

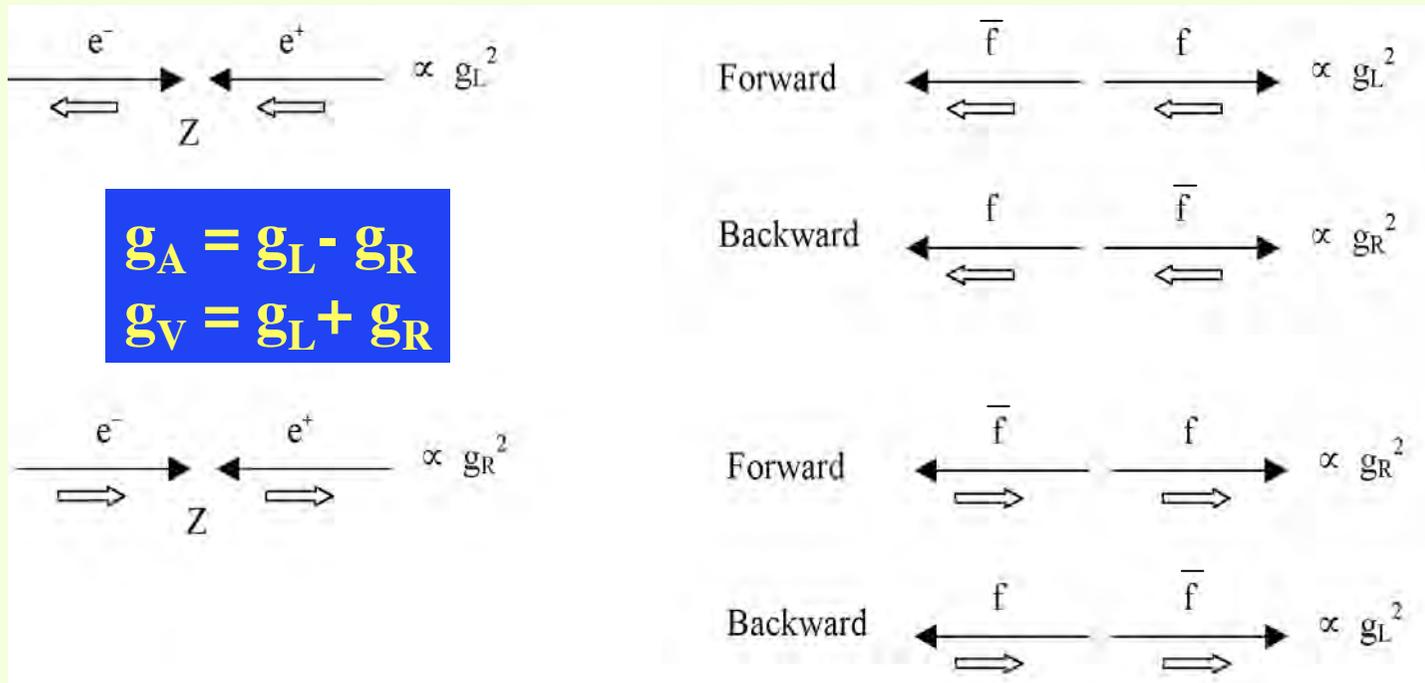
Fisica Nucleare e Subnucleare II

Lezioni n. 37 e 38

- Interazioni $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$ a LEP per $\sqrt{s} \sim m_{Z^0}$:
 - Misure di produzione "asimmetrica" di fermioni a LEP
- Interazioni $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$ a LEP per \sqrt{s} fino a >200 GeV :
 - Misure della massa e della "larghezza" totale e parziale dei W^+ , W^-
 - Misura delle sezioni d'urto $e^+ \rightarrow \leftarrow e^-$ in W^+ , W^- ed in $Z^0 Z^0$
 - Studio della produzione multiadronica a LEP2
 - Studio di α_s in eventi multiadronici
 - α_s come parametro "running" in funzione dell' E_{CM}
- Collisioni adrone $\rightarrow \leftarrow$ adrone ad alta energia ($\sqrt{s} > 10$ GeV)

Le Asimmetrie a LEP - 1

Prendiamo in esame il processo $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow f\bar{f}$ ed analizziamo l'angolo di propagazione delle particelle nello stato finale. In particolare **consideriamo l'angolo del fermione** (particella, non l'antiparticella) **nello stato finale rispetto alla direzione dell'elettrone** (particella) **nello stato iniziale**. Si ha una asimmetria nella sezione d'urto poichè $g_L \neq g_R$, il fermione preferisce avere spin opposto alla direzione del moto (left-handed) ed al limite di massa nulla è il solo stato possibile (V-A). Si definisce asimmetria:



$$g_A = g_L - g_R$$

$$g_V = g_L + g_R$$

$$A_f = \frac{g_L^2 - g_R^2}{g_L^2 + g_R^2} =$$

$$2 \frac{c_V^f c_A^f}{(c_V^f)^2 + (c_A^f)^2} =$$

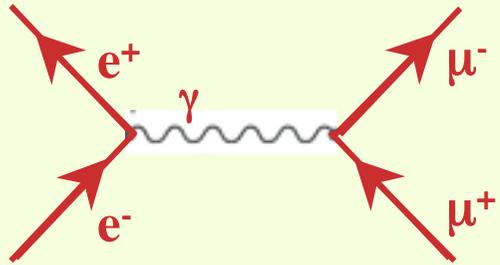
$$2 \frac{c_V^f / c_A^f}{1 + (c_V^f)^2 / (c_A^f)^2}$$

$$c_V^f = I_3 - 2Q_f \sin^2 \theta_W \quad ; \quad c_A^f = I_3 \quad ; \quad \text{sign}(I_3) = \text{sign}(Q_f) \quad ; \quad |I_3| = 1/2 \quad ; \quad \Rightarrow c_V^f / c_A^f = 1 - 4 |Q_f| \sin^2 \theta_W$$

Misurando l'asimmetria si può ottenere una misura precisa del valore di $\sin^2 \theta_W$

In particolare possiamo analizzare l'asimmetria del canale

$$e^+e^- \rightarrow \gamma/Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$$

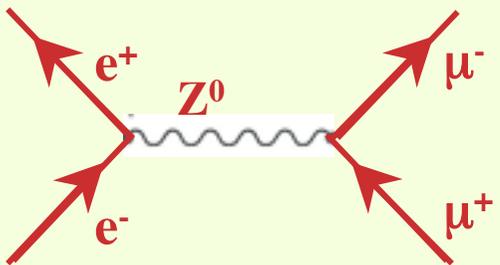


Per tale canale la sezione d'urto (elettromagnetica) è

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{4\pi\alpha_{EM}^2 (\hbar c)^2}{3s}$$

$$e \quad \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha_{EM}^2}{4s} (1 + \cos^2 \theta^*)$$

simmetria avanti/dietro



In questo caso si ha una interazione **debole** in cui possiamo aspettarci una violazione della parità

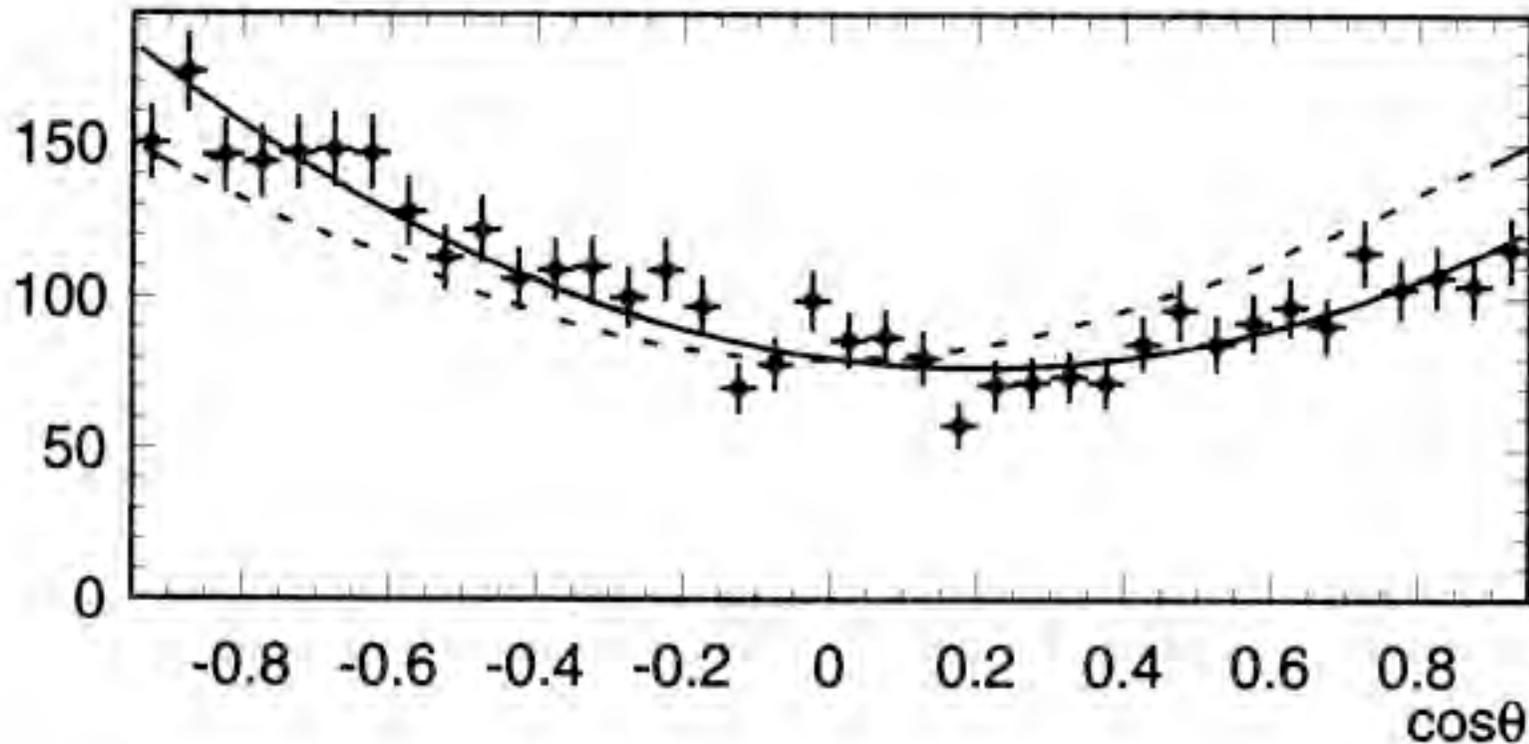
Considerando i due contributi, ed il termine d'interferenza fra di essi, si arriva a scrivere una $d\sigma/d\Omega$ in cui appare un **termine "simmetrico"** in θ ed un **termine anti-simmetrico**

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{g_Z^2 E^2}{16\pi[(2E)^2 - M_Z^2]} \right)^2 \{ [(c_V^f)^2 + (c_A^f)^2][(c_V^e)^2 + (c_A^e)^2](1 + \cos^2 \theta) + 8c_V^f c_A^f c_V^e c_A^e \cos \theta \}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{g_Z^2 E^2}{16\pi[(2E)^2 - M_Z^2]} \right)^2 [(c_V^f)^2 + (c_A^f)^2][(c_V^e)^2 + (c_A^e)^2](1 + \cos^2 \theta + 2A_e A_f \cos \theta)$$

Le Asimmetrie a LEP - 2

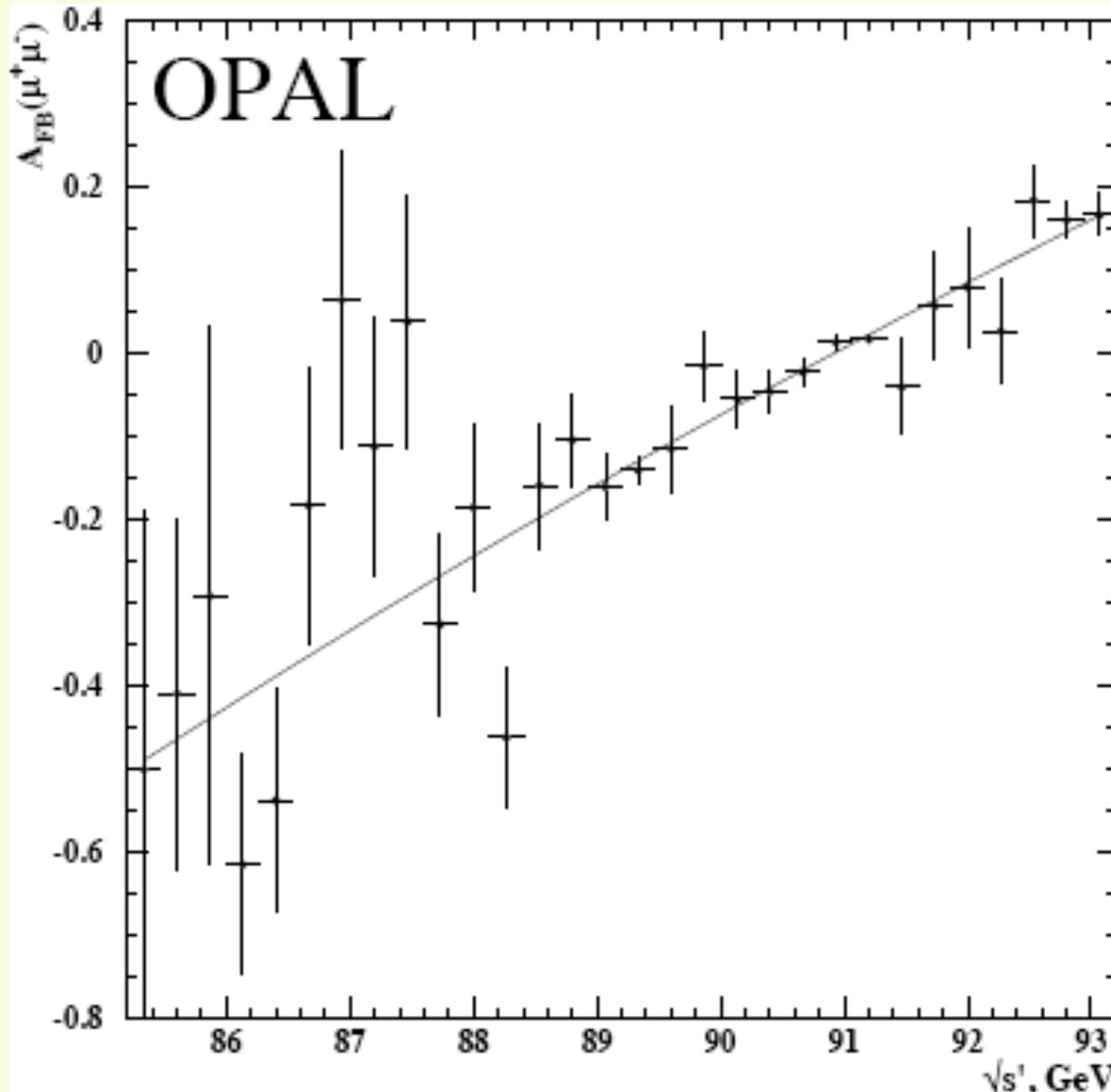
$$e^+e^- \rightarrow \gamma/Z^0 \rightarrow f\bar{f}$$



Distribuzione angolare, nel sistema del c.m., del muone per $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ a $\sqrt{s} \simeq 89$ GeV. La linea tratteggiata rappresenta la forma $(1 + \cos^2 \theta^*)$ predetta della sola interazione elettromagnetica; la linea intera è l'ottimizzazione ai dati sperimentali, in cui vi è un piccolo effetto dovuto alle interazioni deboli

Le Asimmetrie a LEP - 3

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{g_Z^2 E^2}{16\pi[(2E)^2 - M_Z^2]} \right)^2 [(c_V^f)^2 + (c_A^f)^2] [(c_V^e)^2 + (c_A^e)^2] (1 + \cos^2\theta + 2A_e A_f \cos\theta)$$



Al "picco" della Z^0 l'asimmetria avanti-indietro è data da

$$A_{FB}^f = \frac{N_F^f - N_B^f}{N_F^f + N_B^f} = \frac{\sigma_F^f - \sigma_B^f}{\sigma_F^f + \sigma_B^f} = \frac{3}{4} A_e A_f$$

Assumendo il valore A_e da altre misure (di fatto si deve conoscere la "polarizzazione" dei fasci) e misurando i valori di A_f per tutti i fermioni in cui lo Z^0 può decadere, sono state fatte verifiche importanti del modello elettrodebole.

In particolare dalle

$$c_V^f / c_A^f = 1 - 4 |Q_f| \sin^2 \theta_W$$

è stato possibile ricavare una misura molto precisa di $\sin^2 \theta_W$

Asimmetria Avanti – Indietro (Forward – Backward) al picco

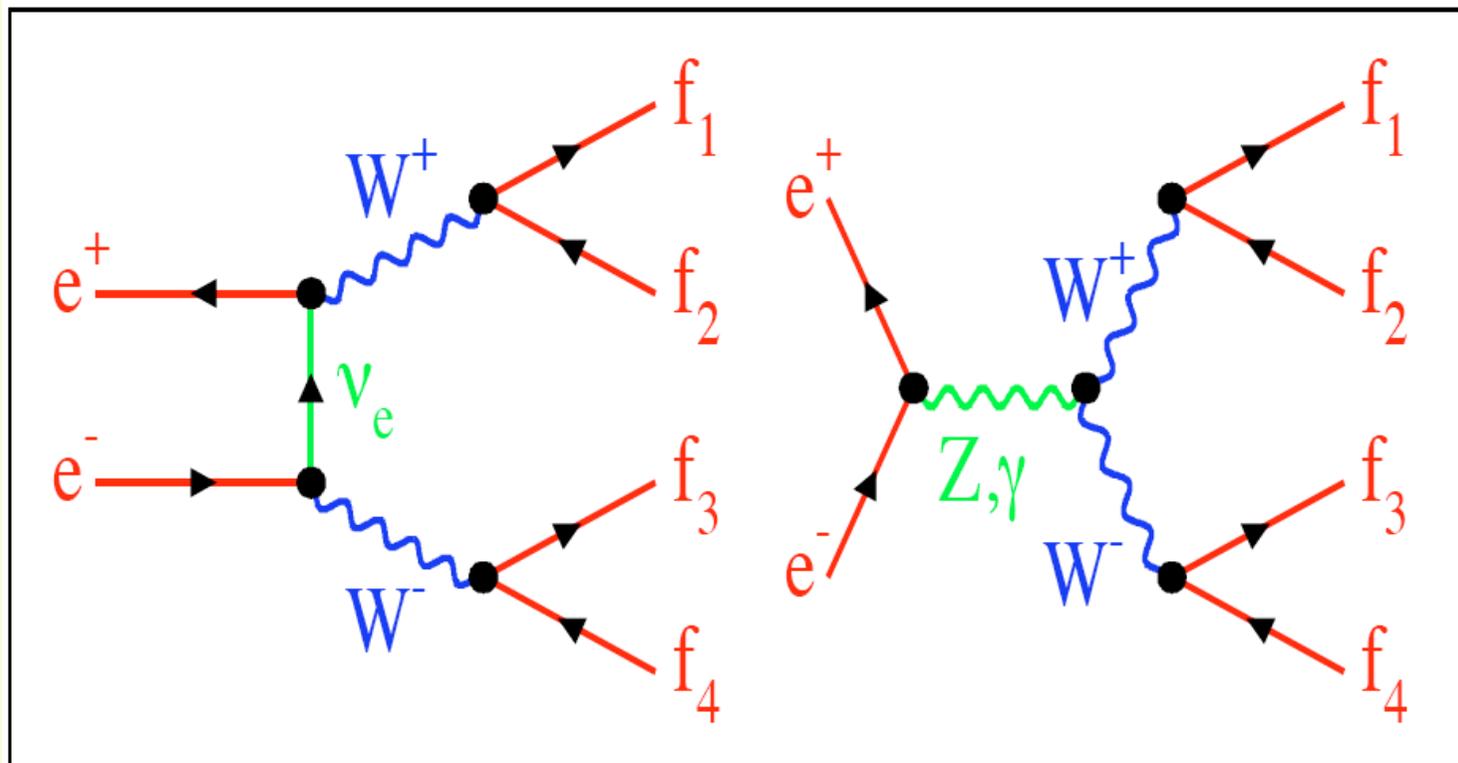
$$A_{FB}^f = \frac{N_F - N_B}{N_F + N_B} = \frac{\int_0^1 \frac{d\sigma^f}{d\cos\theta} d\cos\theta - \int_{-1}^0 \frac{d\sigma^f}{d\cos\theta} d\cos\theta}{\int_0^1 \frac{d\sigma^f}{d\cos\theta} d\cos\theta + \int_{-1}^0 \frac{d\sigma^f}{d\cos\theta} d\cos\theta} = \frac{3}{4} A_e A_f$$

LEP risultati finali



Collisioni $e^+ e^-$ a LEP2 con $\sqrt{s} > 100$ GeV

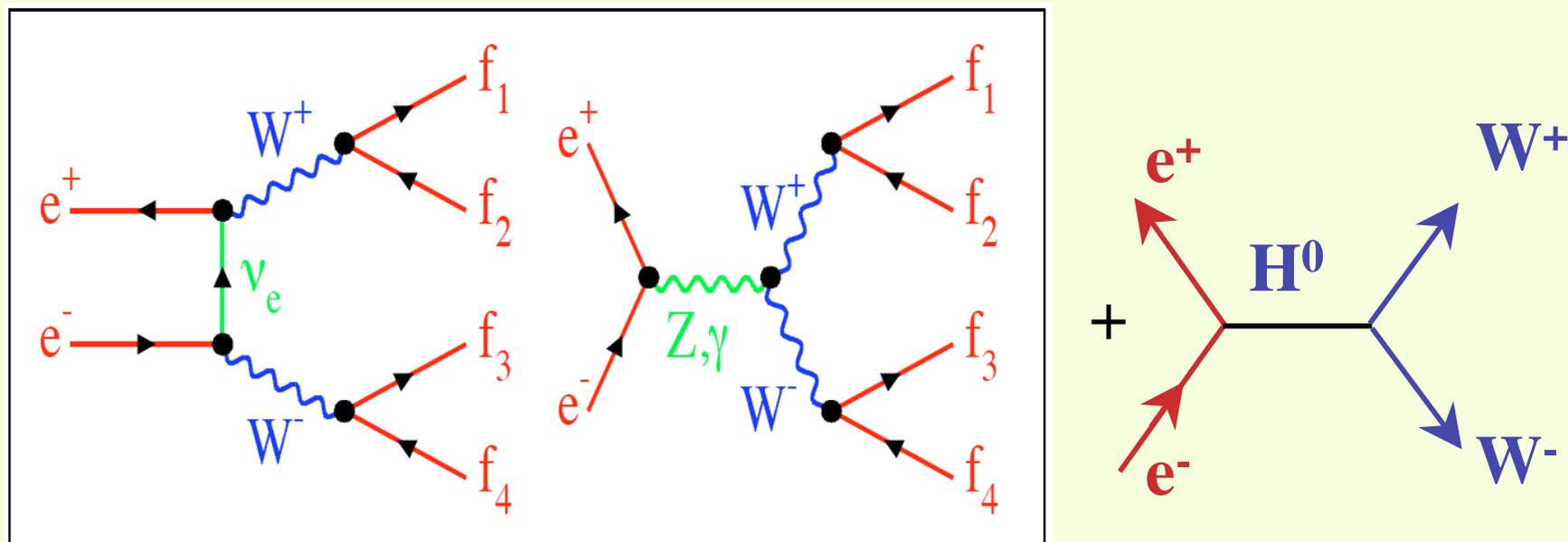
Sicuramente uno degli obiettivi più interessanti da raggiungere era la produzione di coppie di "bosoni intermedi deboli": $Z^0 Z^0$, $W^+ W^-$, per studiarne la sezione d'urto e per misurare con lo stesso apparato le masse dei bosoni carichi e neutro e ottenere così una ulteriore stima dei parametri "elettrodeboli"



$$G_F = \frac{\pi\alpha_{em}}{\sqrt{2}M_W^2 \sin^2 \theta_W} \quad \rho = \frac{M_W^2}{M_Z^2 \cos^2 \theta_W}$$

Collisioni $e^+ e^-$ a LEP2 con $\sqrt{s} > 100$ GeV

Si voleva verificare l'eventuale produzione della "particella di Higgs": H^0



Si voleva inoltre misurare il contributo del "vertice a tre bosoni": in tale canale sia il fotone che lo Z^0 (se prodotto a $ECM \neq m_{Z^0}$) sono **virtuali** (hanno impulso nullo !)
Verificare l'esistenza di nuove particelle con massa $> m_{Z^0}$
Aumentando l'energia di ogni singolo "fascio" aumenta la probabilità di "emissione radiativa" (di un fotone) con conseguente incertezza sulla energia dello Z^0 prodotto

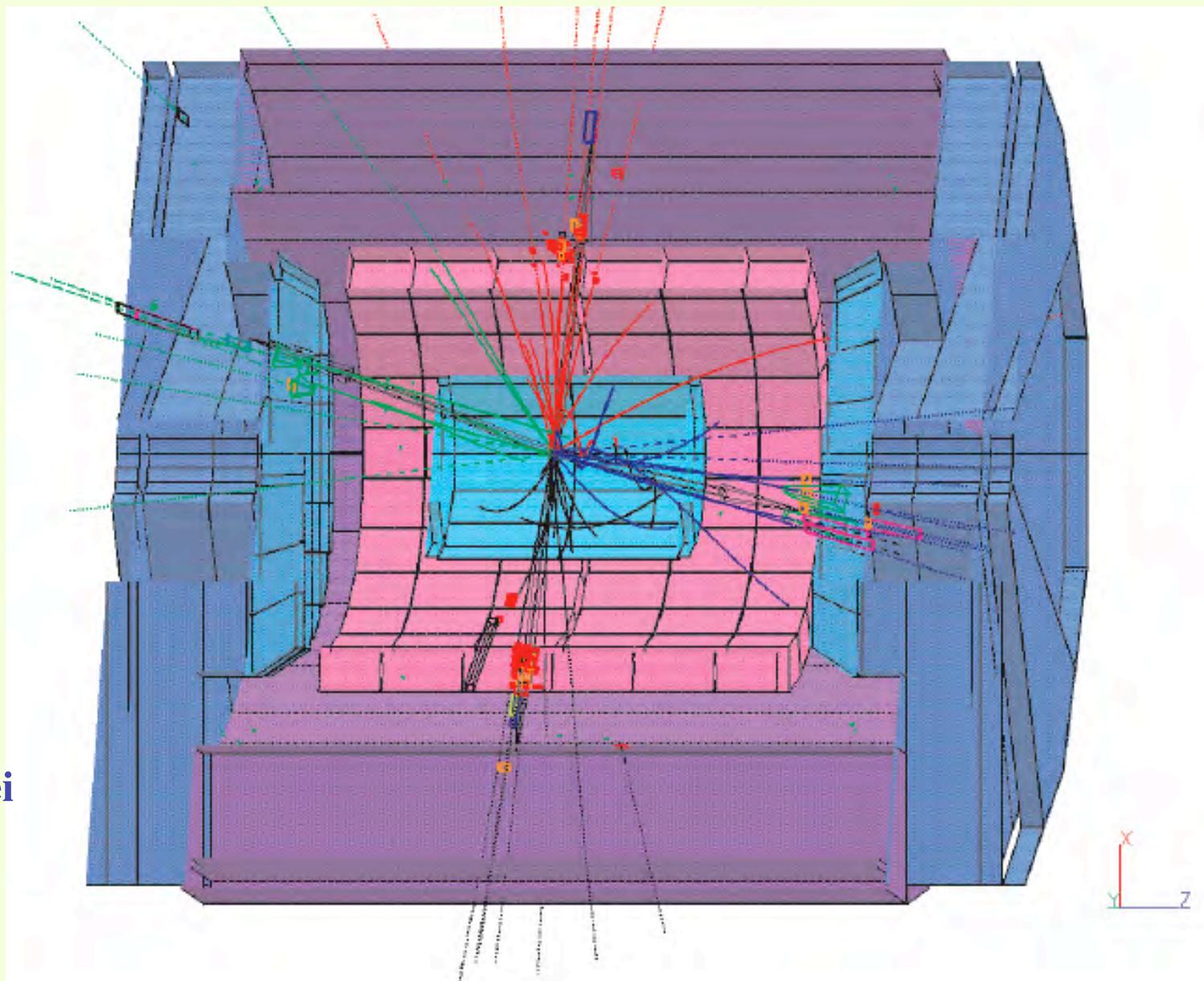
Il primo evento $e^+ e^- \rightarrow W^+ W^-$ in ALEPH



Run : 67777
Event : 16923
Date : 9 July 96
Beam : 80.7 GeV

$e^+ e^- \rightarrow W^+ W^- \rightarrow 4\text{jets}$

Ognuno dei due W decade in due jets adronici. All'energia di LEP indicata ogni W è prodotto "a riposo": i prodotti dei loro decadimenti devono essere collineari



$e^+ e^- \rightarrow W^+ W^- \rightarrow \text{fermioni}$

Misurati i B.R. dei vari canali di decadimento:

$$-W^+ W^- \rightarrow qqqq \quad 46\%$$

$$-W^+ W^- \rightarrow qq\nu_l l \quad 44\%$$

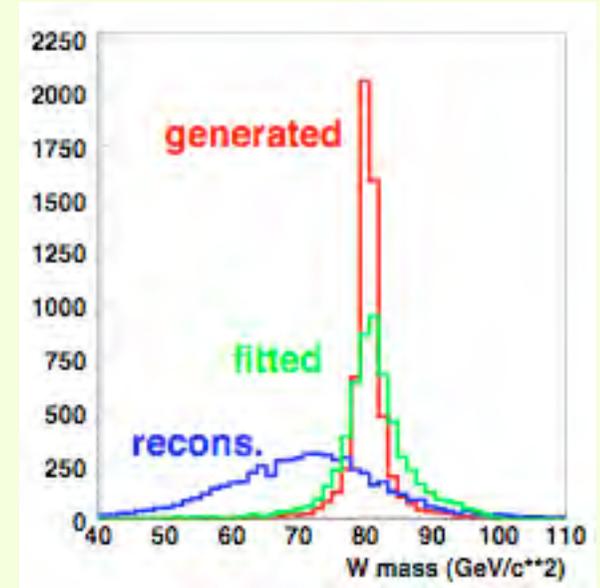
Per ogni evento si ricostruisce la massa invariante del W associando opportunamente i jets fra di loro (o l'energia del leptone con l'impulso mancante associato al neutrino). In tal modo ogni evento può dar luogo a più "combinazioni": si applicano poi dei "vincoli cinematici" quali:

-la conservazione dell'energia e dell'impulso

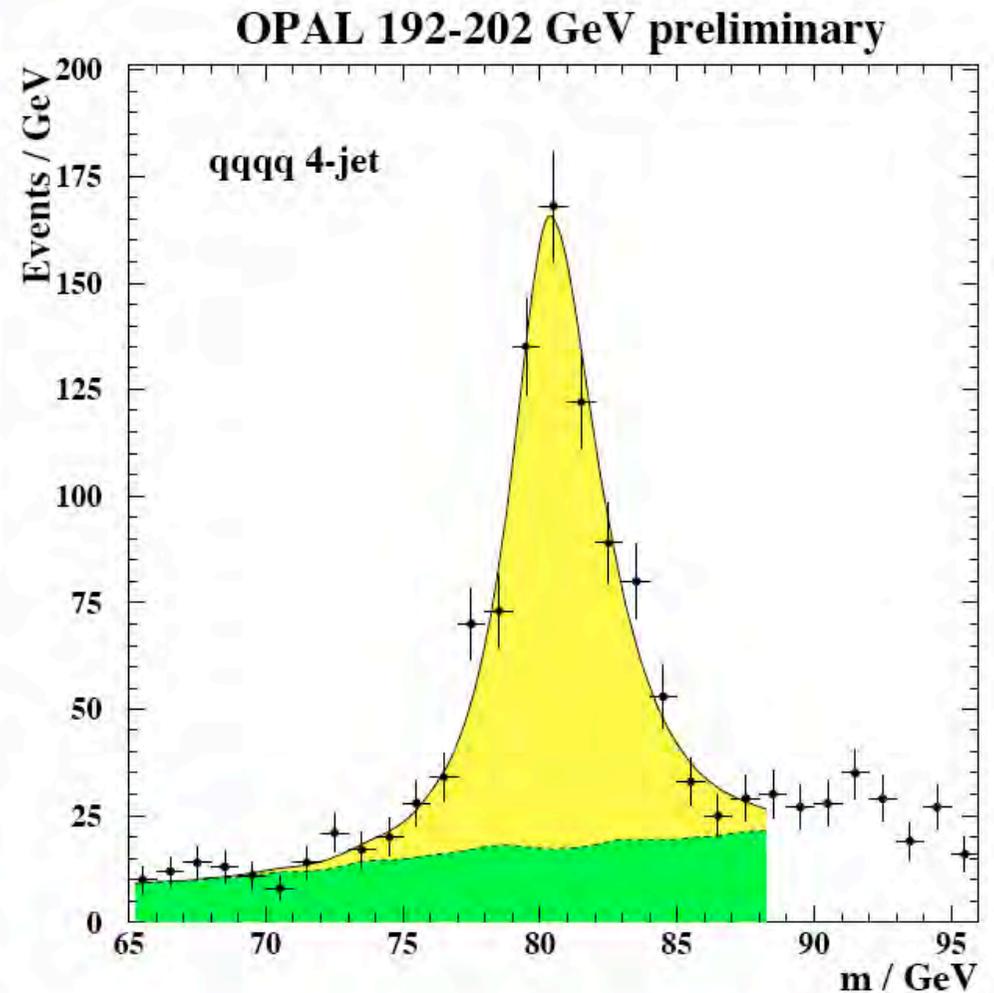
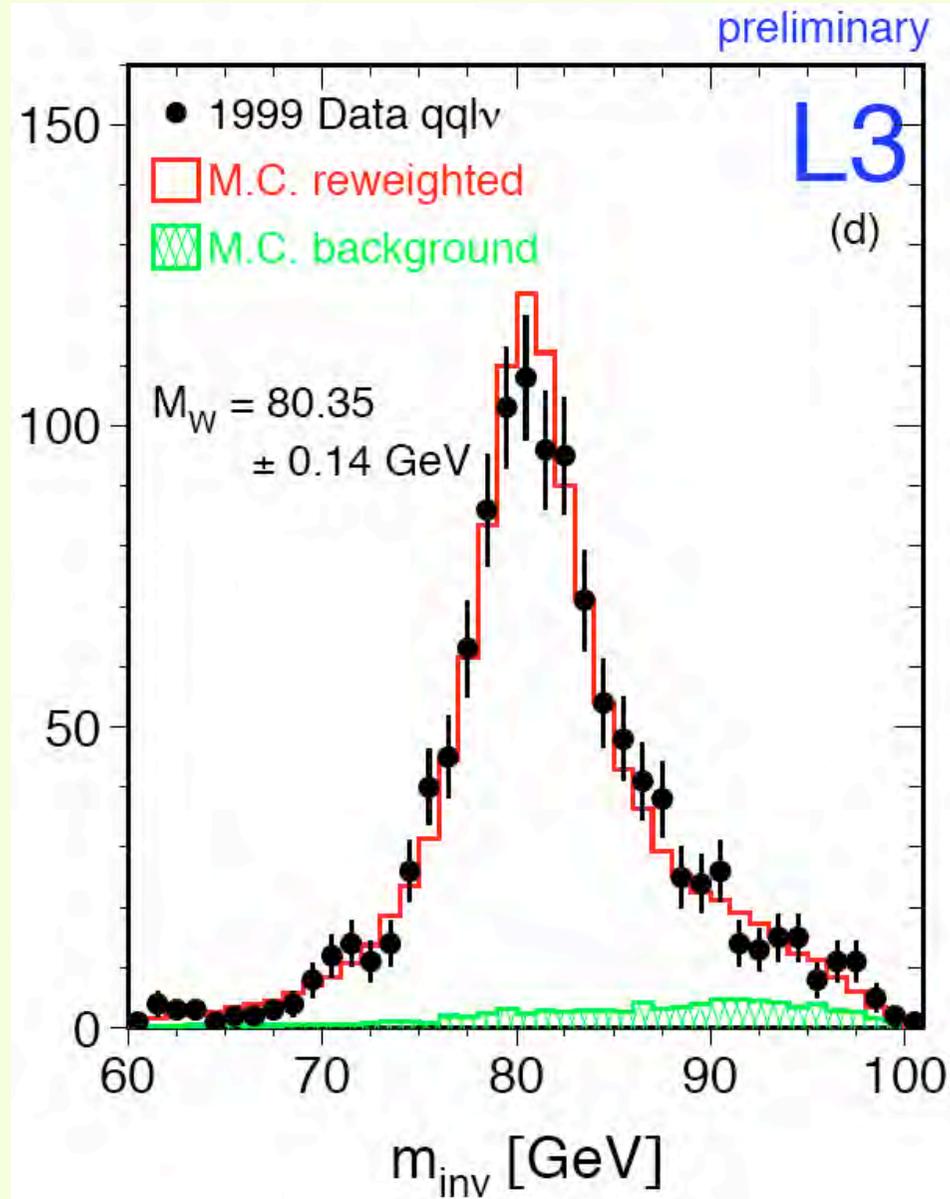
$$-m_{W^+} = m_{W^-}$$

Il procedimento è stato simulato con tecniche di MonteCarlo e se ne conosce la "validità".

I risultati della ricostruzione cinematica possono essere "unfolded" per le risoluzioni sperimentali



$e^+ e^- \rightarrow W^+ W^-$: misura della m_W



$$m_W = (80.376 \pm 0.033) \text{ GeV}$$

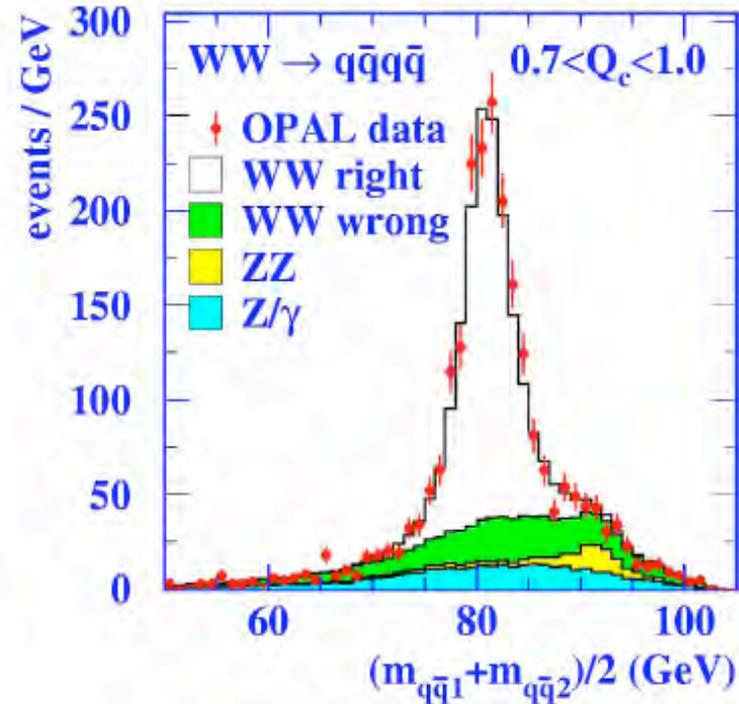
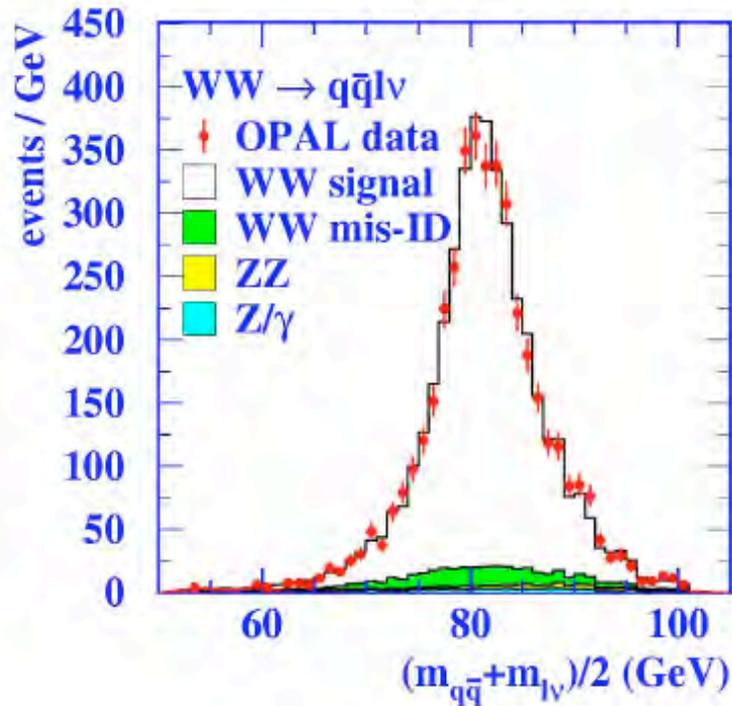
$$\Gamma_W = (2.196 \pm 0.083) \text{ GeV}$$

$e^+ e^- \rightarrow W^+ W^-$: misura della m_W

LEP-2: $e^+ e^- \rightarrow W^+ W^- \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}, q\bar{q}l\nu, l\nu l\nu$

Invariant mass M_{inv}

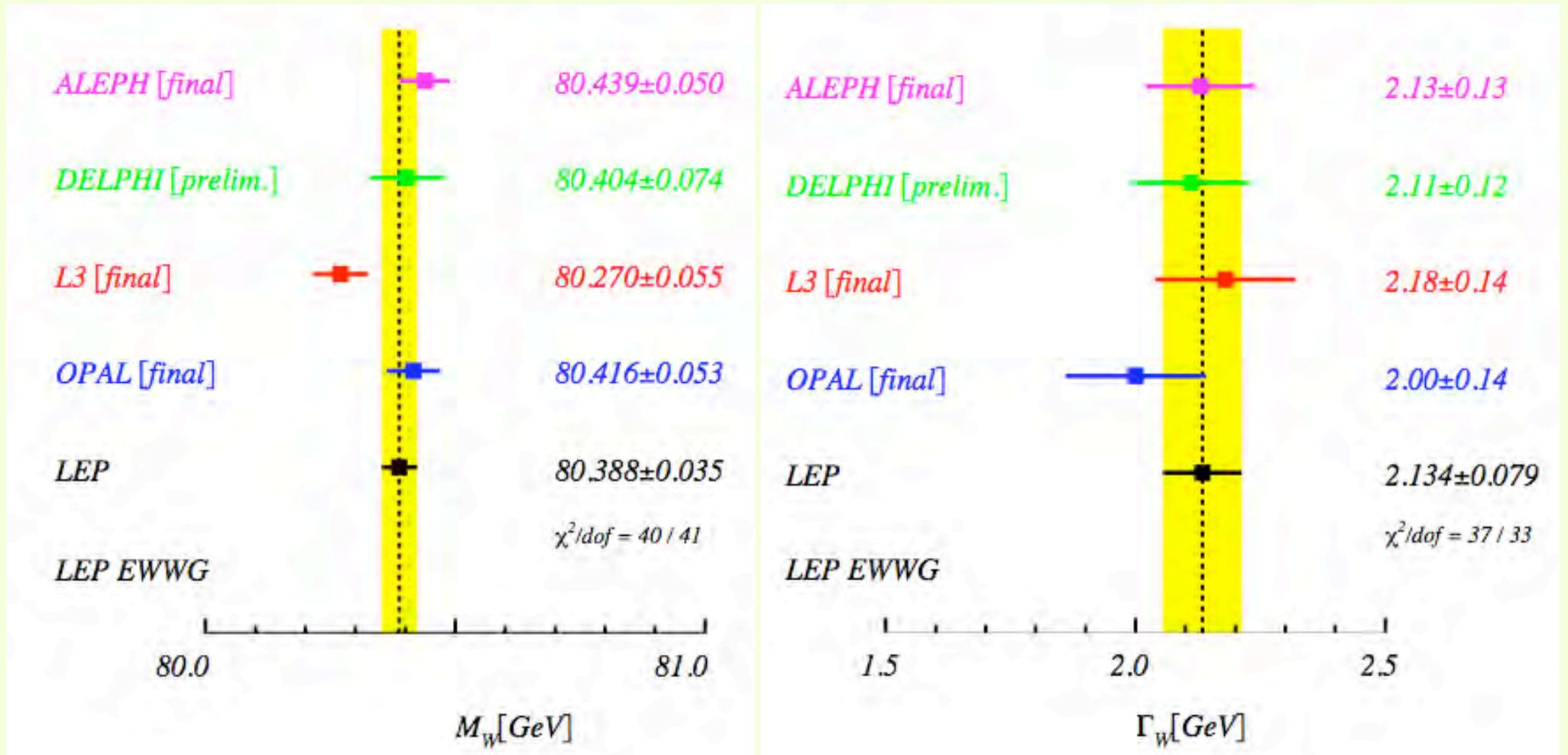
Final OPAL results in combination



$$m_W = (80.376 \pm 0.033) \text{ GeV}$$

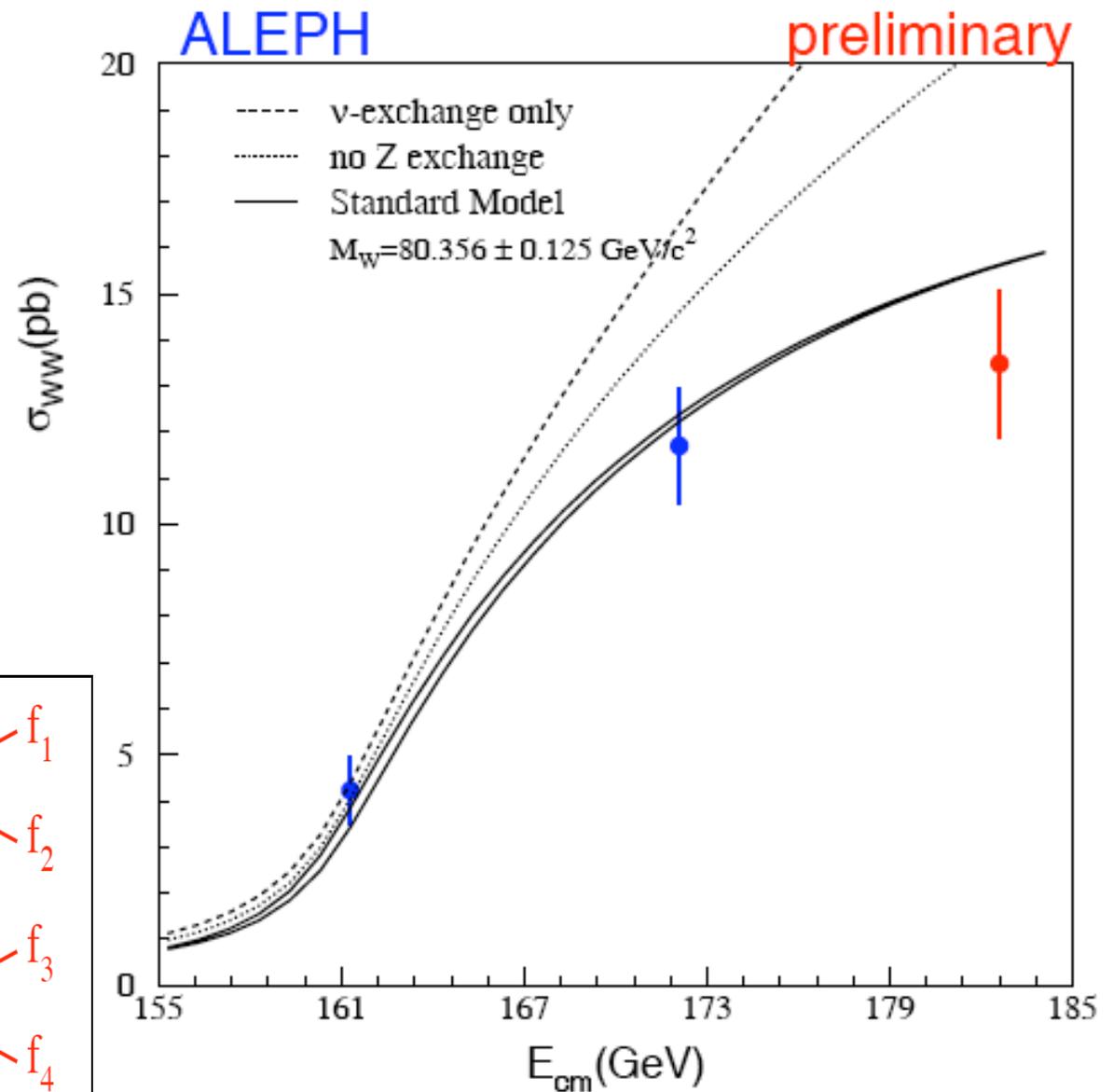
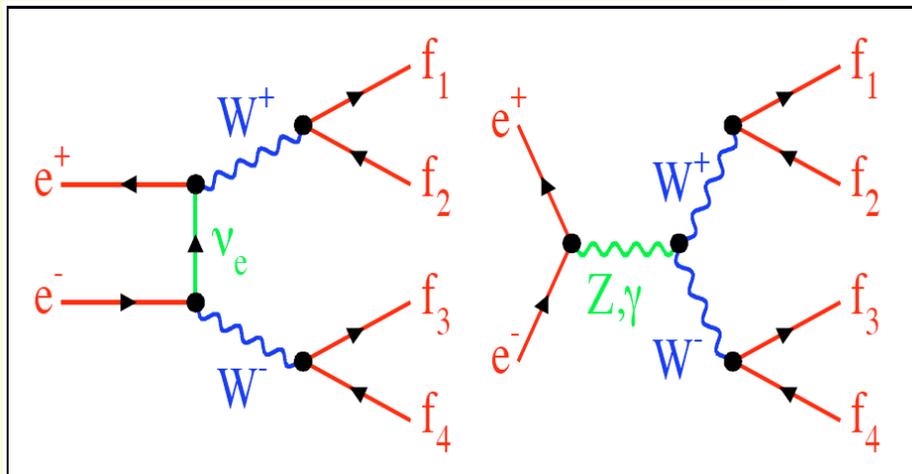
$$\Gamma_W = (2.196 \pm 0.083) \text{ GeV}$$

$e^+ e^- \rightarrow W^+ W^-$: misura di m_W e Γ_W

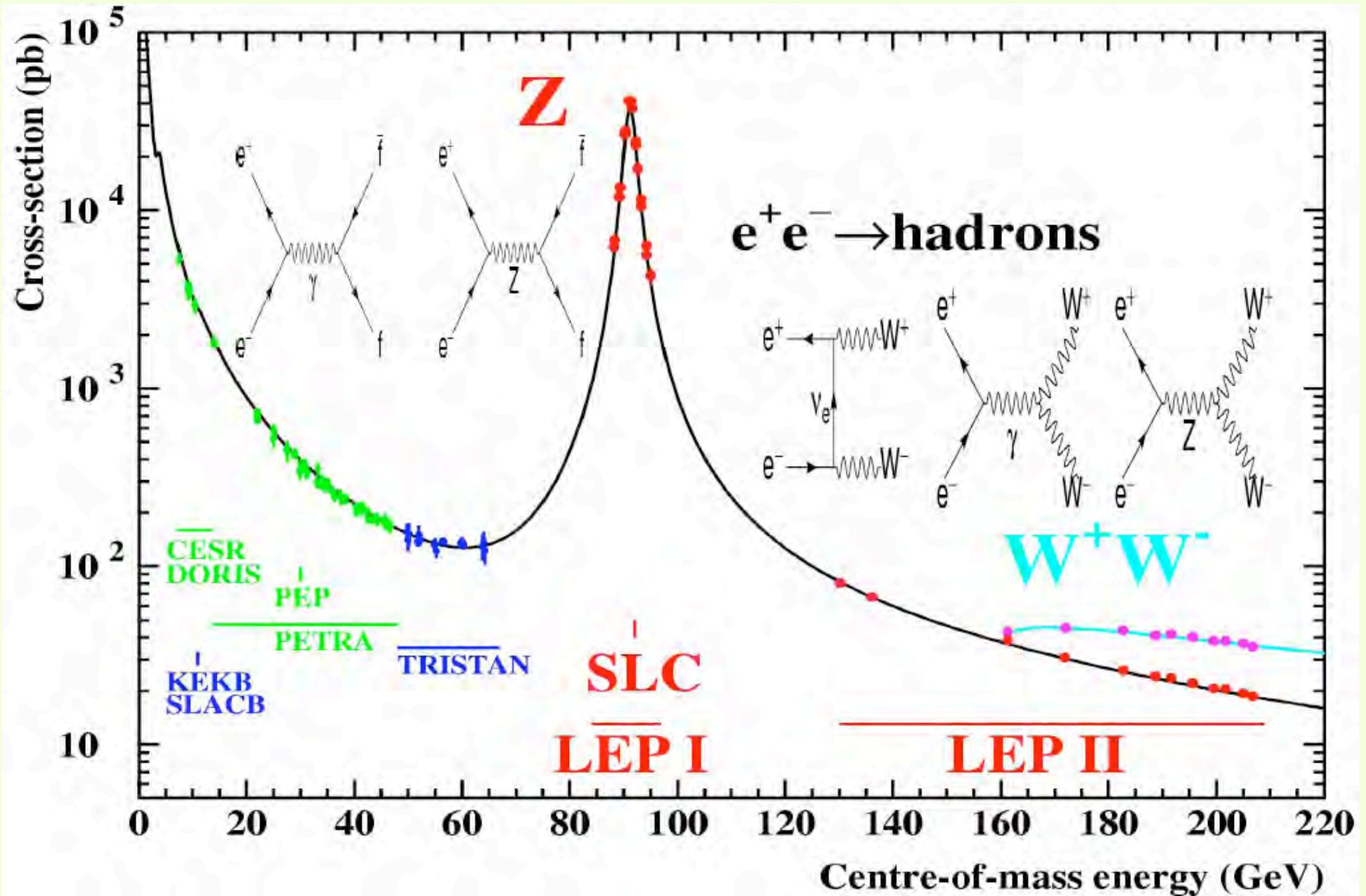


$e^+ e^- \rightarrow W^+ W^-$: misura della sezione d'urto di produzione

Ancora una verifica del modello standard: è escluso dalle misure che il singolo canale con lo scambio di un neutrino o di un fotone siano sufficienti a giustificare la rate osservata di eventi.



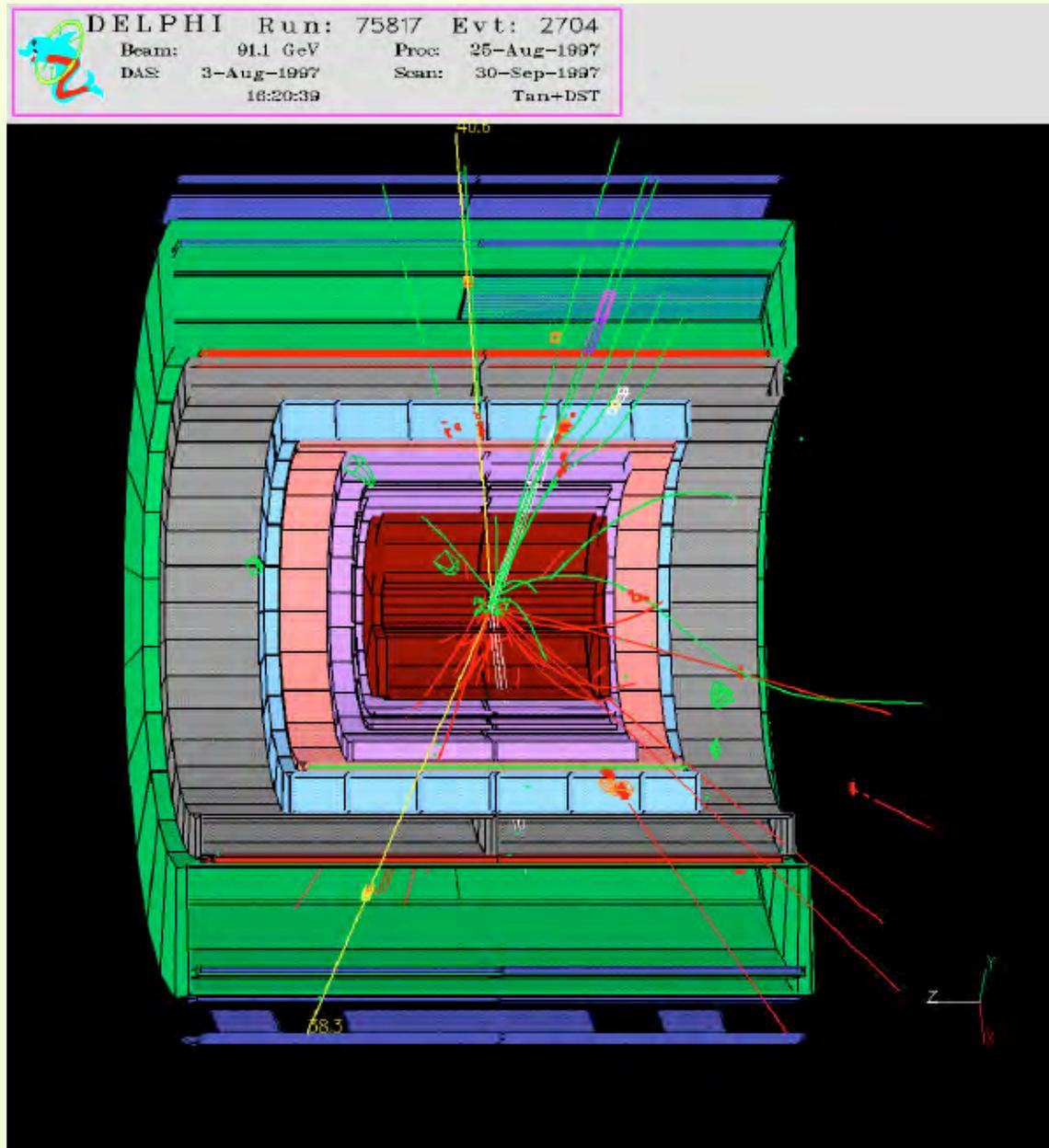
Sezione d'urto dell'interazione e^+e^- ai colliders



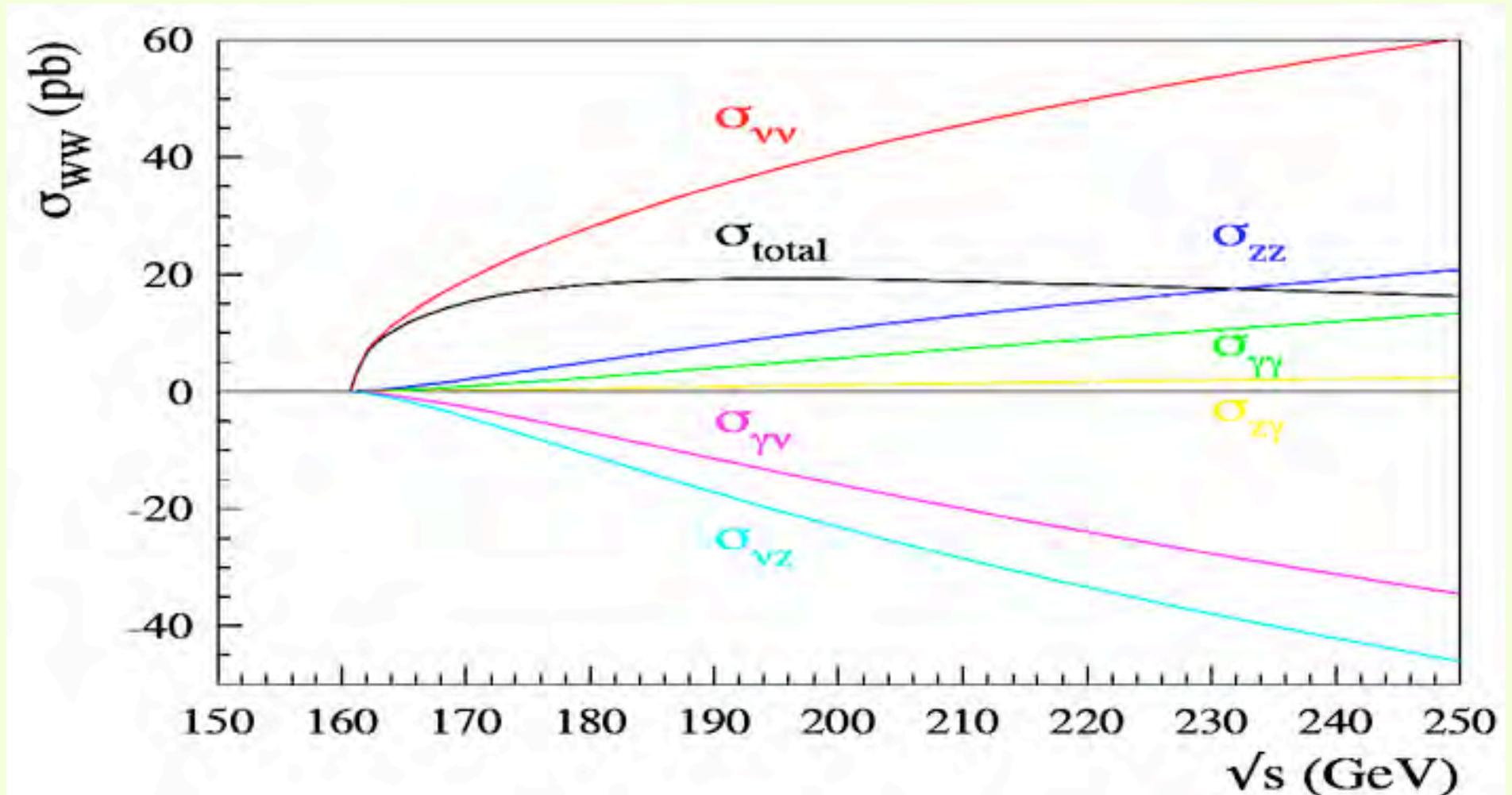
$e^+e^- \rightarrow ZZ$

Un evento candidato
 $e^+e^- \rightarrow Z^0Z^0$ nello
apparato DELPHI
per $E_{\text{CM}} = 183 \text{ GeV}$:
uno $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$
l'altro $Z^0 \rightarrow qq$ e
quindi in due jets

Oltre alla misura
della sezione d'urto è
stata verificata la
massa della Z^0



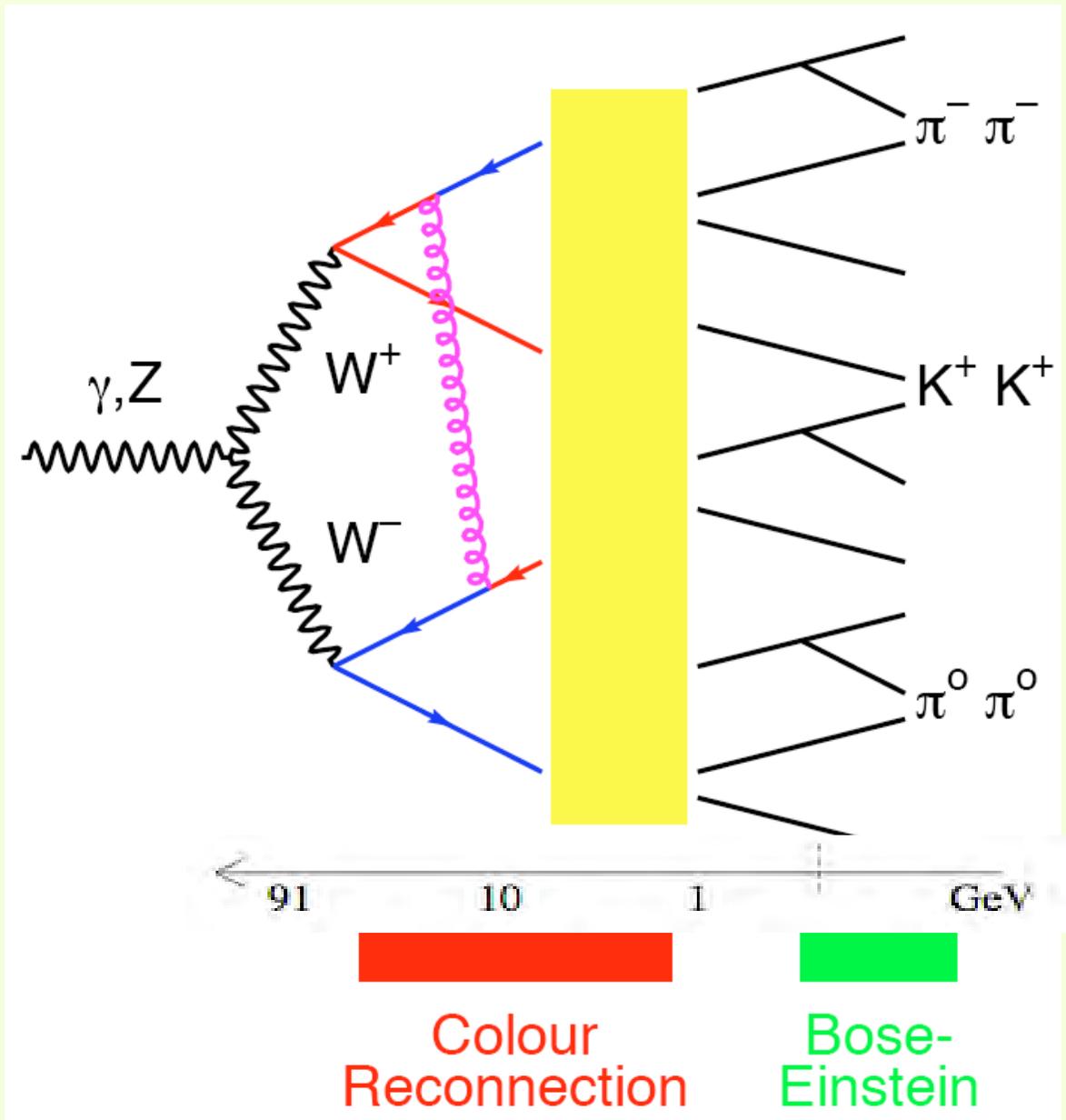
$e^+ e^- \rightarrow W^+ W^-, Z^0 Z^0, \dots$: misura delle σ



$e^+ e^- \rightarrow W^+ W^- \rightarrow$ adroni : studio e misura di α_s

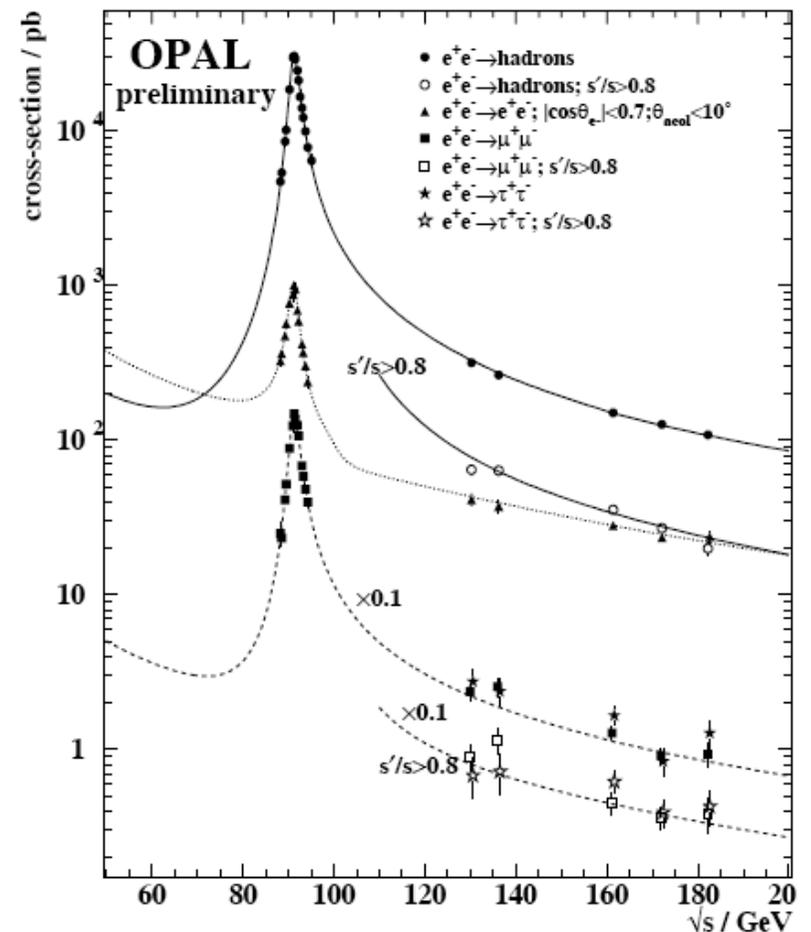
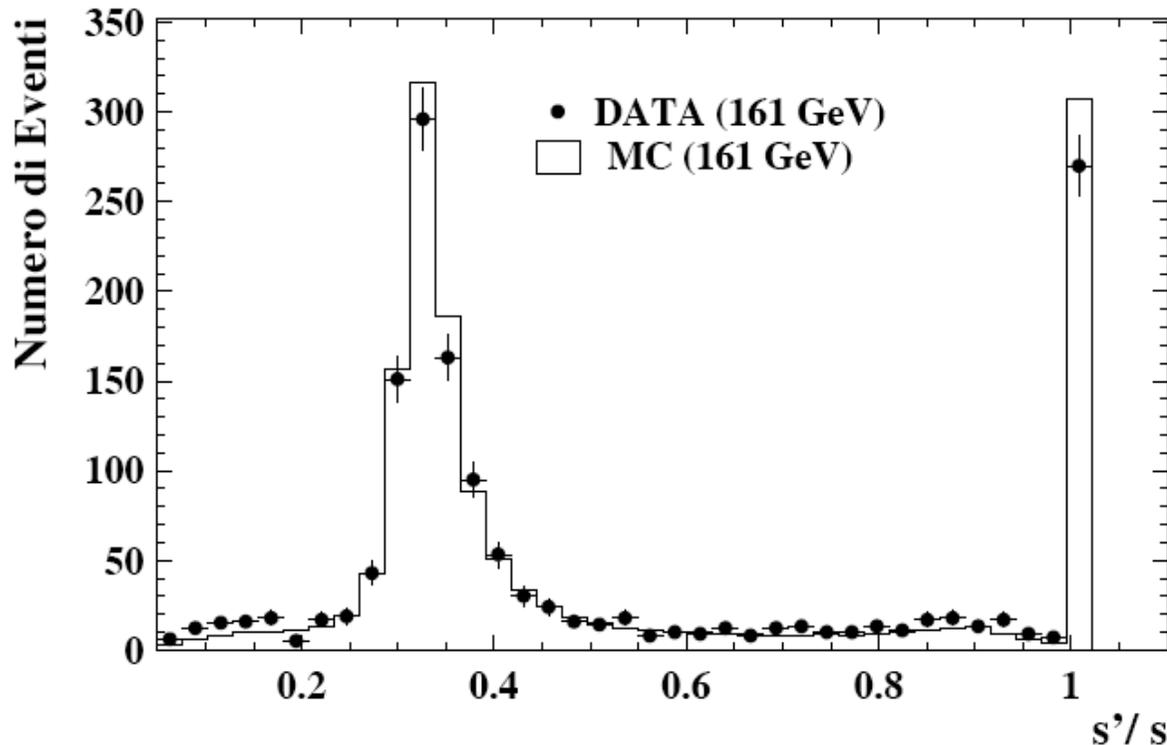
Studiati in dettaglio a LEP2 gli stati finali degli eventi "multiadronici"

La prima fase, cioè la interazione $e^+ e^- \rightarrow Z^0$ e il suo decadimento in una coppia WW viene descritta dalla teoria elettrodebole; la seconda fase la produzione di gluoni e la interazione fra quark e gluoni ad alti q^2 viene descritta dalla QCD perturbativa; la terza fase cioè la frammentazione è descritta utilizzando modelli fenomenologici; l'ultima fase cioè il decadimento delle particelle instabili, si basa sulle misure sperimentali delle frequenze di decadimento. Ciò permette di misurare α_s per valori elevati di E_{CM} .



$e^+ e^- \rightarrow$ multiadroni : studio e misura di α_s

A LEP2 la probabilità di emissione di un fotone da parte di $e^+ e^-$ dello stato iniziale è elevata: ciò riduce l'effettiva E_{CM} disponibile nello stato finale (a $\sqrt{s'}$) e porta ad una "acollinearità" di jets o di leptoni originati nello stato finale. Per ovviare a questo inconveniente si selezionano eventi con una selezione in s'/s .
 Con tali selezioni la curva che rappresenta la sezione d'urto adronica diventa più "simmetrica" attorno allo Z^0



$e^+ e^- \rightarrow$ multiadroni : studio e misura di α_s

Gli apparati a LEP coprono completamente l'angolo solido attorno alla zona di interazione (4π) garantendo un buon contenimento (ed identificazione) delle particelle prodotte. Ciò permette di misurare il $\langle n_{\text{particelle cariche}} \rangle$ prodotte, per i diversi valori della E_{CM} , ed un controllo accurato delle previsioni dei vari modelli "adronici" della Quantum Chromo Dynamics (QCD). Ciò ha permesso di misurare il valore di α_s per diversi valori di s mettendo in evidenza quanto previsto dalla teoria: α_s diminuisce all'aumentare di s :

avevamo visto che

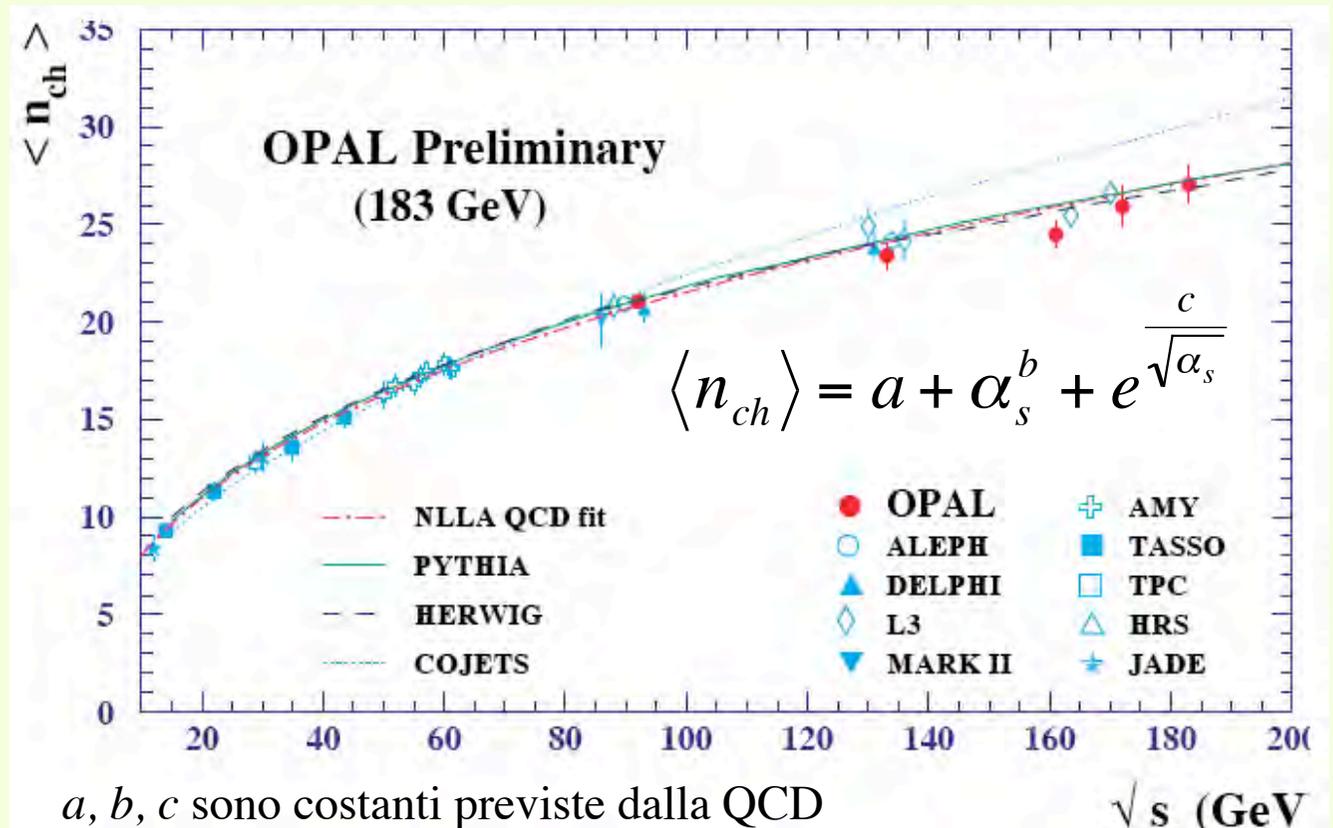
$$\alpha_s \sim 0.3 \text{ per } E_{\text{CM}} \sim 3 \text{ GeV}$$

A LEP1 abbiamo misurato:

$$\alpha_s \sim 0.1199 \text{ per } E_{\text{CM}} \sim m_Z$$

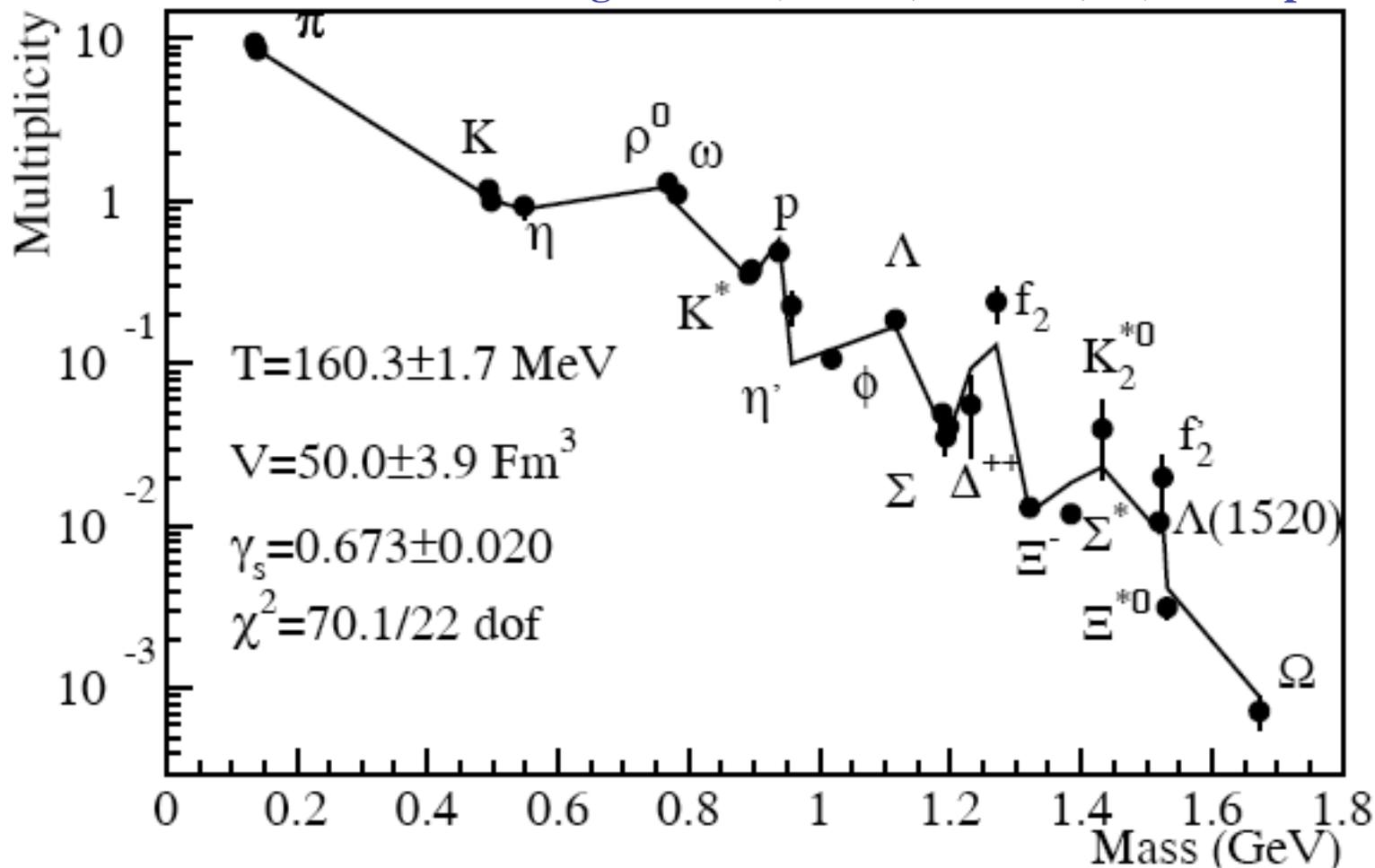
ed ancora a LEP2:

$$\alpha_s \sim 0.1079 \text{ per } E_{\text{CM}} \sim 206 \text{ GeV}$$



$e^+ e^- \rightarrow$ multiadroni : verifica dei modelli e misura di α_s

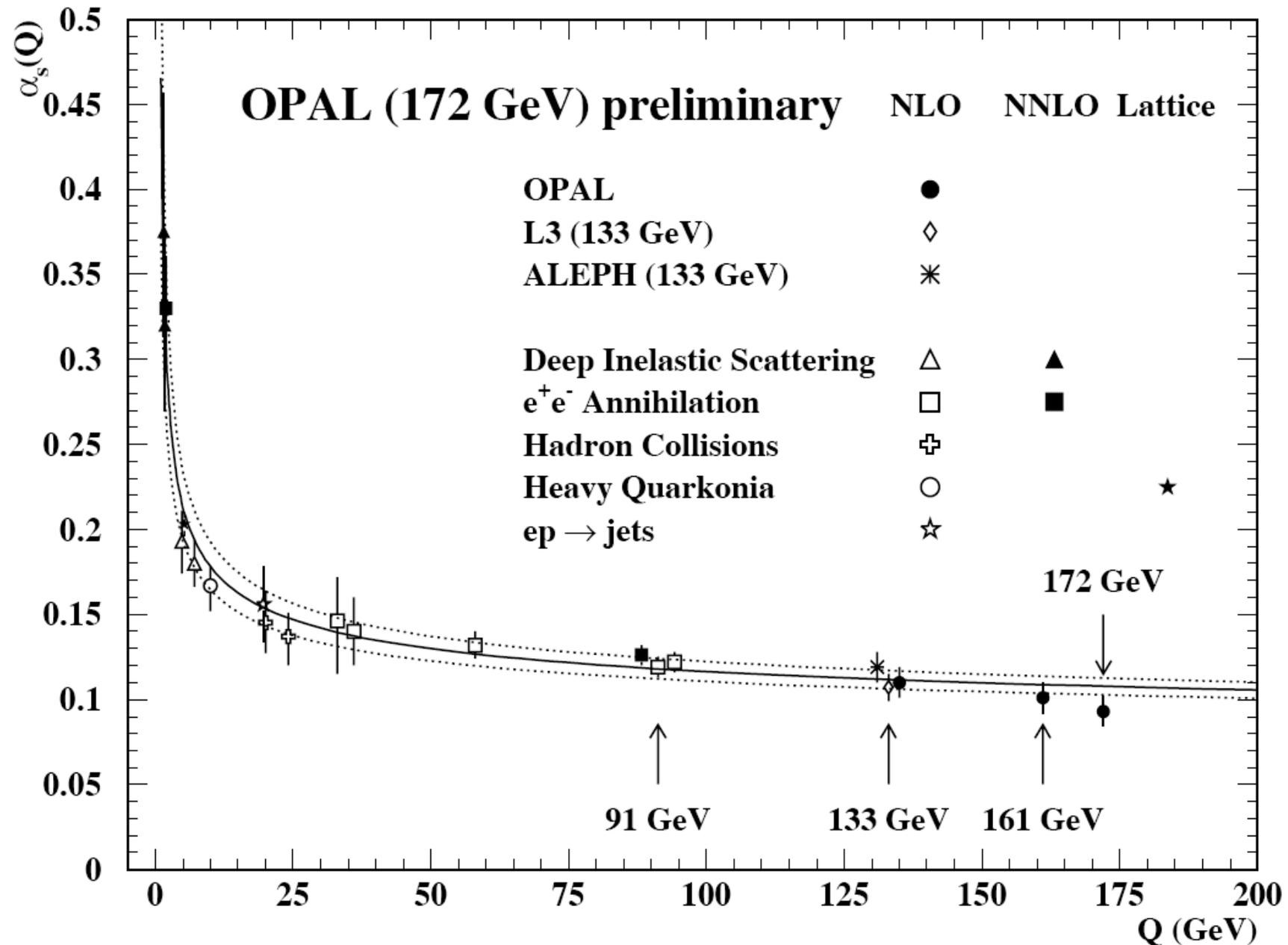
Il modello riesce a predire non solo la molteplicità media delle diverse particelle prodotte negli stati finali ma anche le caratteristiche "cinematiche" degli eventi (Thrust, sfericità, ...) ed il tipo di particelle prodotte



$$T = \text{Max} \frac{\sum_i (\vec{p}_i \cdot \vec{n})}{\sum_i |\vec{p}_i|}$$

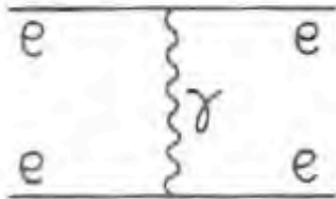
=Thrust , caratterizza la "forma dell'evento":
 T=1= evento con due jets contrapposti
 T=1/2 = evento "sferico"

α_s come funzione della E_{CM}



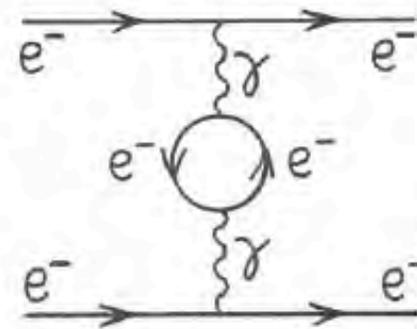
Le costanti di accoppiamento "running"

La costante di struttura fine in realtà non è una costante, ma varia in funzione del quadrimpulso trasferito. Un simile comportamento vale per le altre costanti di accoppiamento del modello standard α_2 e α_3 .



Questo grafico all'ordine α^2 permette di calcolare la sezione d'urto di Rutherford e la legge di Coulomb, ma ci sono anche correzioni di ordine superiore.

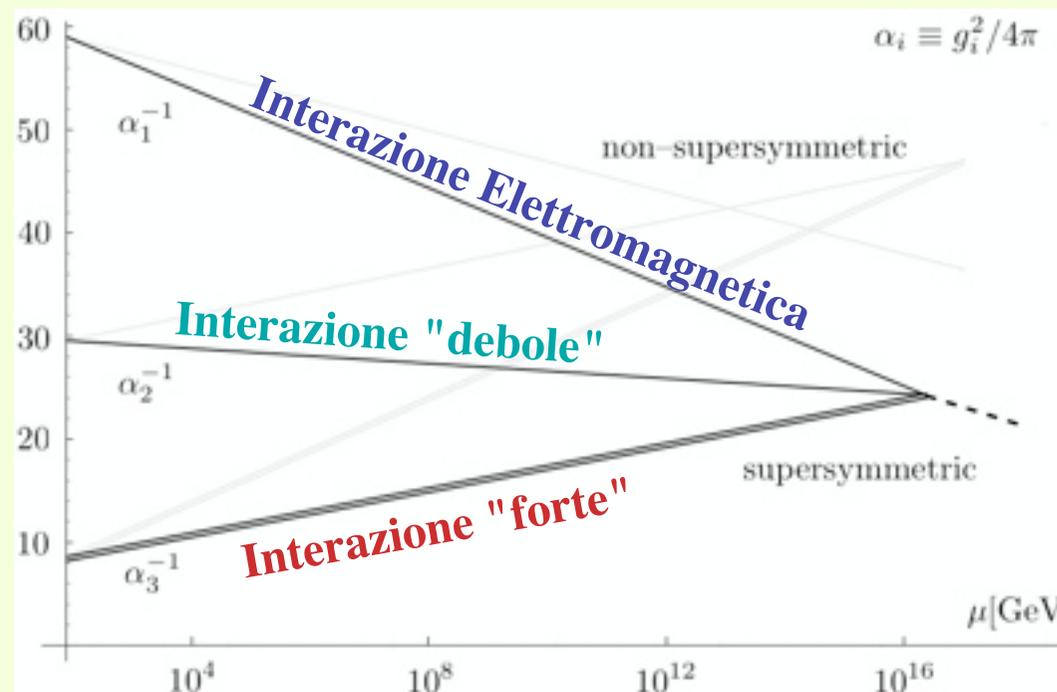
Il contributo di grafici come questo si ottiene integrando su tutti i possibili impulsi per gli elettroni nel loop. Nel calcolo il contributo risulta infinito, ma è possibile rimuovere tutti gli infiniti in modo coerente (rinormalizzazione).



α_{EM} , α_{Debole} , α_s come funzione della E_{CM}

Running, for a "coupling constant" means that the effective (electromagnetic, weak or strong) charge of a particle varies with energy scale, or distance. And it means that the force strength, characterized by a force coupling constant between interacting particles, also varies with energy scale and distance. At "long" distances approximately the width of a proton, the weak charge looks smaller because of quantum fluctuations in the vacuum—every particle is surrounded by an ephemeral cloud of particles that effectively form a screen between interacting electrons.

1/forza di interazione



Collisioni adrone-adrone per $E_{\text{CM}} > 10 \text{ GeV}$

Realizzati colliders pp e $p\bar{p}$.

Le sezioni d'urto adrone-adrone (anche con fasci di pioni e di k) sono state misurate ai diversi acceleratori:

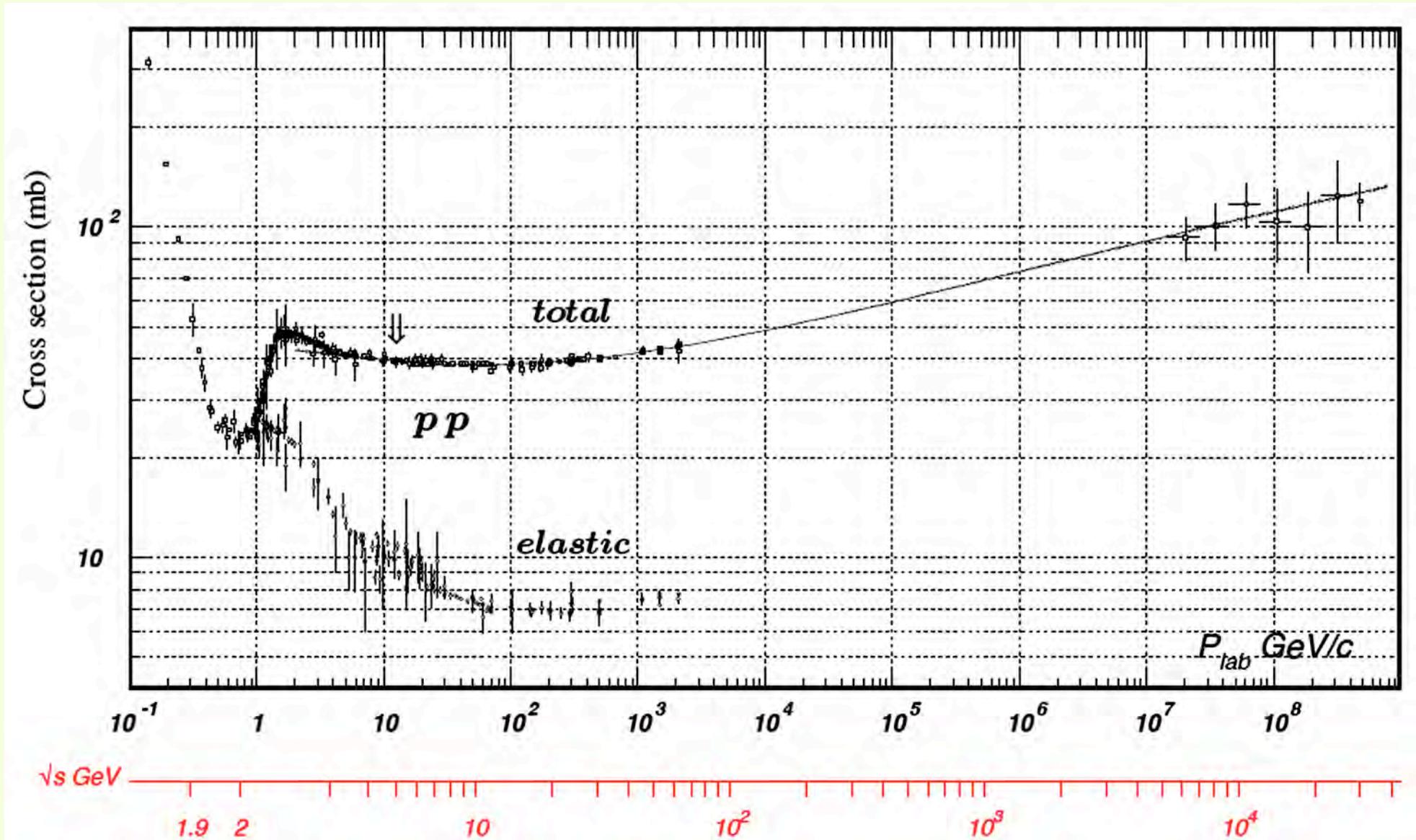
- Proton Synchroton ($\sim 28 \text{ GeV}$, PS, CERN, 1959)
- Serpukhov Proton Synchroton (fino a 70 GeV), Russia
- Intersecting Storage Ring (ISR, CERN, il primo collider pp con $\sqrt{s} = 62 \text{ GeV}$, 1971-1984)
- Super Proton-antiproton Synchroton ($Spp\bar{p}S$, 1976, $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$, CERN)
- Tevatron (Fermilab, USA, $\sqrt{s} = 1800 \text{ GeV}$)

mettendo in evidenza una caratteristica comune. La sezione d'urto decrescono ($3\text{-}10 \text{ GeV}$) poi aumentano con andamento $\log(E_{\text{CM}})$.

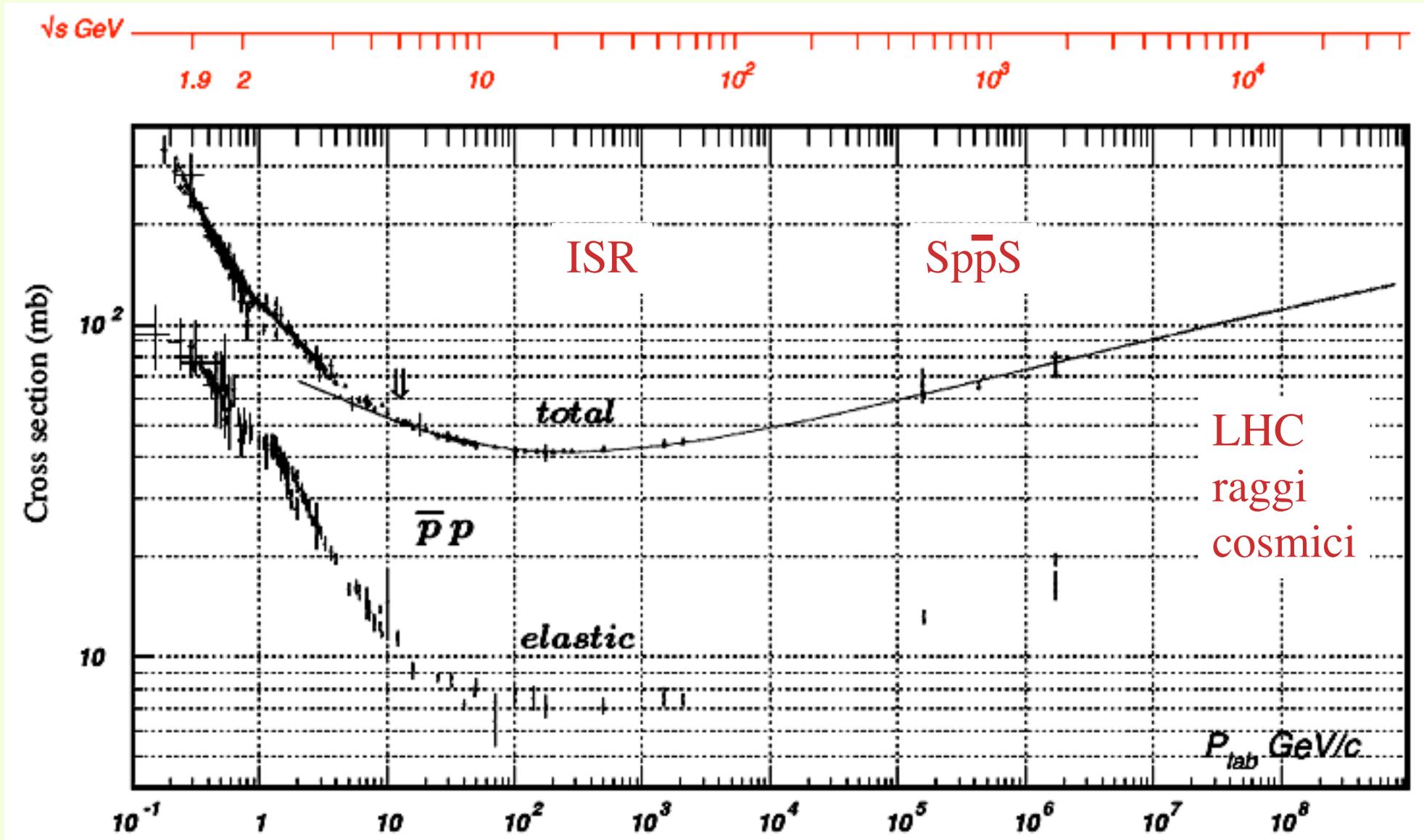
Le misure ad energia più alta, ottenute dallo studio dei raggi cosmici, confermano tale andamento (non completamente spiegato).

Gli esperimenti UA1 ed UA2 all' $Spp\bar{p}S$ del CERN hanno portato alla scoperta (1983) dei bosoni W e Z

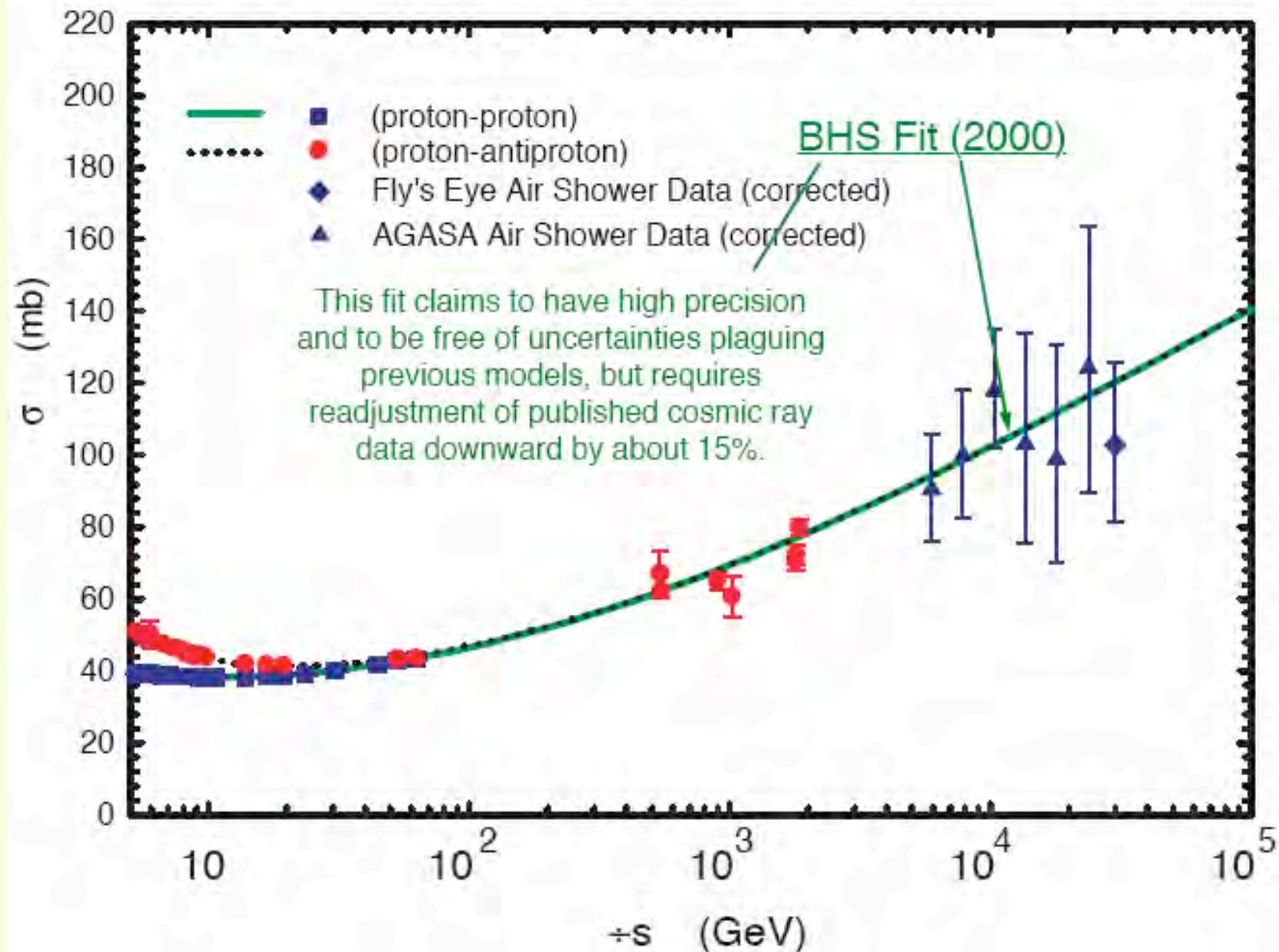
Sezione d'urto di collisioni protone-protone



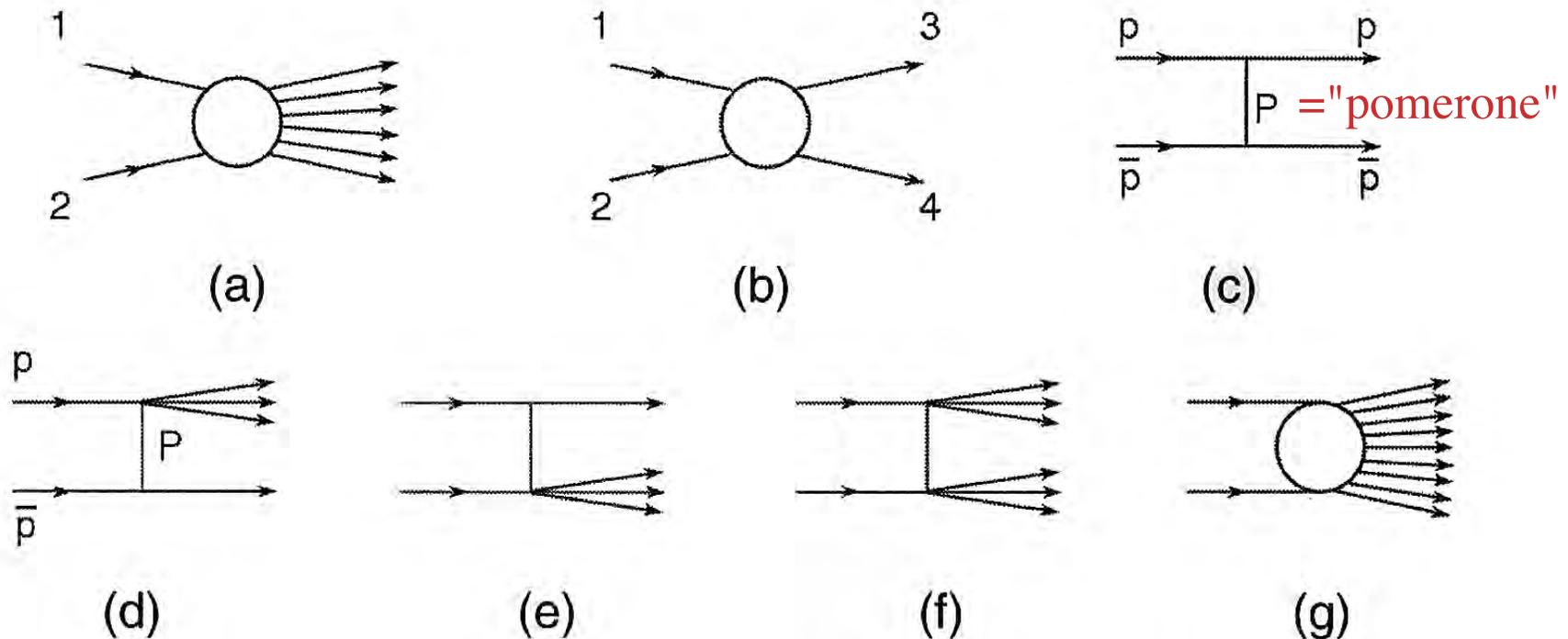
Sezione d'urto di collisioni protone-antiprotone



includendo anche dati ottenuti dallo studio dei raggi cosmici ...



classificazione degli eventi - 1



Descrizione di un processo (a) inelastico e (b) a due corpi (se è elastico si ha $1 = 3$ e $2 = 4$). Un'ulteriore suddivisione, considerata poi in dettaglio per collisioni $\bar{p}p$, è: (c) urto elastico, con scambio di Pomeron P ; (d) urto singolo diffrattivo del protone, (e) urto singolo diffrattivo del \bar{p} , (f) doppia diffrazione, (g) urto inelastico come in (a).

Il pomeron è una "pseudoparticella" che media l'interazione $p\bar{p}$ e trasporta i numeri quantici del vuoto

classificazione degli eventi - 2

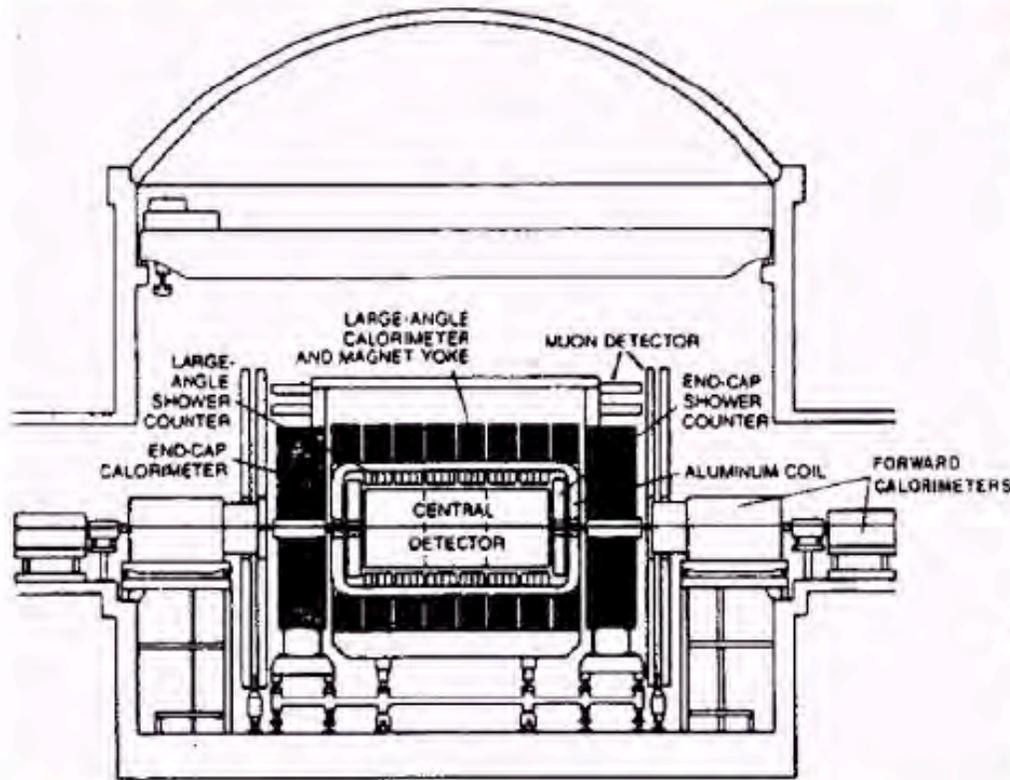
Gli eventi vengono comunemente classificati in base al "momento trasverso (p_t)":

- **bassi p_t** : sezioni d'urto relativamente grandi **che** variano lentamente con l'energia, come $\ln(s)$. **Lo studio di tali eventi viene definito a volte: "Fisica $\ln(s)$ ". In tali processi l'interazione vede l'adrone coinvolto nella sua interezza.**

- **alti p_t** : sezioni d'urto relativamente piccole **che** variano rapidamente con l'energia. **In tali processi l'interazione avviene fra i costituenti dell'adrone: quarks, gluoni. La QCD pertanto ne spiega la dinamica.**

Gli apparati utilizzati per lo studio di tali eventi necessitano di una copertura 4π dell'angolo solido: gli apparati più recenti sono simili (i progenitori) agli apparati già descritti per LEP. I primi apparati utilizzati (1960-1970) erano più "dedicati" a misure più parziali (sezioni d'urto, identificazione di particelle).

L'apparato UA1 all'SppS del CERN



- all-purpose detector
- Excellent hermeticity (i.e. very few gaps) - good for missing E_{\perp} measurement
- tracker and electromagnetic calorimeter immersed in magnetic field
- Magnet return yoke = hadronic calorimeter
- 8-layer muon detector

Advantages

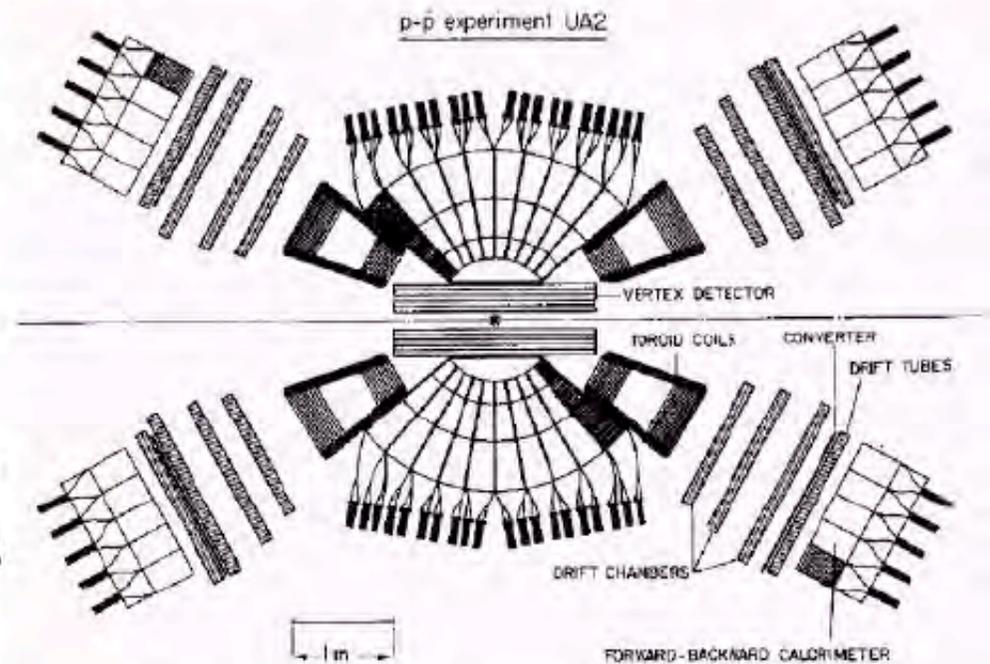
- magnetic field in tracker
- hermetic
- muon detection

Disadvantages

- ecal not great:
 - poor granularity
 - no position detection in barrel
 - difficult to calibrate

L'apparato UA2 all'SppS del CERN

- Principally for W^\pm , Z^0 decays to high- p_\perp electrons
- well instrumented in central region
- Inner tracker
 - no central magnetic field
⇒ vertexing only for high- p_\perp tracks
- finely-segmented calorimeters
 - electron ID
 - energy measurement



Advantages

- good ecal, esp. in barrel region:
 - good granularity
 - tower structure points to origin
 - everything could be calibrated in-beam

Disadvantages

- no magnetic field in central region
- no endcap-region calorimetry
- no muon detection

La scoperta del W da UA1 all'SppS del CERN

UA1's $W \rightarrow e \nu$ Search

- Using 18 nb^{-1} ($\sim 10^9$ collisions) from late 1982...
- Need a **high- p_{\perp} electron**. Looked for events with:
 - an ecal cluster with $E_{\perp} > 15 \text{ GeV}$
 - an isolated high- p_{\perp} track pointing to cluster
 - ecal energy measurement matches tracker energy measurement
 - no associated energy in hadronic calorimeter

⇒ **39 such events !**

- Looked closely at those 39 events:
 - **5 events had:**
 - no jets
 - missing $E_{\perp} \cong$ electron E_{\perp} .
 - The other 34 events had:
 - one or two jets
 - no missing energy.
- Similar analysis performed on end-cap region yielded **one more event** with an electron and no jets.
- Parallel analysis concentrating on finding events with missing E_{\perp} yielded **the same 6 events**.

La scoperta dello Z^0 da UA1 ed UA2 all'SppS del CERN

- For $Z^0 \rightarrow e^+e^-$, need:
 - one high- p_{\perp} electron and one high- p_{\perp} positron, chosen \sim as for W^{\pm} search.
 - No missing E_{\perp} .
 - UA1: 3 events, UA2: 4 events
- For $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ (UA1 only), need:
 - two oppositely-charged isolated high- p_{\perp} tracks in central tracker with matching tracks in muon chambers
 - no missing E_{\perp} .
 - 1 event found

Using all data from 1982-3, and combining results from UA1 and UA2:

$$m_{W^{\pm}} = 82.1 \pm 1.7 \text{ GeV}$$

$$m_{Z^0} = 93.0 \pm 1.7 \text{ GeV}$$

Invariant Mass

(see *Martin & Shaw*, Appendix A)

- Consider a system of N particles:

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_N$$

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_N$$

- The invariant mass of the system (M) is defined by:

$$M^2c^4 = E^2 - |p|^2c^2$$

- M has the same value in any reference frame.