOLIN^d, D. CLINE^l, C. COCHET^k, J. COLAS^b, M. CORDEN^c, D. DALLMAN^d,
M. DeBEER^k, M. DELLA NEGRA^b, M. DEMOULIN^d, D. DENEGRI^k, A. Di CIACCIOⁱ,
D. DiBITONTO^d, L. DOBRZYNSKI^g, J.D. DOWELL^c, M. EDWARDS^c, K. EGGERT^a,
E. EISENHANDLER^f, N. ELLIS^d, P. ERHARD^a, H. FAISSNER^a, G. FONTAINE^g, R. FREY^h,
R. FRÜHWIRTH^l, J. GARVEY^c, S. GEER^g, C. GHESQUIÈRE^g, P. GHEZ^b, K.L. GIBONI^a,
W.R. GIBSON^f, Y. GIRAUD-HÉRAUD^g, A. GIVERNAUD^k, A. GONIDEC^b, G. GRAYER^j,
P. GUTIERREZ^h, T. HANSL-KOZANECKA^a, W.J. HAYNES^j, L.O. HERTZBERGER², C. HODGES^h,
D. HOFFMANN^a, H. HOFFMANN^d, D.J. HOLTHUIZEN², R.J. HOMER^c, A. HONMA^f, W. JANK^d,
G. JORAT^d, P.I.P. KALMUS^f, V. KARIMÄKI^c, R. KEELER^f, I. KENYON^c, A. KERNAN^h,
R. KINNUNEN^c, H. KOWALSKI^d, W. KOZANECKI^h, D. KRYN^d, F. LACAVA^d, J.-P. LAUGIER^k,
J.-P. LEES^b, H. LEHMANN^a, K. LEUCHS^a, A. LÉVÊQUE^k, D. LINGLIN^b, E. LOCCI^k, M. LORET^k,
J.-J. MALOSSE^k, T. MARKIEWICZ^d, G. MAURIN^d, T. McMAHON^c, J.-P. MENDIBURU^g,
M.-N. MINARD^b, M. MORICCAⁱ, H. MUIRHEAD^d, F. MULLER^d, A.K. NANDI^j, L. NAUMANN^d,
A. NORTON^d, A. ORKIN-LECOURTOIS^g, L. PAOLUZIⁱ, G. PETRUCCI^d, G. PIANO MORTARIⁱ,
M. PIMIÄ^e, A. PLACCI^d, E. RADERMACHER^a, J. RANDELL^h, H. REITHLER^a, J.-P. REVOL^d,
J. RICH^k, M. RIJSSENBECK^d, C. ROBERTS^j, J. ROHLF^d, P. ROSSI^d, C. RUBBIA^d, B. SADOULET^d,
G. SAJOT^g, G. SALVI^f, G. SALVINIⁱ, J. SASS^k, J. SAUDRAIX^k, A. SAVOY-NAVARRO^k,
D. SCHINZEL^f, W. SCOTT^j, T.P. SHAH^j, M. SPIRO^k, J. STRAUSS^l, K. SUMOROK^c, F. SZONCSO^l,
D. SMITH^h, C. TAO^d, G. THOMPSON^f, J. TIMMER^d, E. TSCHESLOG^a, J. TUOMINIEMI^e,
S. Van der MEER^d, J.-P. VIALLE^d, J. VRANA^g, V. VUILLEMIN^d, H.D. WAHL^l, P. WATKINS^c,
J. WILSON^c, Y.G. XIE^d, M. YVERT^b and E. ZURFLUH^d

*Aachen^a–Annecy (LAPP)^b–Birmingham^c–CERN^d–Helsinki^e–Queen Mary College, London^f–Paris (Coll. de France)^g
–Riverside^h–Romeⁱ–Rutherford Appleton Lab.^j–Saclay (CEN)^k–Vienna^l Collaboration*

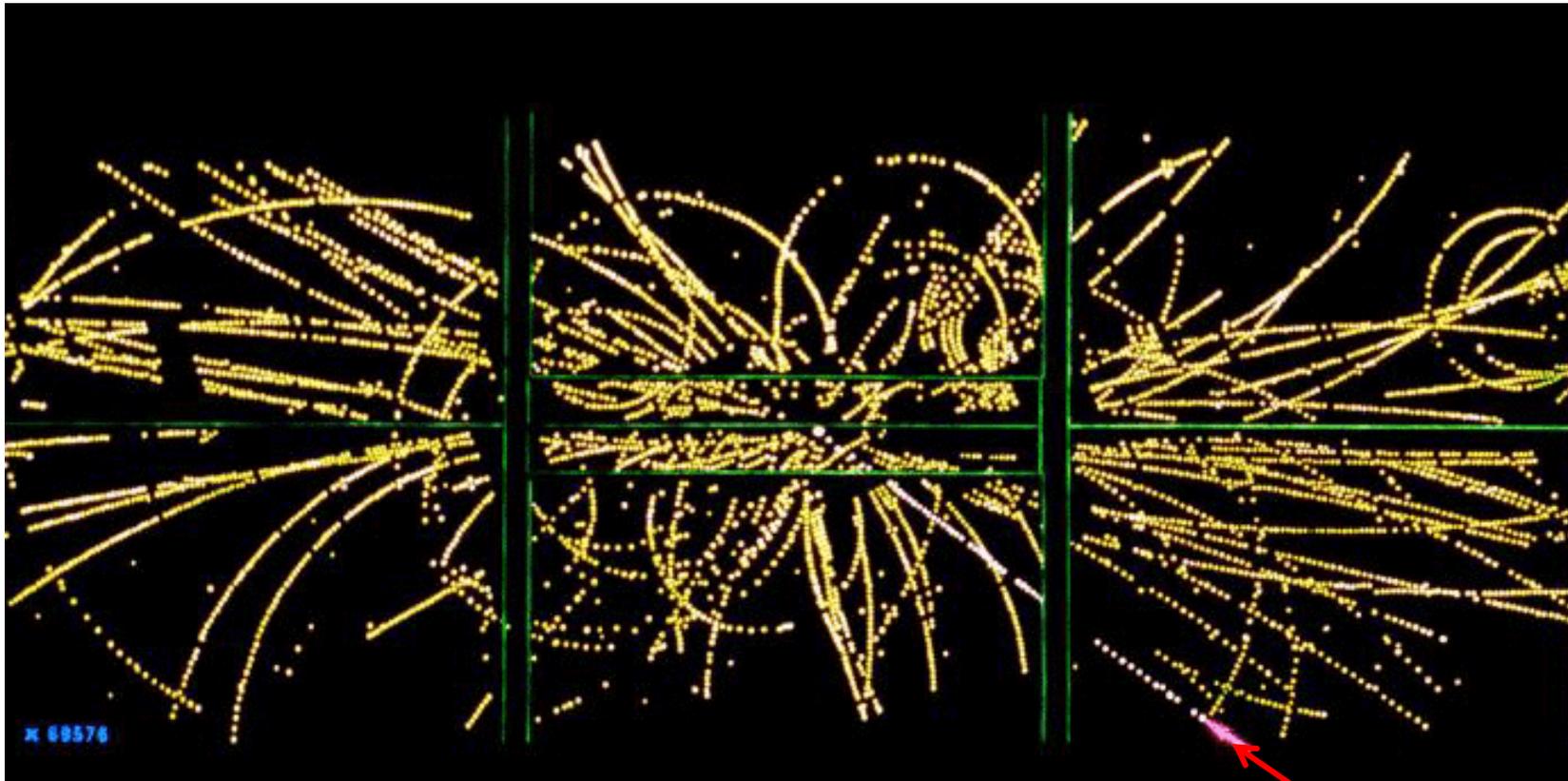
Received 23 January 1983

UA1: correlazione fra il p_T dell'elettrone e il p_T mancante



Sei eventi contenenti un elettrone di p_T elevato + p_T mancante in direzione opposta al p_T dell'elettrone, compatibili con il decadimento $W \rightarrow e \nu$ (risultato presentato da C. Rubbia ad un seminario al CERN il 20 gennaio 1983)

Evento $W \rightarrow e \nu$ ricostruito nel rivelatore UA1



Traccia
elettrone

Scoperta del bosone Z

Sezione d'urto per $p + \bar{p} \rightarrow Z + \text{adroni}$
 \downarrow
 $\rightarrow e^+ + e^-$

$\sigma(Z \rightarrow e^+ e^-) \approx 43 \text{ pb} = 4.3 \times 10^{-35} \text{ cm}^2$ (energia di collisione $p \bar{p}$ 546 GeV)

Sezione d'urto inelastica $\sigma(p \bar{p} \rightarrow \text{adroni}) \approx 45 \text{ mb} = 4.5 \times 10^{-26} \text{ cm}^2$

➡ 1 evento $Z \rightarrow e^+ + e^-$ in $\sim 10^9$ collisioni $p \bar{p}$

Caratteristiche del segnale da decadimento $Z \rightarrow e^+ + e^-$:

picco nella distribuzione in massa invariante della coppia e^+e^- (M_{ee})

per $M_{ee} = m_Z$ (massa del bosone Z)

$$M_{ee}^2 = \underbrace{(E_{e^+} + E_{e^-})^2}_{\text{energie}} - \underbrace{(\vec{p}_{e^+} + \vec{p}_{e^-})^2}_{\text{impulsi}}$$

**EXPERIMENTAL OBSERVATION OF LEPTON PAIRS OF INVARIANT MASS
AROUND $95 \text{ GeV}/c^2$ AT THE CERN SPS COLLIDER**

UA1 Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland

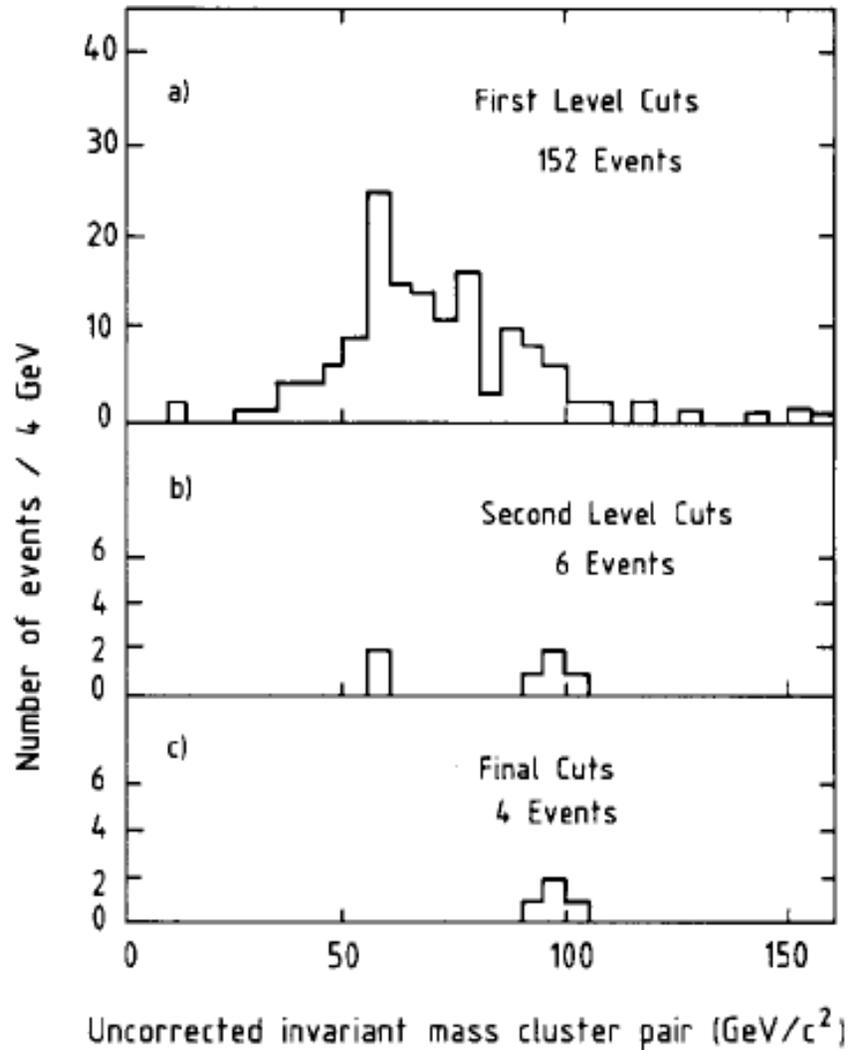
G. ARNISON^j, A. ASTBURY^j, B. AUBERT^b, C. BACCIⁱ, G. BAUERⁱ, A. BÉZAGUET^d,
R. BÖCK^d, T.J.V. BOWCOCK^f, **M. CALVETTI^d**, P. CATZ^b, P. CENNINI^d, S. CENTRO^d,

.....
V. VUILLEMIN^d, H.D. WAHL^l, P. WATKINS^c, J. WILSON^c, C. WULZⁱ, G.Y. XIE^d,
M. YVERT^b and E. ZURFLUH^d

*Aachen^a - Annecy (LAPP)^b - Birmingham^c - CERN^d - Helsinki^e - Queen Mary College, London^f -
Paris (Coll. de France)^g - Riverside^h - Romeⁱ - Rutherford Appleton Lab.^j - Saclay (CEN)^k - Vienna^h Collaboration*

Received 6 June 1983

UA1

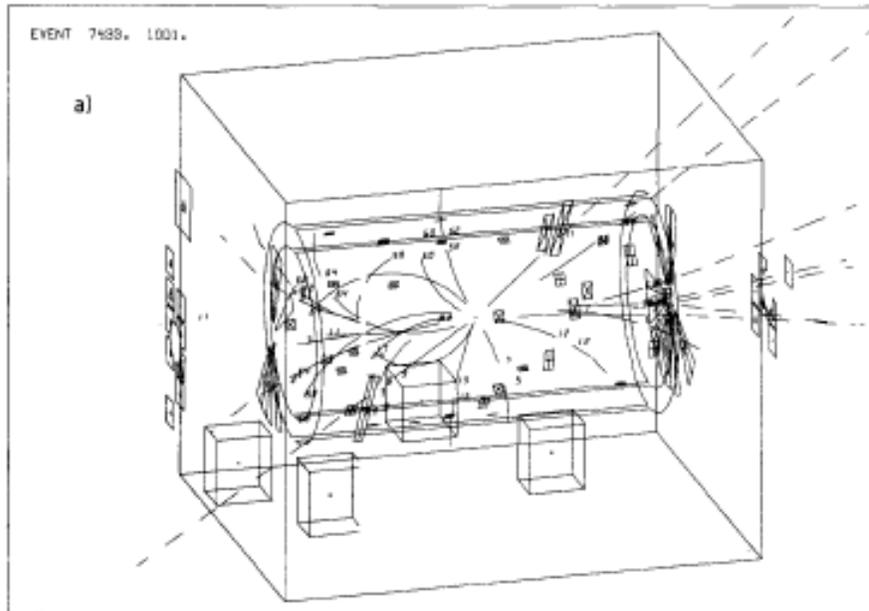


**Due depositi di energia ($p_T > 25$ GeV/c)
nei calorimetri elettromagnetici;
energia nelle celle dei calorimetri
adronici compatibile con elettroni**

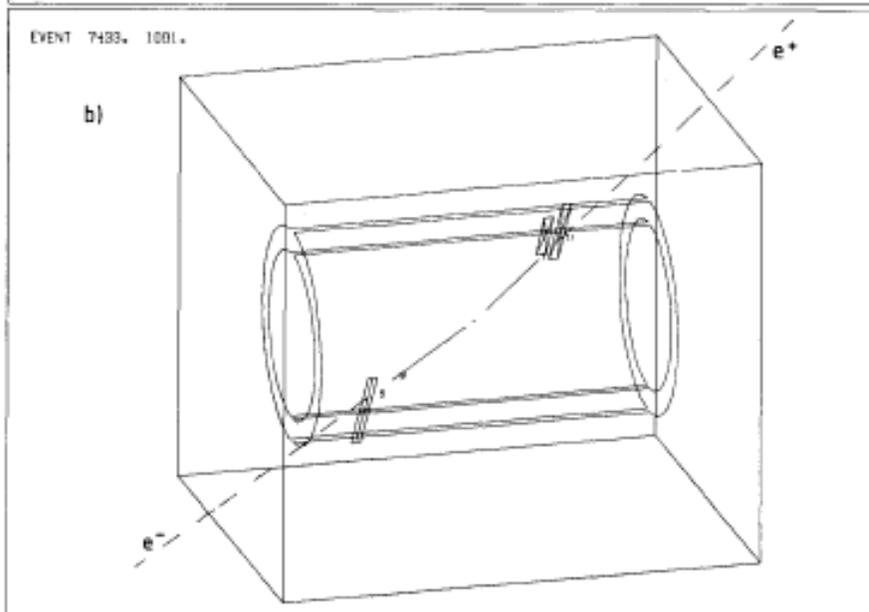
**Traccia isolata con $p_T > 7$ GeV/c diretta
verso almeno uno dei due depositi di
energia**

**Tracce isolate con $p_T > 7$ GeV/c
dirette verso entrambi i depositi
di energia**

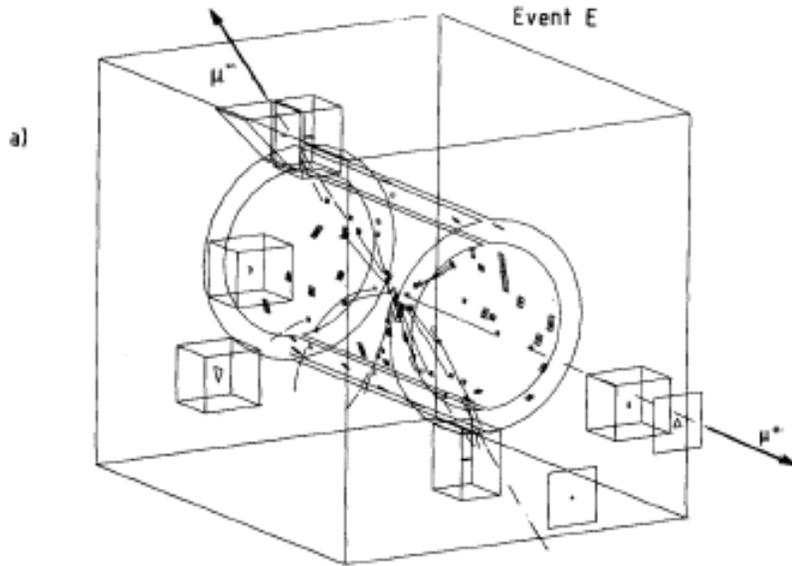
UA1: evento $Z \rightarrow e^+ e^-$



Registrazione di tutte le tracce ricostruite e di tutti i depositi di energia nei calorimetri and calorimeter hits

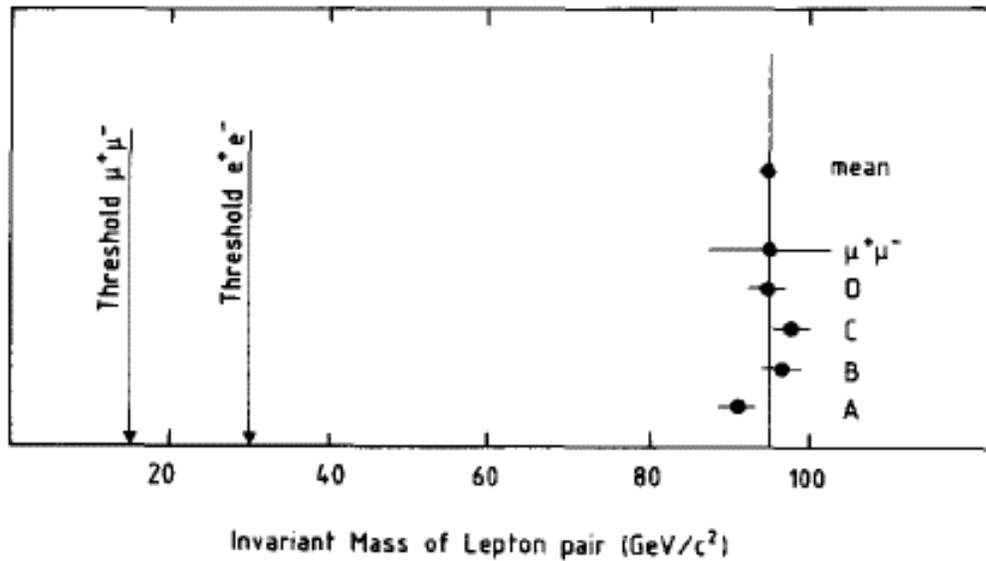


Registrazione delle tracce e dei depositi di energia nei calorimetri con $p_T > 2 \text{ GeV}/c$



UA1: evento $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$

La sola coppia $\mu^+ \mu^-$ osservata durante la presa – dati 1982 - 83



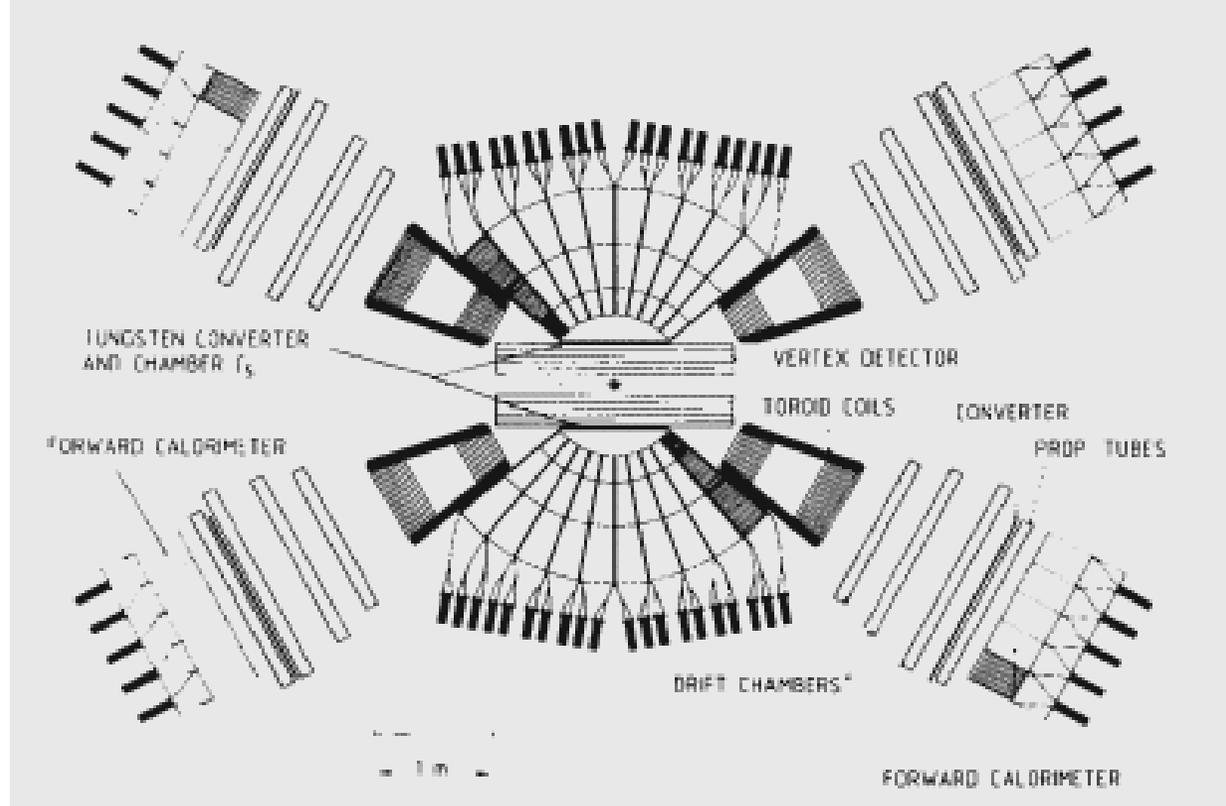
UA1: tutte le coppie di leptoni ($e^+ e^-$, $\mu^+ \mu^-$) osservate durante la presa – dati 1982 - 83

$$m_Z = 95.2 \pm 2.5 \pm 3.0 \text{ GeV}$$

(stat) (sist)

↑
incertezza calibrazione
calorimetro elettromagnetico

Esperimento UA2: configurazione 1981 - 85



Regione centrale ($40^\circ < \theta < 140^\circ$, $\Delta\phi = 360^\circ$) : tracciatori cilindrici (“vertex detector”); rivelatore “pre-shower” calorimetri elettromagnetici e adronici; campo magnetico nullo.

Regioni $20^\circ < \theta < 40^\circ$, $140^\circ < \Delta\phi < 160^\circ$: campo magnetico toroidale; tracciatori + rivelatori “pre-shower” ; calorimetri elettromagnetici.

Nessun rivelatore di muoni

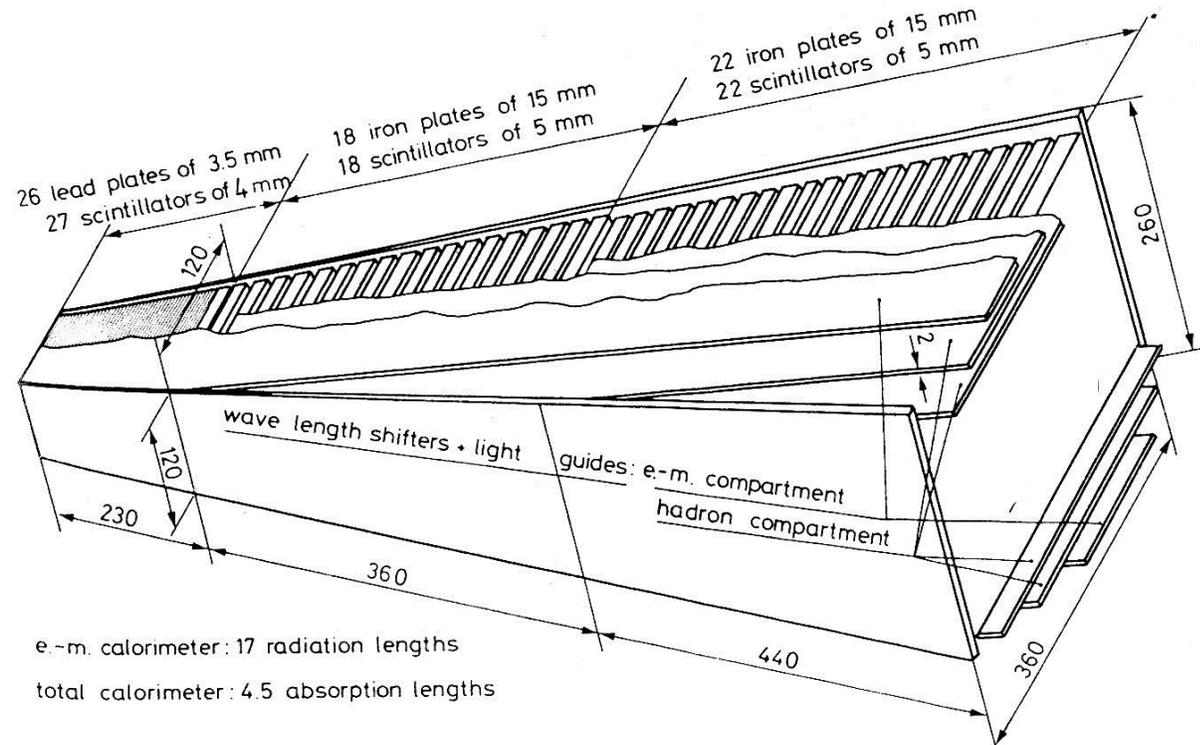
Calorimetri UA2

Zona centrale ($40^\circ < \theta < 140^\circ$): 240 celle

Una cella : $\Delta\theta = 10^\circ$, $\Delta\phi = 15^\circ$

Spessore: calorimetro elettromagnetico $17 X_0$

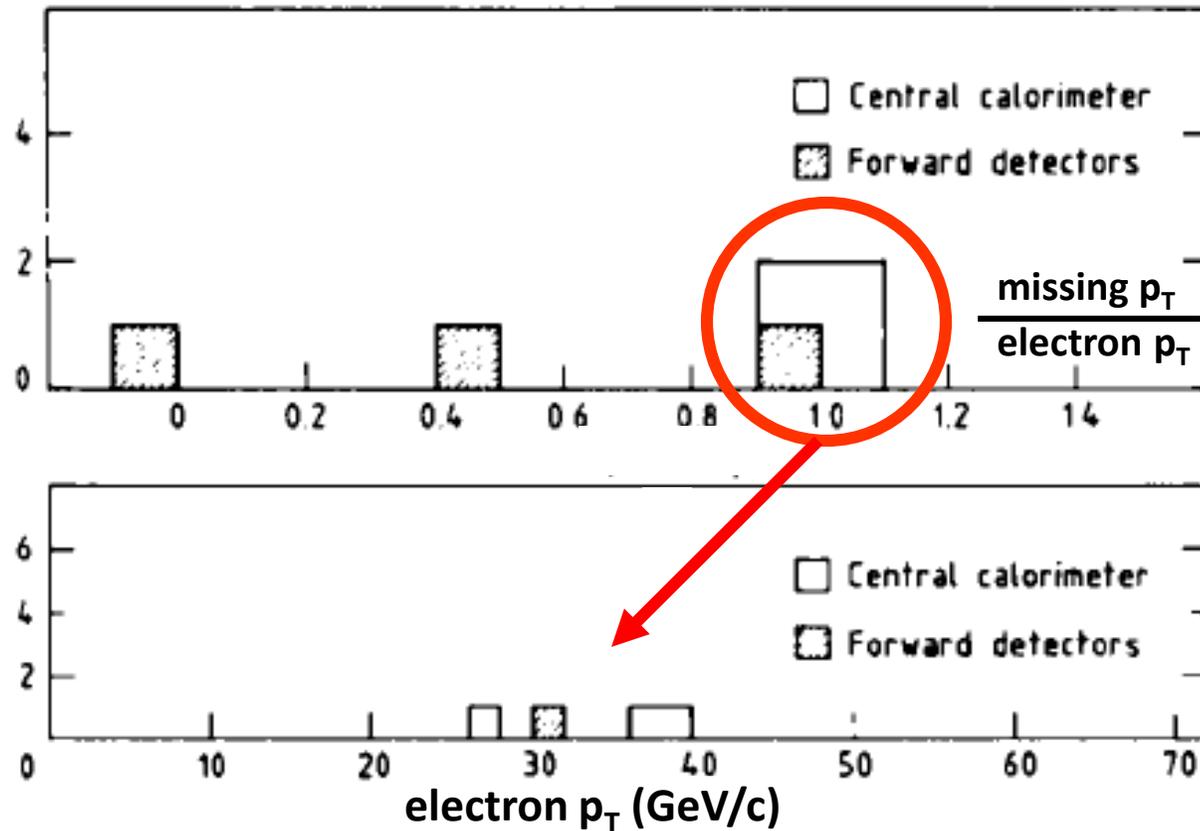
calorimetro adronico 2 sezioni indipendenti, spessore totale 4λ



Dettaglio cella calorimetro centrale UA2

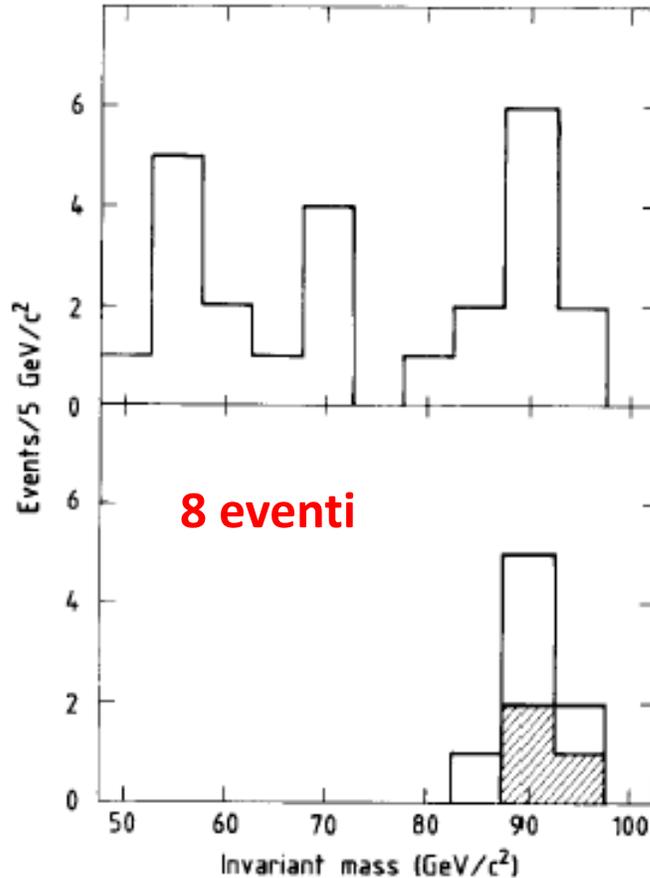
UA2: risultati presentati ad un seminario al CERN il 21 gennaio 1983

Sei eventi contenenti un elettrone con $p_T > 15$ GeV/c ;
quattro di questi hanno anche p_T mancante elevato.



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

(giugno 1983)



Due depositi di energia con $p_T > 25$ GeV
nei calorimetri elettromagnetici;
energia nelle celle dei calorimetri adronici
compatibile con elettroni

Presenza di una traccia identificata come elettrone
Isolato diretta verso almeno uno dei depositi di
energia

■ Due tracce identificate come elettroni isolati
dirette verso entrambi i depositi di energia

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

(stat) (sist)



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

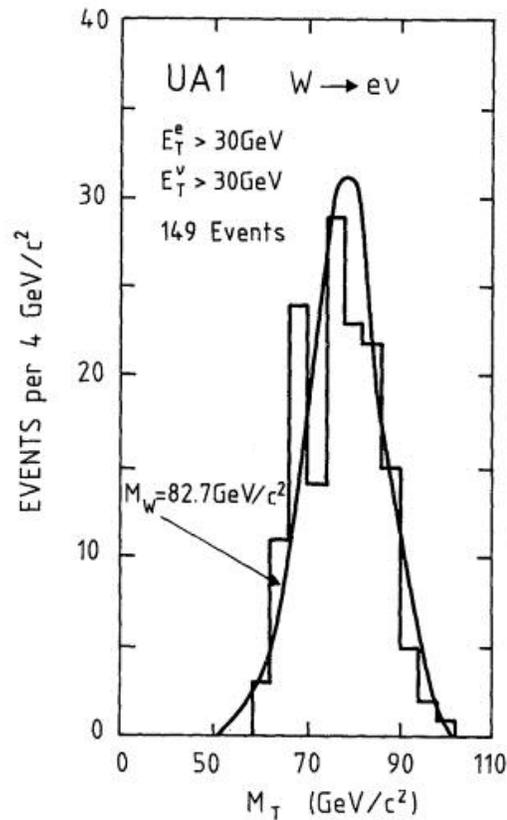


$W \rightarrow e \nu$: dati 1982 - 85

Distribuzione in “massa trasversa” m_T

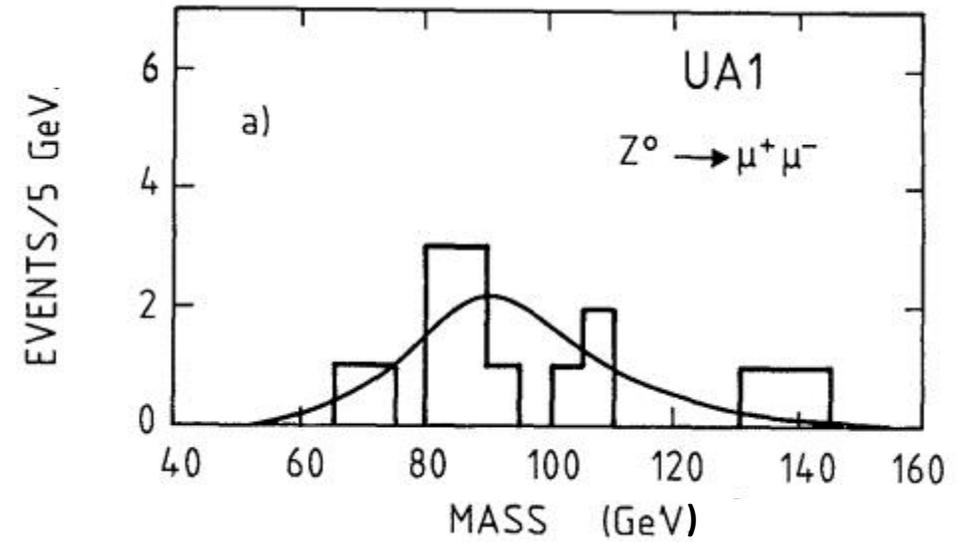
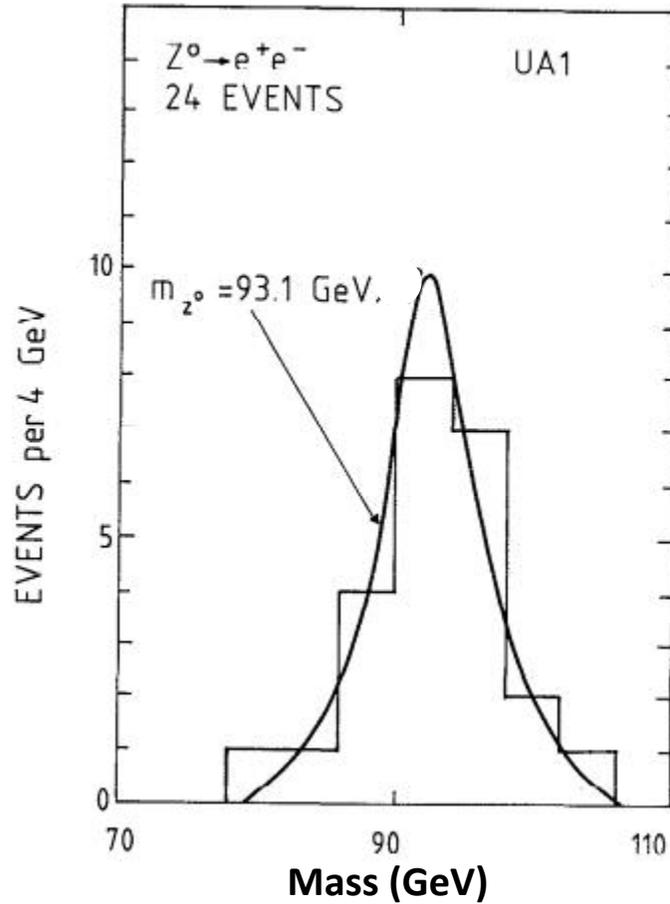
M_T : massa invariante calcolata usando le componenti dell'impulso dell'elettrone e del neutrino perpendicolari all'asse dei fasci (indipendente dal p_T del W)

$$M_T^2 = (|\vec{p}_{Te}| + |\vec{p}_{T\nu}|)^2 - (\vec{p}_{Te} + \vec{p}_{T\nu})^2$$



$$m_W = 82.7 \pm 1.0(\text{stat}) \pm 2.7(\text{sist}) \text{ GeV}$$

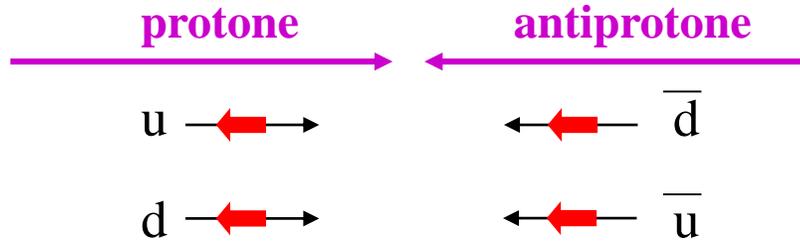
$Z \rightarrow e^+ e^-$: dati UA1 1982 - 85



$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$: $m_Z = 93.1 \pm 5.0(\text{stat}) \pm 3.2(\text{sist}) \text{ GeV}$

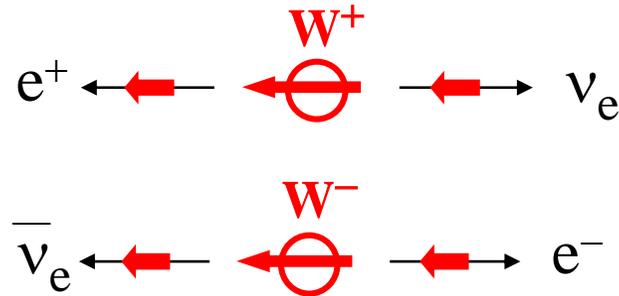
$Z \rightarrow e^+ e^-$: $m_Z = 93.1 \pm 1.0(\text{stat}) \pm 3.1(\text{sist}) \text{ GeV}$

Asimmetria di carica nel decadimento $W \rightarrow e \nu$



**polarizzazione W^\pm parallela
alla direzione degli antiprotoni**
(conseguenza dell'interazione $V - A$)

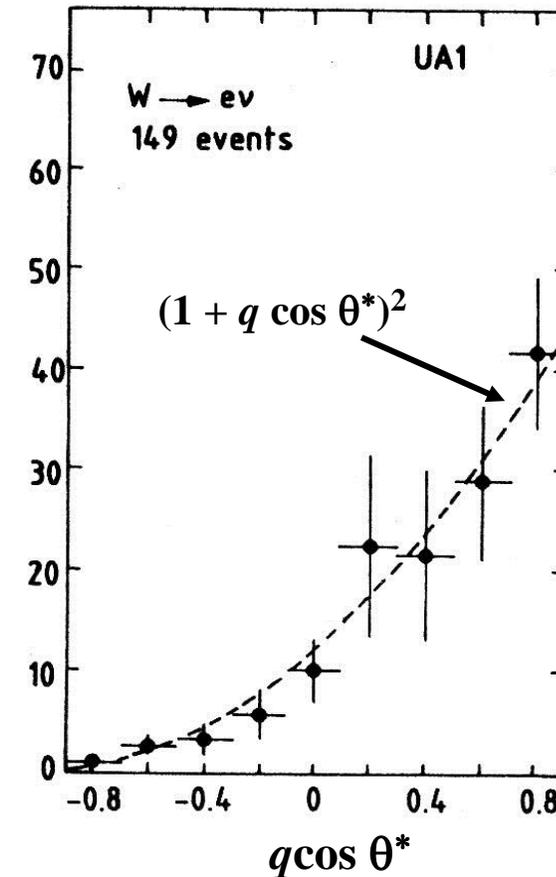
Nel sistema di riposo del W :



Distribuzione angolare e^\pm :

$$\frac{dn}{d \cos \theta^*} \propto (1 + q \cos \theta^*)^2$$

$q = +1$ per positroni; $q = -1$ per elettroni ;
 $\theta^* = 0$: direzione antiprotoni .

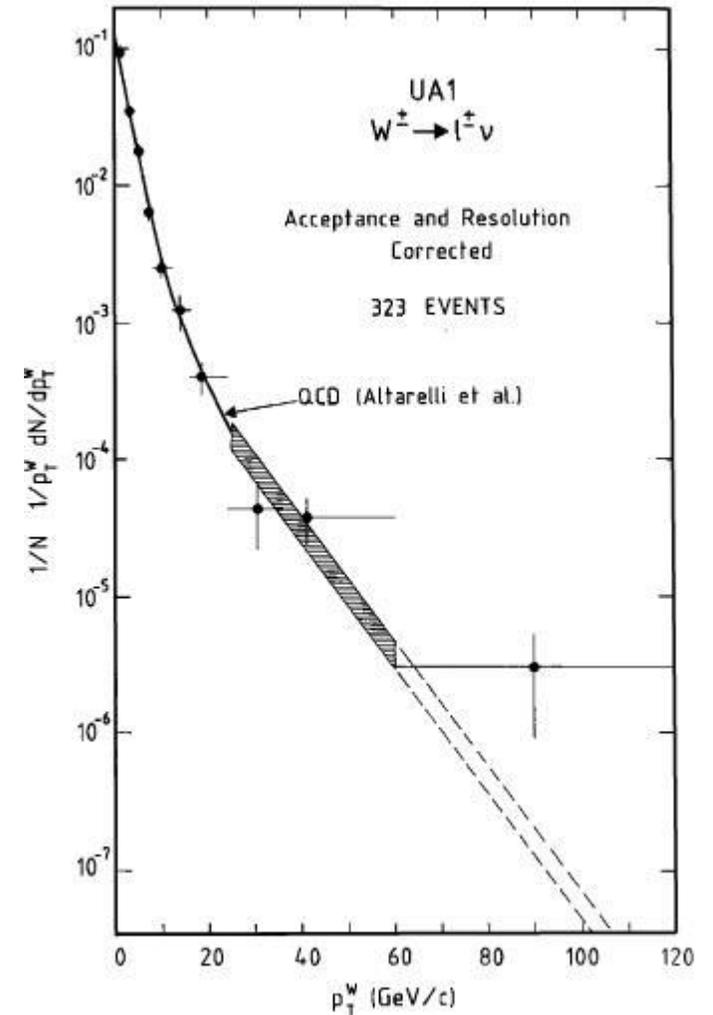


Impulso trasverso del bosone W (\vec{p}_T^W)

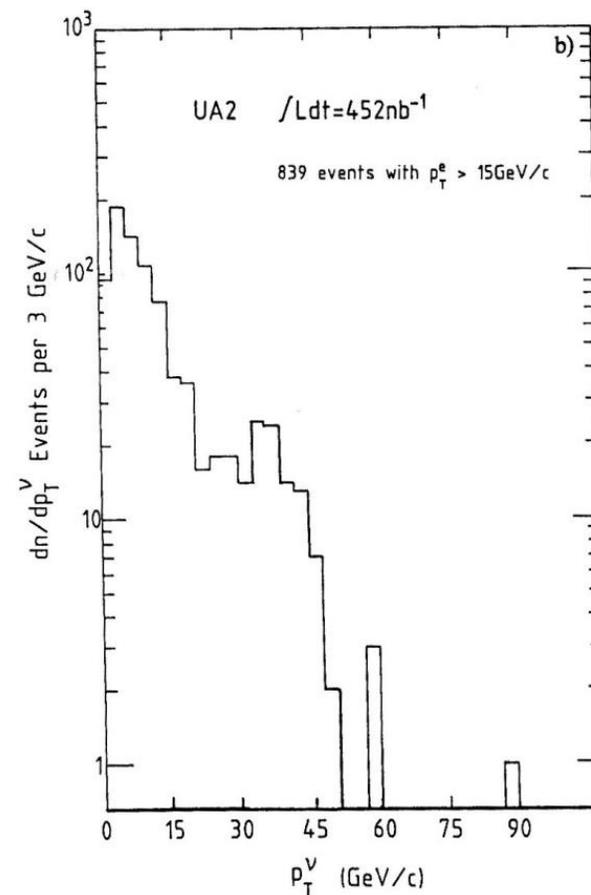
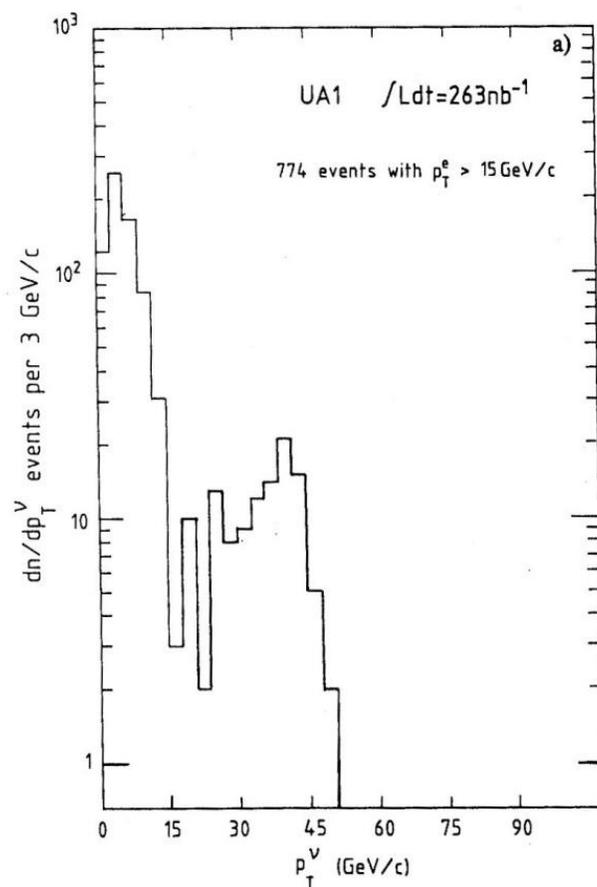
- $\vec{p}_T^W \neq 0$ a causa di emissione di gluoni nello stato iniziale;
- \vec{p}_T^W vettore uguale ed opposto all'impulso trasverso totale di tutti gli adroni prodotti nella stessa collisione:

$$\vec{p}_T^W = - \sum_i \vec{p}_T^i$$

- Distribuzione di p_T^W predetta da QCD

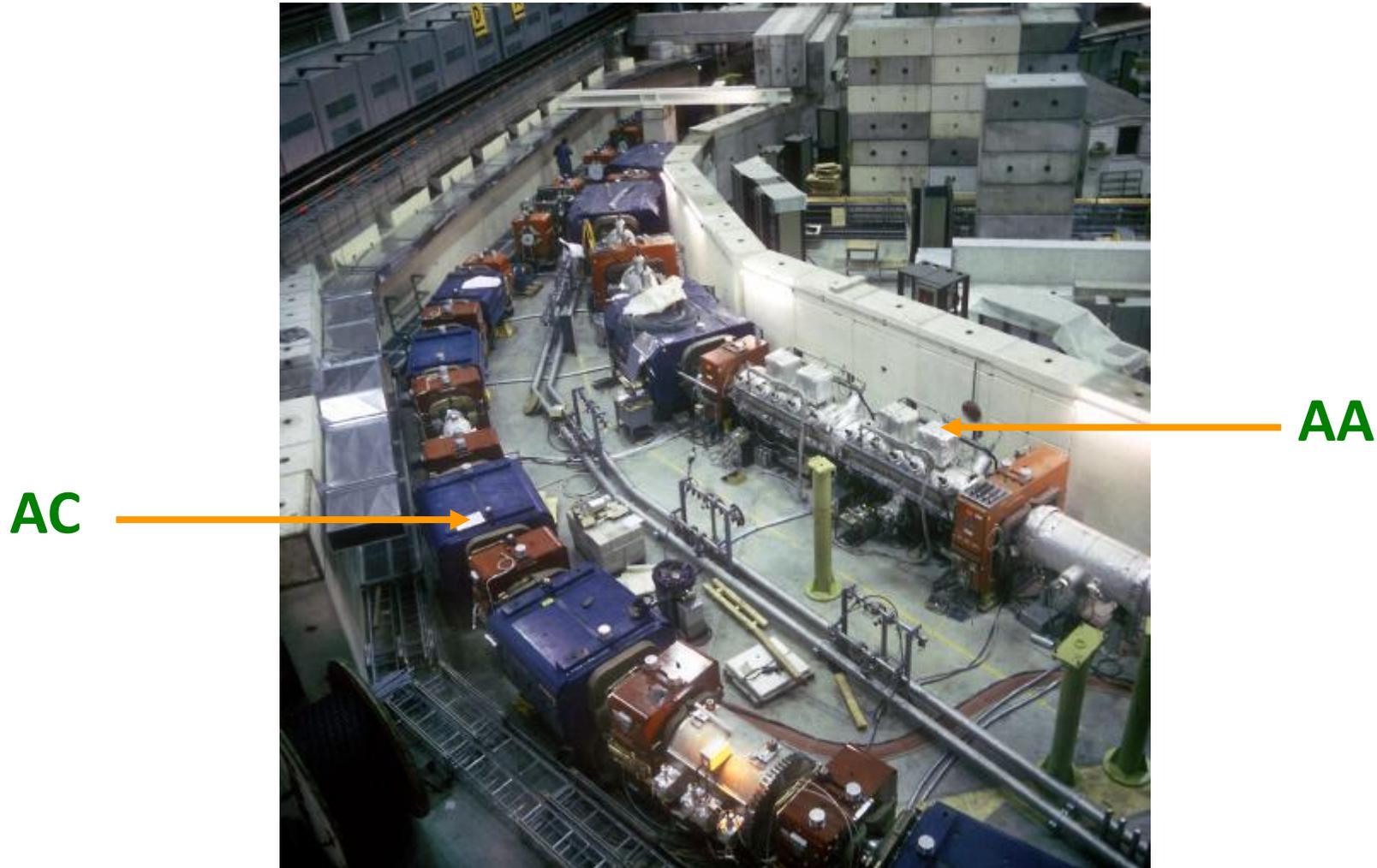


Distribuzioni in impulso trasverso mancante (p_T^V)



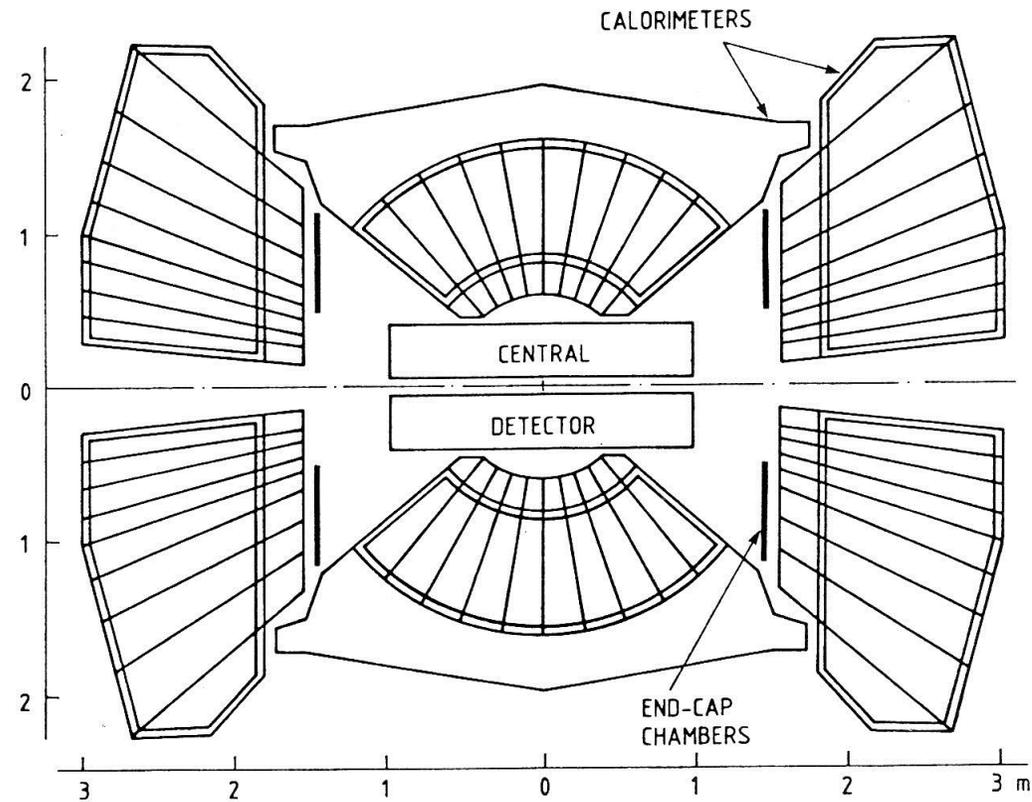
La separazione tra eventi con p_T^V artificiale (da effetti strumentali) e p_T^V genuino è molto più chiara in UA1 (rivelatore “ermetico”) rispetto ad UA2 (nessun calorimetro per $\theta < 20^\circ$, solo elettromagnetico per $20^\circ < \theta < 40^\circ$).

1986 – 90: un secondo anello magnetico (“Antiproton Collector” AC)
concentrico all’ AA – aumento dell’accettanza per
impulsi singoli di antiprotoni : $7 \times 10^7 \bar{p}$ / impulso
 \Rightarrow velocità di accumulazione moltiplicata per ~ 10

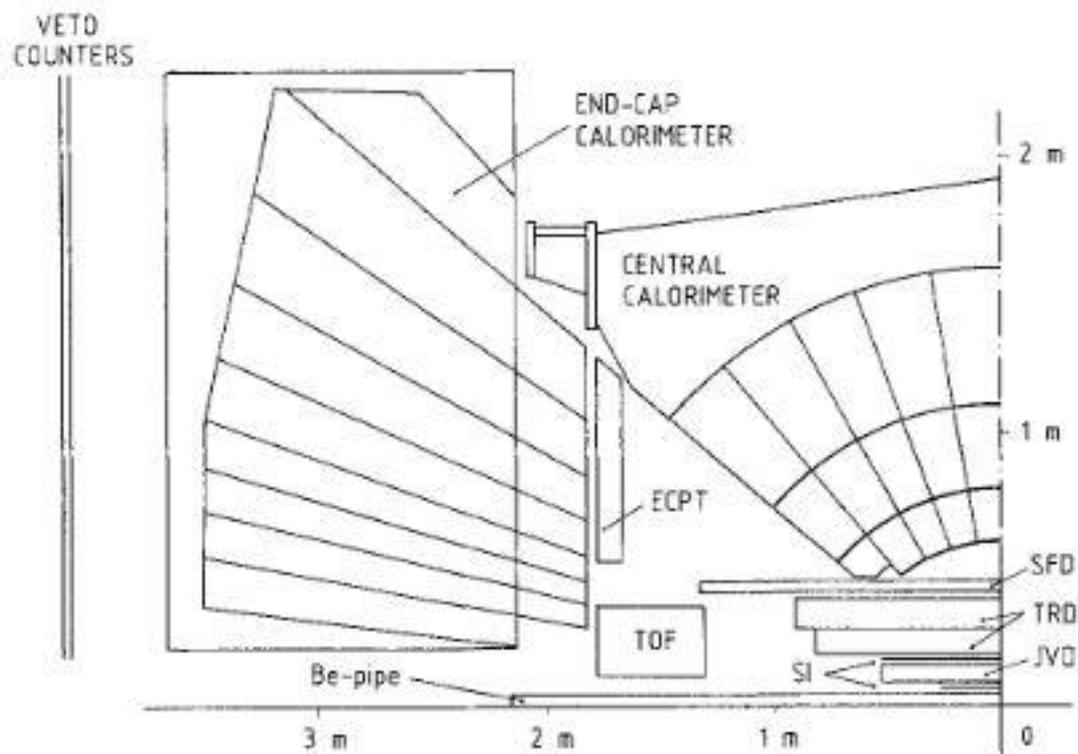


Rivelatore UA2 1987 - 90

- **Luminosità collider aumentata (X 10)**
- **Calorimetria completa fino a $\sim 5^\circ$ rispetto all'asse dei fasci**
⇒ **misura del p_T mancante migliorata**
- **Assenza di campo magnetico e di rivelatori di muoni**



Nuovo rivelatore di tracce



Nuovi collaboratori: Cambridge, Dortmund, Heidelberg, Melbourne, Milano, Perugia, Pisa

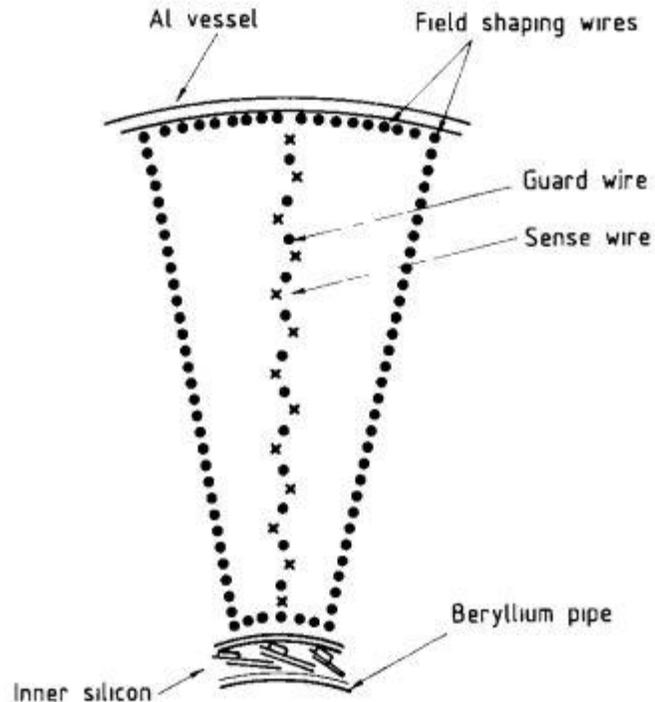
Uno dei contributi del gruppo di Pisa: progetto, costruzione e messa a punto di uno dei tracciatori centrali

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A283 (1989) 532–538
North-Holland Amsterdam

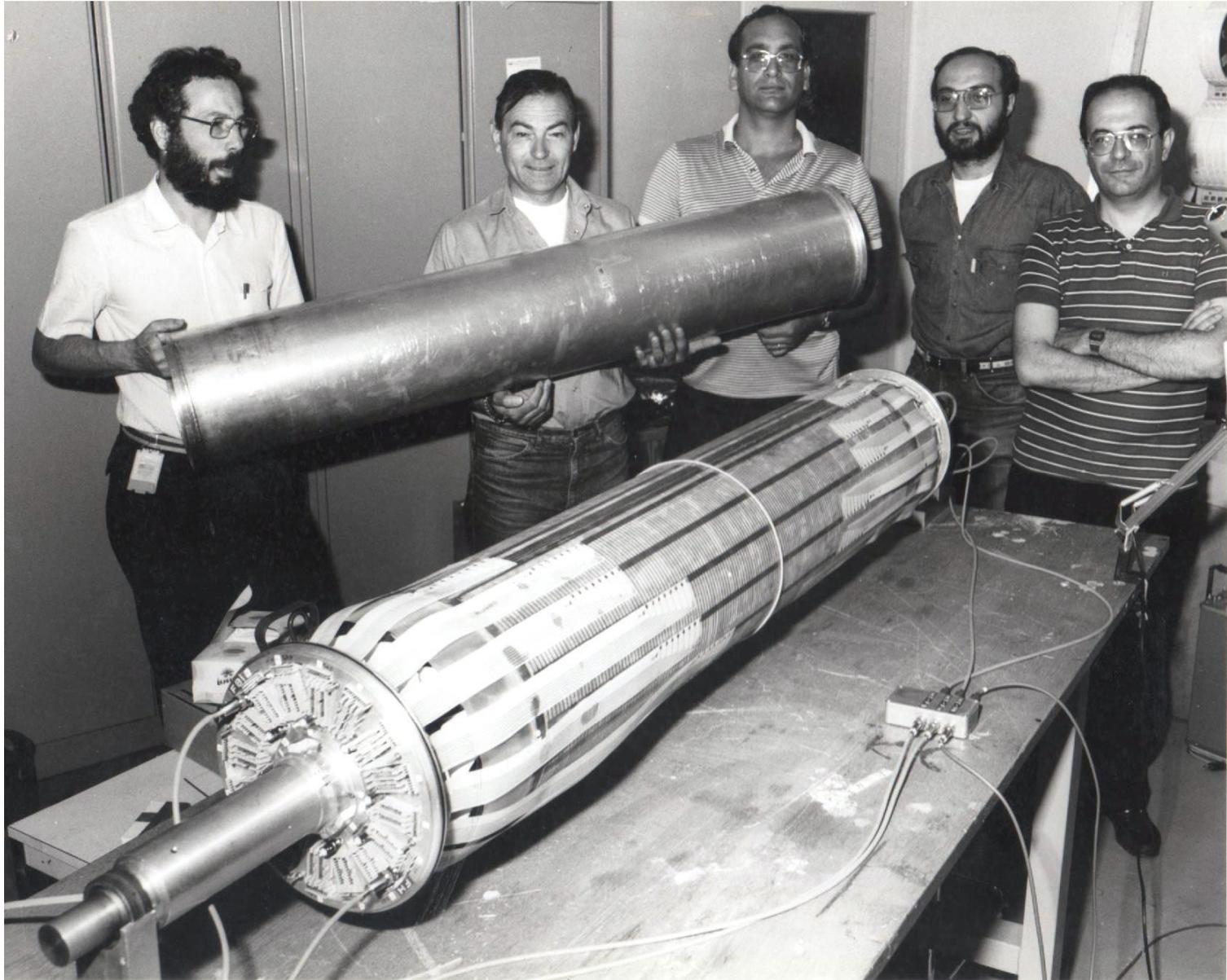
PERFORMANCE OF THE UA2 JET VERTEX DETECTOR AT THE CERN COLLIDER *

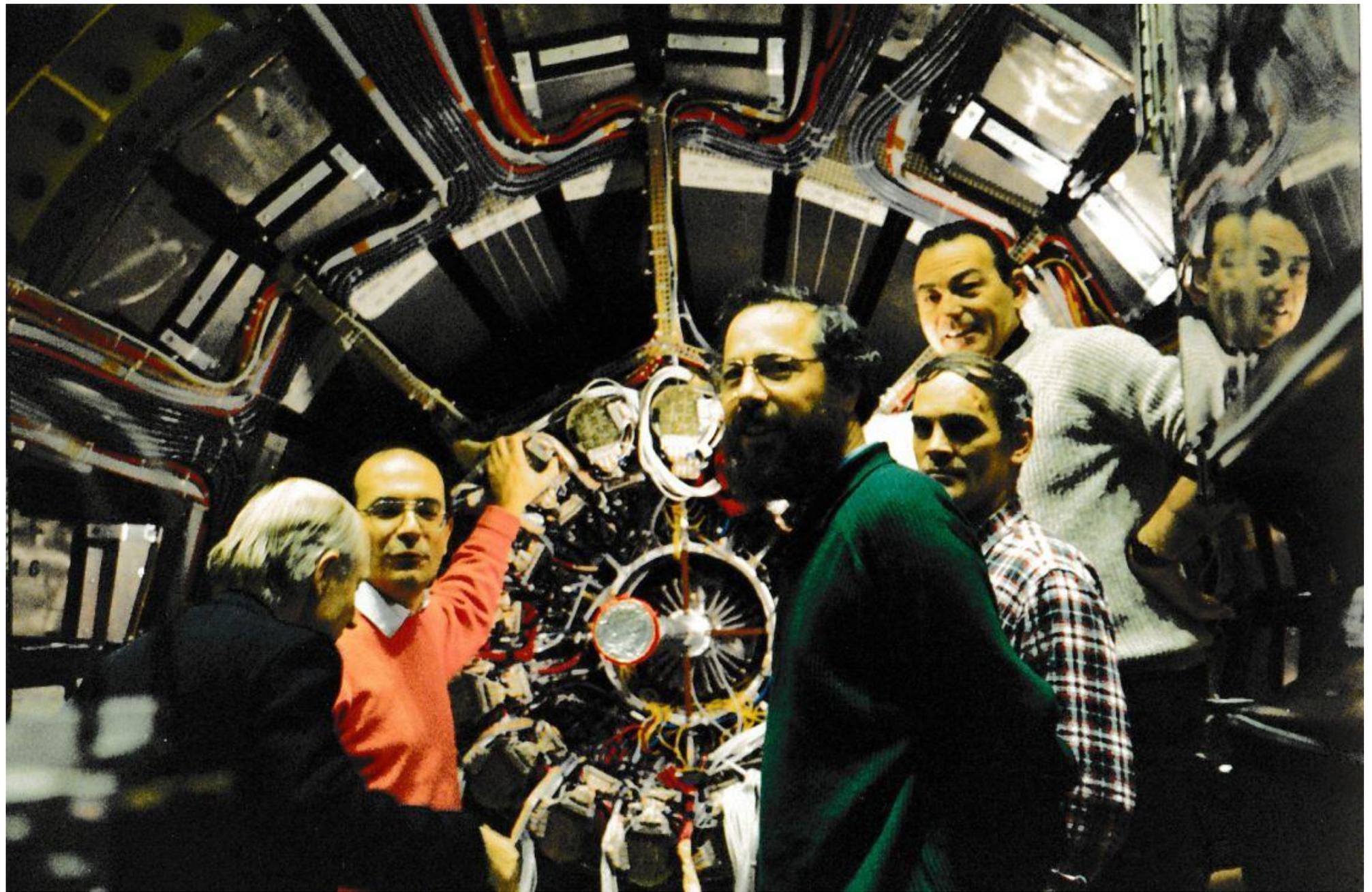
F. BOSI, G. CARBONI, V. CAVASINNI, F. COSTANTINI, T. DEL PRETE, **E. IACOPINI** ⁺,
S. LAMI, P. LARICCIA ⁺⁺, M. MORGANTI [§], C. PETRIDOU, D. RIZZI, A. SASSU
and M. VALDATA-NAPPI ^{§§}

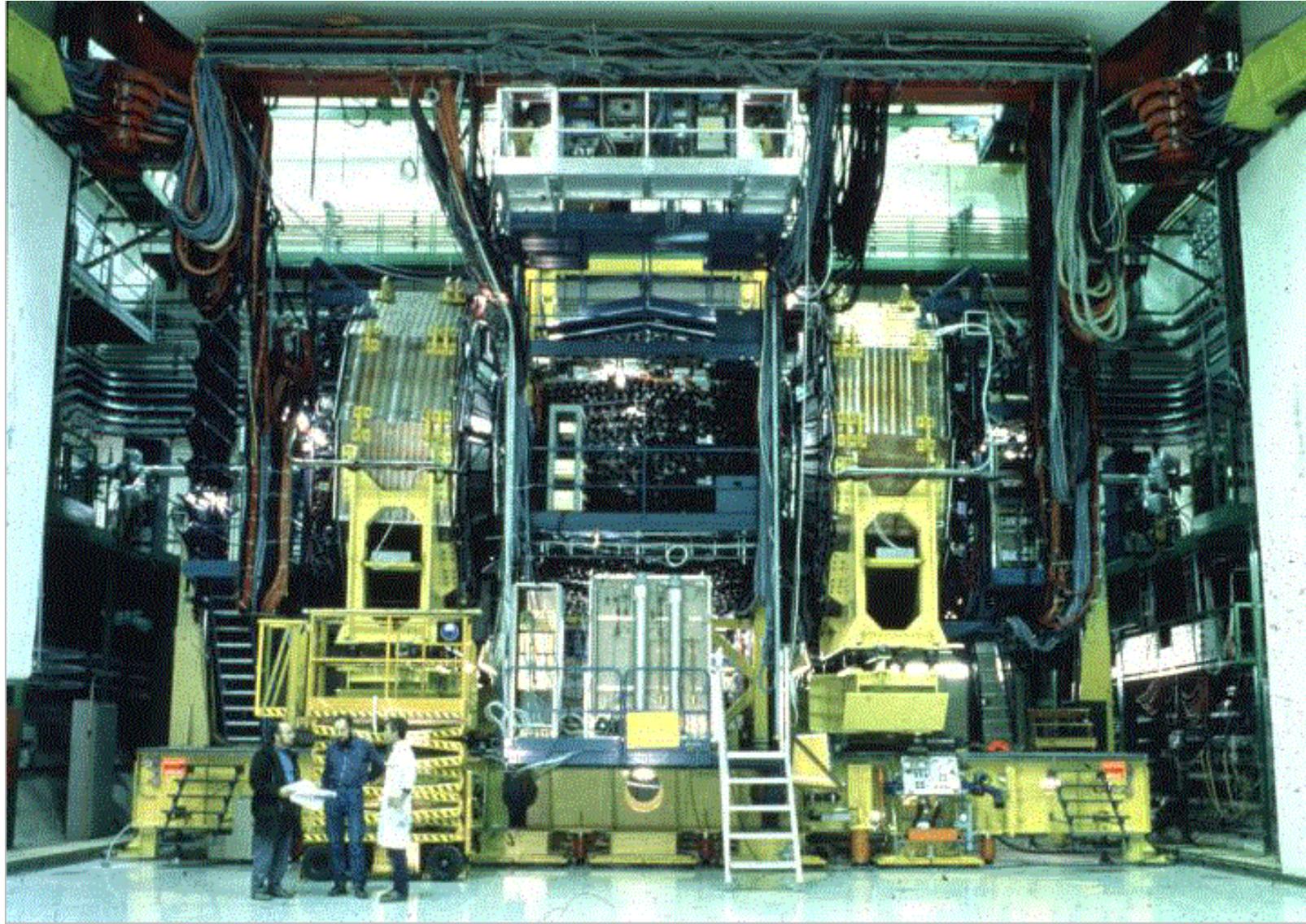
INFN and Dipartimento di Fisica dell'Università, Pisa, Italy



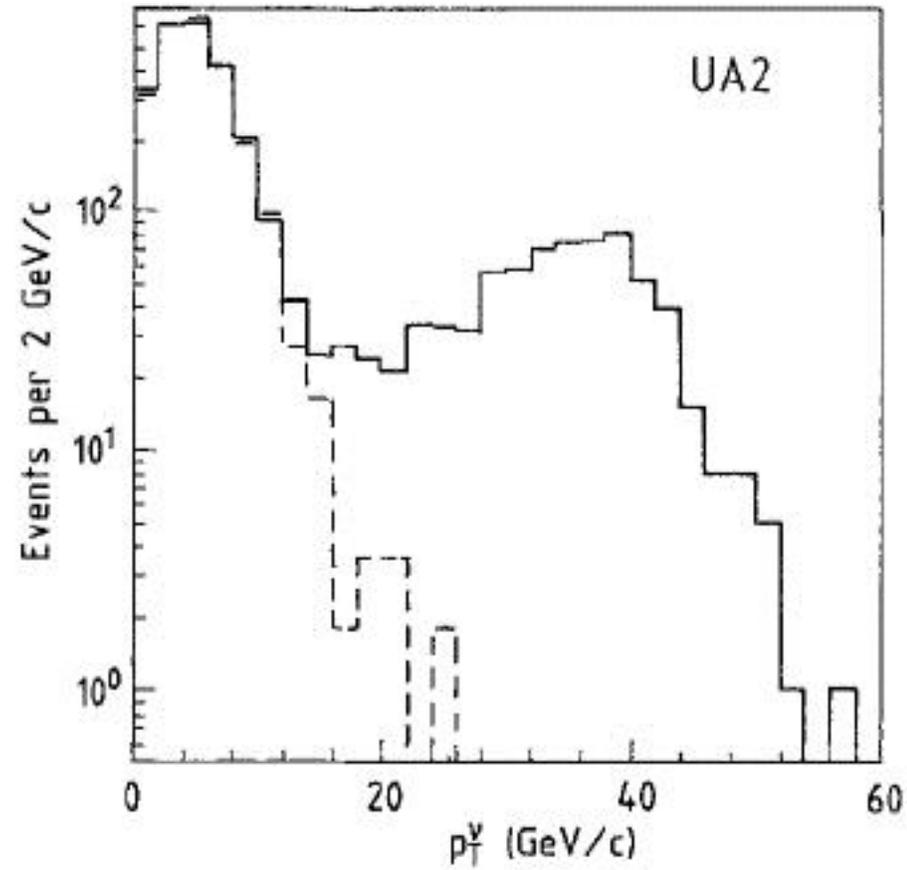
- 16 settori azimutali
- 13 fili di misura / settore
- Volume sensibile:
 - Luoghezza 1 m
 - Raggio interno 40 mm
 - Raggio esterno 123.8 mm
- Risoluzione trasversale 0.18 mm
- Risoluzione longitudinale 2.5 mm
- Separazione minima tra due tracce 2mm







Distribuzioni in impulso trasverso mancante (p_T^{ν}) nel rivelatore UA2 modificato



Scopo principale del nuovo rivelatore UA2: scoperta del quark top.

Condizione necessaria: $m_{\text{top}} < 70 \text{ GeV}$

→ Decadimenti $W^+ \rightarrow t\bar{b}, t \rightarrow be^+\nu$; $W^- \rightarrow \bar{t}b, \bar{t} \rightarrow \bar{b}e^-\bar{\nu}$ energeticamente possibili

(Eventi con un elettrone, due jets e impulso trasverso mancante)

Il quark top fu finalmente scoperto nel 1995 al collider protone - antiprotone da 1.8 TeV al Fermilab, con una massa $m_{\text{top}} \sim 173 \text{ GeV}$, troppo grande per essere prodotto e rivelato al collider protone - antiprotone del CERN.

UA2: misura precisa del rapporto $\frac{m_W}{m_Z}$

Physics Letters B 276 (1992) 354–364
North-Holland

PHYSICS LETTERS B

An improved determination of the ratio of W and Z masses at the CERN $\bar{p}p$ collider

UA2 Collaboration

Bern–Cambridge–CERN–Dortmund–Heidelberg–Melbourne–Milano–Orsay (LAL)–Pavia–
Perugia–Pisa–Saclay (CEN)

J. Alitti ^a, G. Ambrosini ^b, R. Ansari ^c, D. Autiero ^d, P. Bareyre ^a, I.A. Bertram ^e, G. Blaylock ^{f,1},

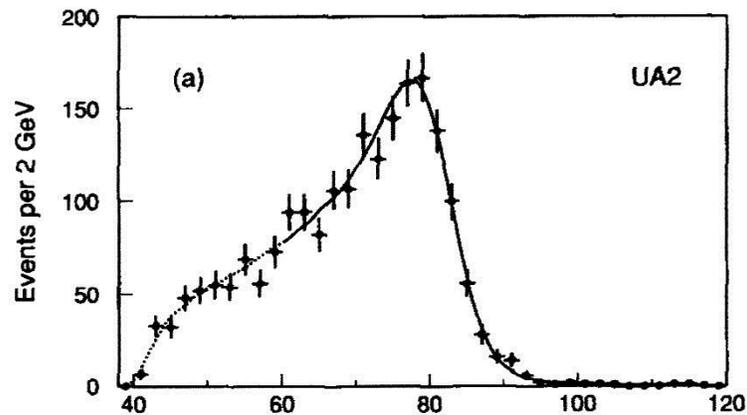
.....
R. Ferrari ^b, M. Fraternali ^{b,3}, D. Froidevaux ^f, G. Fumagalli ^b, J.M. Gaillard ^c, F. Gianotti ^h,
O. Gildemeister ^f, C. Gössling ^k, V.G. Goggi ^b, S. Grünendahl ^l, K. Hara ^{g,4}, S. Hellman ^f,
J. Hřivnac ^f, H. Hufnagel ^k, E. Hugentobler ^g, K. Hultqvist ^{f,5}, E. Iacopini ^{d,6}, J. Incandela ^h,
K. Jakobs ^f, P. Jenni ^f, E.E. Kluge ^l, N. Kurz ^l, S. Lami ^d, P. Lariccia¹, M. Lefebvre ^f,
.....

Incerteza sulla scala di energia dei calorimetri (tipicamente $\pm 1\%$)

trascurabile nel rapporto delle masse

→ errore sul rapporto dominato dall'incerteza statistica

Distribuzione massa trasversa
2065 decadimenti $W \rightarrow e \nu$

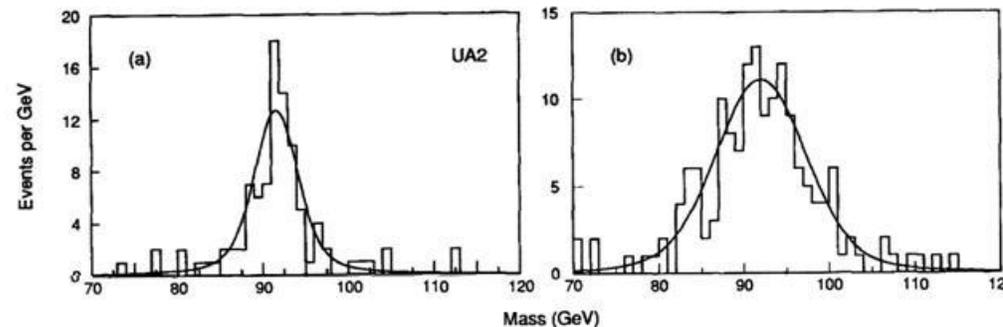


$$m_W = 80.84 \pm 0.22 \text{ GeV}$$

$Z \rightarrow e^+ e^-$

95 eventi

156 eventi



$$m_Z = 91.74 \pm 0.28 \text{ GeV}$$

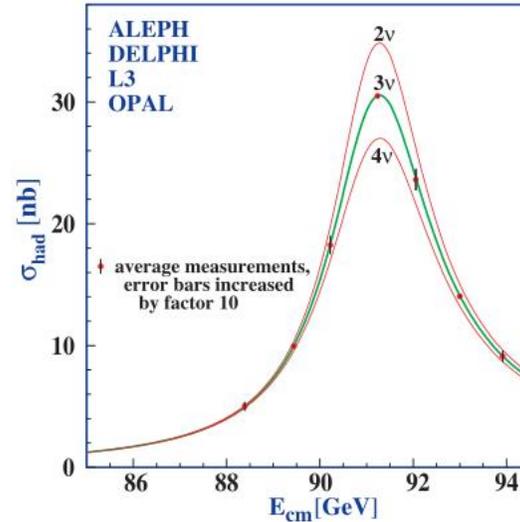
Errori statistici



$$\frac{m_W}{m_Z} = 0.8813 \pm 0.0036 \pm 0.0019$$

(origine dell'errore sistematico:
non-linearità dei calorimetri)

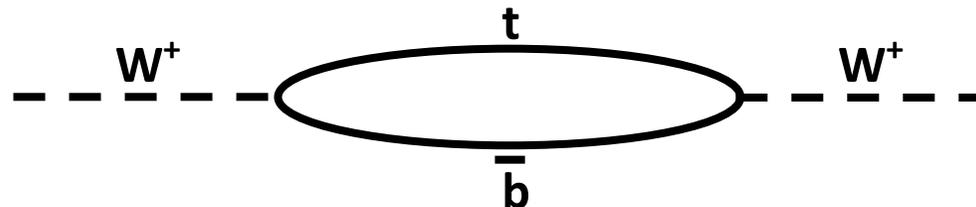
1989: entrata in funzionamento al CERN del collider e^+e^- LEP
 → misura precisa della massa del bosone Z

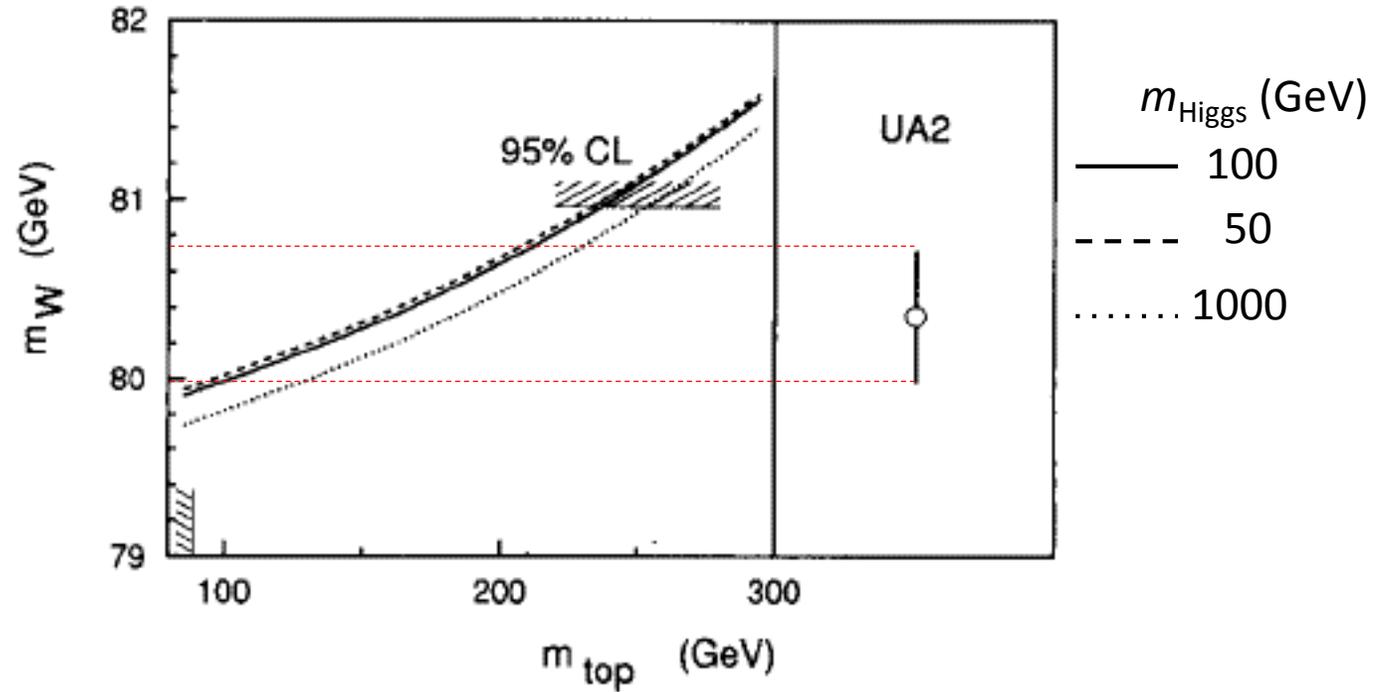


Usando il valore misurato al LEP nel 1990 ($m_Z = 91.175 \pm 0.021$) si ottiene:

$$m_W = 80.35 \pm 0.33 \pm 0.17 \text{ GeV}$$

Nel Modello Standard, per m_Z fissato, m_W dipende dal quadrato della massa del quark top (m_{top}) a causa di correzioni radiative elettrodeboli dovute a stati virtuali $t\bar{b}$ (Veltman 1977) :





Limiti sulla massa del quark top :

$$m_{top} = 160^{+50}_{-60} \text{ GeV}$$

cinque anni prima della scoperta del quark top al collider protone – antiprotone del Fermilab (energia 1.8 TeV)
 con $m_{top} = 174 \pm 10 \pm 13 \text{ GeV}/c^2$



**Congratulazioni a Enrico e Mario
per i contributi dati alla ricerca e
alla didattica**

**Auguri per ancora molti anni di
vita intellettualmente attiva**

