

La ricerca diretta dell'Higgs a LEP-200

Nel 1995 LEP inizio' ad aumentare l'energia del centro di massa, come si e' gia' decritto nel paragrafo precedente. All'aumentare dell'energia lo "spazio delle fasi" disponibile per produrre nuove particelle aumenta. A LEP si cercarono nuove particelle in modo "diretto" seguendo vari modelli teorici disponibili all'epoca e piu' in generale studiando ogni canale di fisica, ogni eccesso e ogni fluttuazione. La ricerca "indiretta" di nuove particelle invece avvenne prendendo il Modello Standard come ipotesi "zero" e studiando ogni possibile deviazione.

I 4 esperimenti combinarono i loro risultati in modo da aumentare il range cinematico accessibile e in modo da controllare e smorzare le eventuali fluttuazioni statistiche.

Uno degli scopi principali dei quattro esperimenti di LEP e' stata la ricerca diretta del bosone di Higgs. La massa del bosone di Higgs non e' predetta dal Modello Standard e ad oggi si possono solo mettere dei limiti derivati dalla ricerca diretta e dalle misure di precisione elettrodeboli.

Si e' visto come i dati sperimentali di LEP, SLD e del Tevatron verifichino al per-mille il Modello Standard e gli accoppiamenti tra quark e leptoni e i bosoni di gauge, e (con precisione minore) i vertici di accoppiamento triplice tra i bosoni. La simmetria descritta dal gruppo $SU(2) \times U(1)$ e' dunque esatta.

Le particelle pero' hanno una massa e dunque la simmetria e' rotta nelle mase. La rottura di simmetria avviene "spontaneamente" mediante il meccanismo di Higgs. Il bosone di Higgs ad oggi non e' ancora stato rivelato sperimentalmente, ma i dati sulle correzioni radiative supportano la sua esistenza in modo molto chiaro e ci indicano che la sua massa sia relativamente leggera, ovvero inferiore ai 300 GeV (come mostrato in figura 40).

In figura 42 i limiti teorici sulla massa dell'Higgs sono mostrati in funzione di Λ , la scala alla quale nuova fisica puo' apparire. Questi limiti sono derivati da considerazioni generali: il limite inferiore deriva dalla richiesta di stabilita' del vuoto dopo aver considerato nel conto le correzioni radiative; il limite superiore e' una conseguenza della richiesta che l'accoppiamento quartico dell'Higgs rimanga nel dominio perturbativo fino alla scala di Λ . Questo significa che se assumiamo che il Modello Standard sia valido fino alla scala di Plank, allora la massa dell'Higgs deve essere compresa tra circa $130 \text{ GeV} < m_H < 180 \text{ GeV}$.

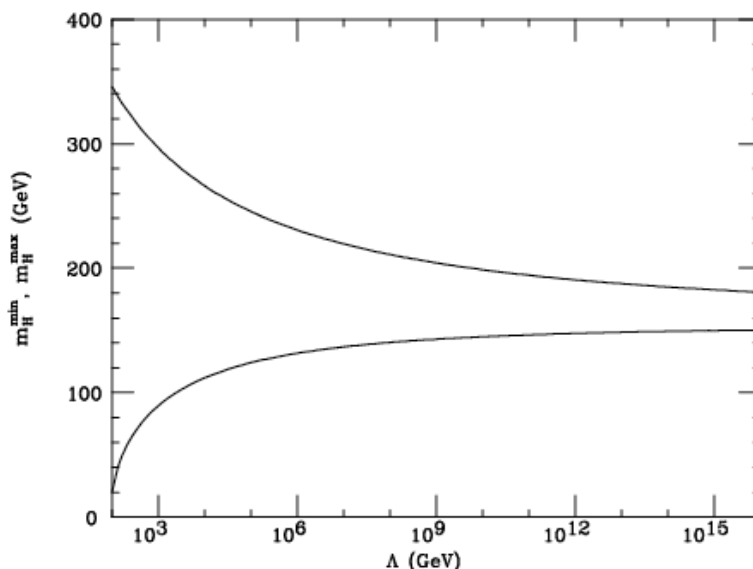


Fig 42

Produzione e decadimento. LEP-200, data la semplicità dello stato iniziale, è una macchina ideale per la ricerca dell'Higgs se questo ha una massa inferiore a circa $E_{cm}-m_Z$, in quanto il processo dominante per la produzione dell'Higgs in un urto elettrone-positrone è il processo detto di Higgstrahlung: $e^+e^- \rightarrow HZ$, mostrato in figura 43 a destra.

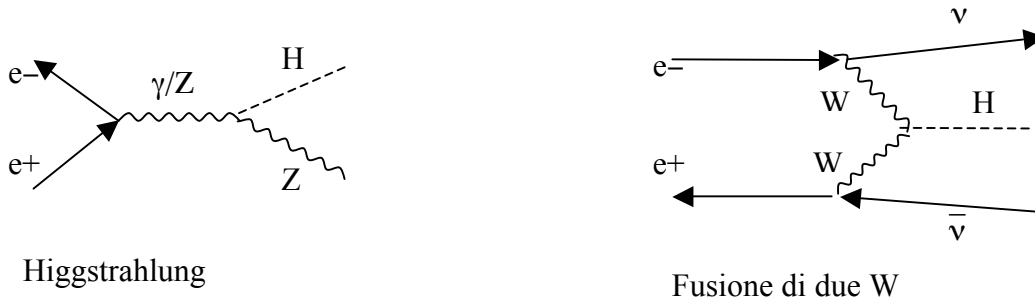


Fig.43

Un secondo processo di produzione di Higgs è mediante la fusione di due bosoni W emessi dai due leptoni del fascio. In questo caso non si è limitati dalla presenza del bosone Z e dunque si possono produrre Higgs di massa più alta, ovvero fino all'energia del centro di massa. Questo processo ha però una sezione d'urto molto bassa. Questo diagramma interferisce positivamente con il diagramma di Higgstrahlung e nella zona prossima al cosiddetto "Higgstrahlung wall", ovvero al valore di $m_H=E_{cm}-m_Z$, dove la sezione d'urto per Higgstrahlung inizia a diminuire rapidamente, permette di avere sezioni d'urto totali non trascurabili e accessibili a LEP. In figura 44 sono mostrate le sezioni d'urto per questi due diagrammi e per la loro interferenza in funzione della massa dell'Higgs per $E_{cm}=206$ GeV, per il solo stato finale $\bar{\nu}\nu q\bar{q}$.

Il contributo dovuto alla fusione di due bosoni Z è un ordine di grandezza più piccolo di quello dovuto alla fusione di due W ed è di conseguenza non considerato nell'analisi.

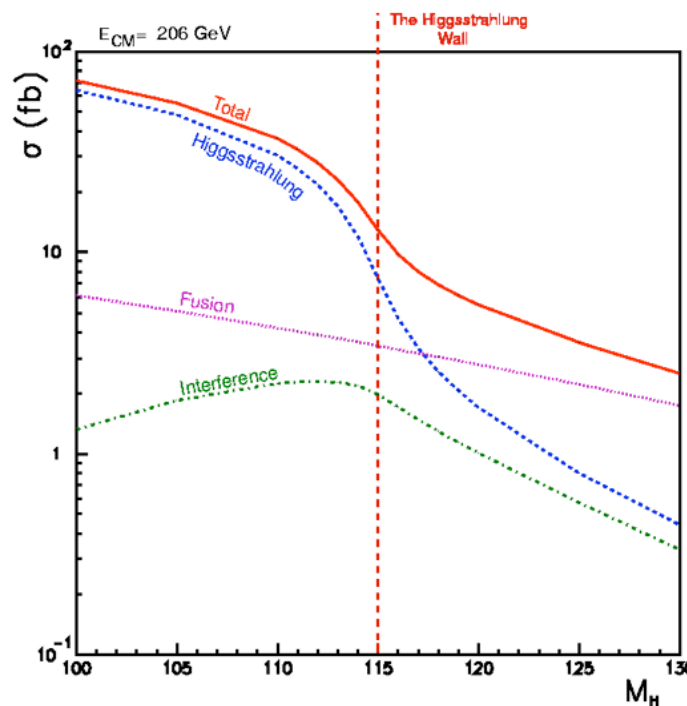


Fig. 44

Per i valori di massa accessibile a LEP, l'Higgs decade prevalentemente in una coppia di quark b (vedi figura 45): $BR(H \rightarrow bb) \sim 85\%$. Di seguito si ha il decadimento in una coppia di leptoni tau: $BR(H \rightarrow \tau\tau) \sim 8\%$. Di conseguenza la ricerca del bosone di Higgs e' divisa in canali dalla topologia caratterizzata dal decadimento del bosone Z (vedi figura 46): 4-jet ($HZ \rightarrow bbqq$) per circa il 60% dei casi, 2-jet ed energia mancante ($HZ \rightarrow bb\nu\nu$) per il 19% circa dei casi, 2-jet e 2 leptoni ($HZ \rightarrow bbl\ell$) per il 6% circa dei casi. Inoltre l'altra topologia studiata e' il canale con i leptoni tau: $BR(HZ \rightarrow \tau\tau bb)$ e $BR(HZ \rightarrow bb\tau\tau)$.

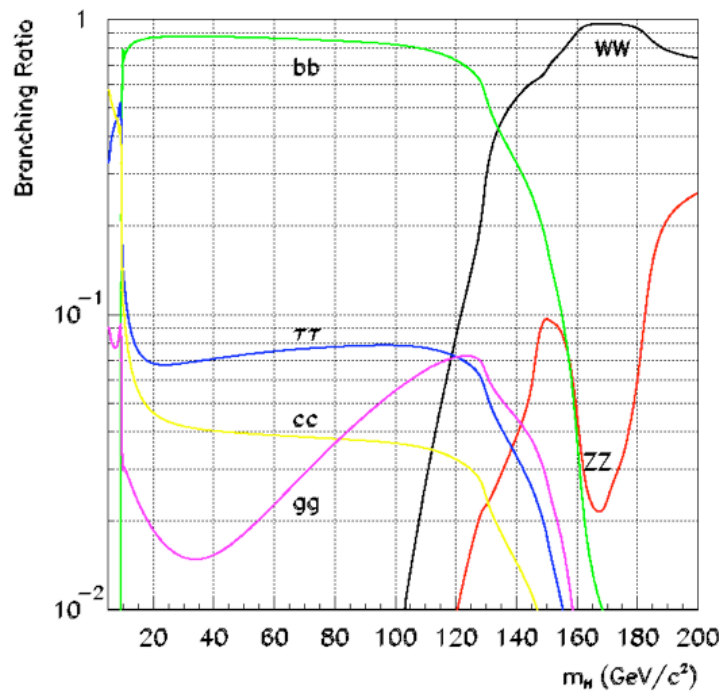


Fig 45

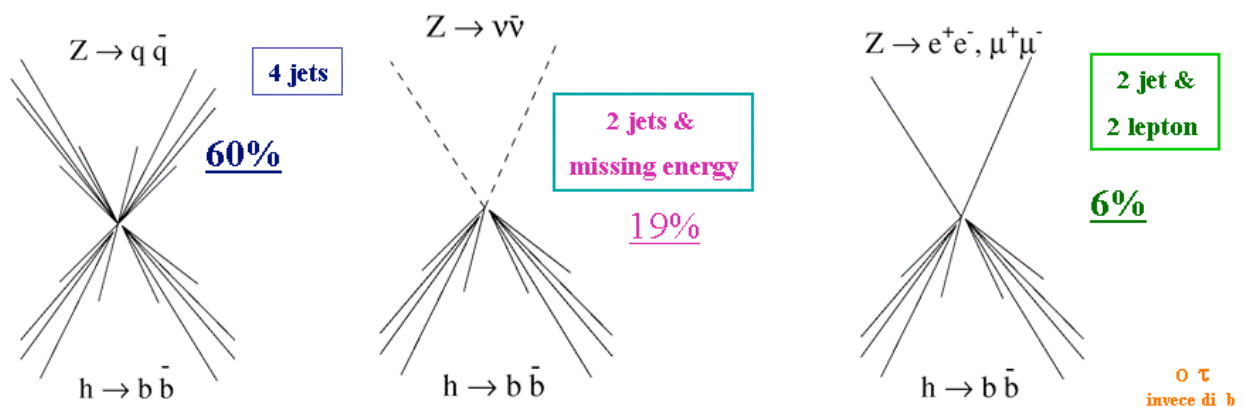


Fig.46

I fondi dominanti sono dovuti ai processi del Modello Standard con produzione di coppie di bosoni vettoriali: WW, ZZ, alla produzione di 2 fermioni $qq(\gamma)$ e $qq(g)$ e alla produzione di un solo bosone vettoriale (vedi paragrafo precedente figura 32).

Gli strumenti fondamentali. L'identificazione di un jet che proviene da un quark b e' lo strumento necessario e fondamentale per poter pensare di identificare il bosone di Higgs.

Le caratteristiche degli adroni costituiti da quark b (i.e. una alta massa ~ 4.5 GeV e una lunga vita media ~ 1.5 ps) fanno si' che questi adroni a LEP voleranno per qualche millimetro prima di decadere e che i loro prodotti di decadimento avranno un alto momento trasverso ed alto parametro d'impatto rispetto agli adroni che contengono quark leggeri. Queste caratteristiche combinate con altre proprieta' dei vertici secondari del decadimento degli adroni o con leptoni ad alto momento trasverso, o con la rapidita' delle tracce mediante tecniche di likelihood o con Reti Neurali permettono di raggiungere altissime discriminazioni tra jet provenienti da quark b e quelli da quark leggeri. Ad esempio in figura 47 e' mostrato il numero di eventi di fondo in funzione dell'efficienza di identificazione dell'Higgs (per l'esperimento DELPHI): per un'efficienza del 60% si riesce a sopprimere il fondo dovuto alla produzione di WW a meno del percento. In figura 47 le linee tratteggiate e continue rappresentano l'algoritmo di b-tagging usato fino al 1998 (tratteggiata) e dopo il 1999 (continua). Ricordiamo che tutte le volte che si usa una simulazione per determinare delle quantita' tipo efficienze o fondi, e' fondamentale che l'accordo tra dati e simulazione sia ottimo. Il grosso del lavoro in un'analisi di dati e' capire il proprio rivelatore e la propria fisica di modo da poterli riprodurre correttamente nella simulazione. Solo una volta raggiunto un ottimo accordo tra dati e simulazione si puo' pensare di poter procedere nell'analisi e determinare efficienze e altro.

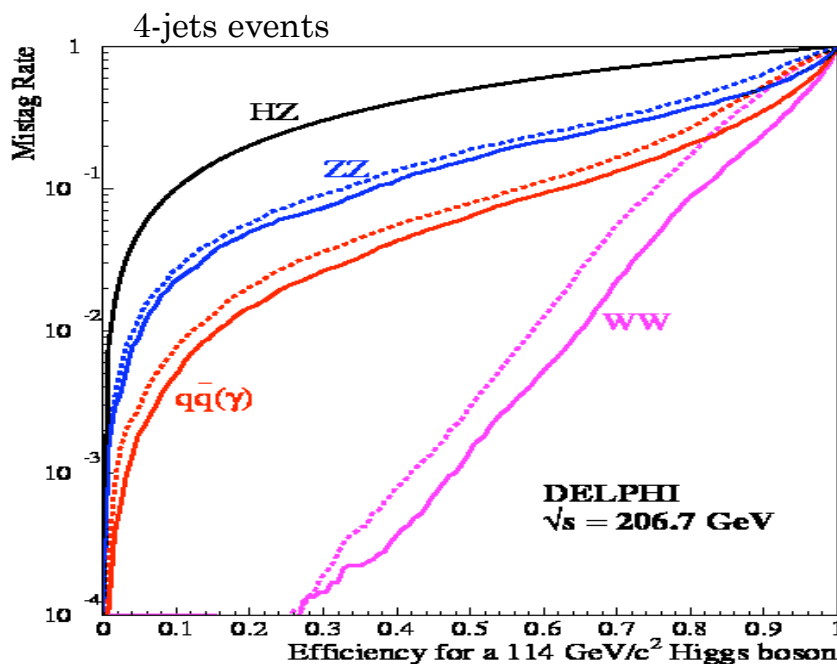


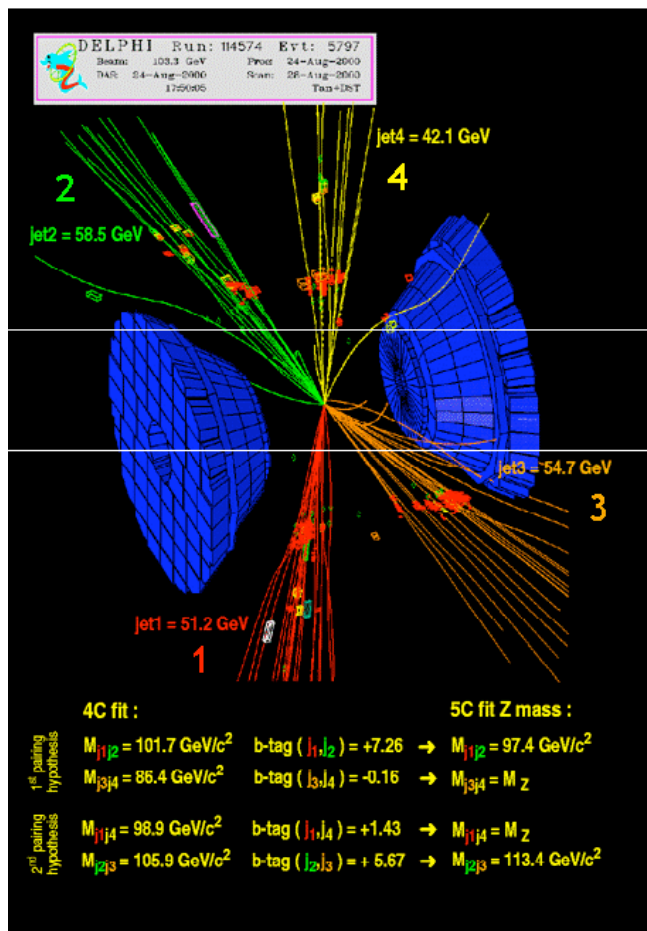
Fig.47

Nella ricerca del bosone di Higgs e' fondamentale ricostruire accuratamente tutta l'energia depositata nel rivelatore (questo e' specialmente vero per lo stato finale con neutrini) e di essere capaci di ricostruire la massa invariante dei di-jet con precisioni di 2-3 GeV, di modo da poter distinguere le varie particelle prodotte.

Gli esperimenti usano reti neurali o tecniche di likelihood per combinare le varie proprieta' dell'evento (come l'identificazione di quark b e informazioni cinematiche o topologiche) e dare come risultato una variabile discriminante che permetta di raggiungere un'alta efficienza per l'identificazione di Higgs e un'alta reiezione del fondo. La variabile discriminante e' poi combinata con l'informazione sulla massa del candidato per dare ad ogni evento un peso, esprimendo in tal modo la significativita' dell'evento stesso rispetto ad una data ipotesi di massa di Higgs.

Esempi di difficoltà per ogni topologia.

Il canale a 4-jet: la più grande difficoltà di questo canale è l'accoppiamento dei jet. In un evento a 4 jet ci sono 6 possibili combinazioni di 2 jet, e dunque 3 possibili combinazioni per coppie di 2-jet. In un evento a 5 jet (dove dunque uno dei quark ha emesso un gluone ad alto p_T e alta energia), ci sono 10 combinazioni di coppie di 2-jet. Per scegliere gli accoppiamenti corretti, i 4 esperimenti hanno scelto soluzioni diverse: forzare uno dei 2-jet ad essere il bosone Z (ricordiamoci che a LEP l'energia nel centro di massa è nota con altissime precisioni, e dunque è possibile imporre la conservazione dell'energia e del momento); accoppiare i jet con la più alta probabilità di provenire da un quark b e assegnarli all'ipotesi di Higgs; fare tutte le possibili combinazioni con l'ipotesi di WW, ZZ e HZ e infine discriminare in base al minimo χ^2 del fit; controllare lo spin del bosone mediante gli angoli tra i jet... Il fondo irriducibile in questo canale viene dalla produzione di ZZ e WW, avendo scelto il cattivo accoppiamento e in secondo luogo dal fondo cosiddetto di QCD (i.e. stati finali qqgg). Come esempio in figura 48 è mostrato un evento di DELPHI e due dei tre possibili accoppiamenti tra 2-jet. L'evento è stato registrato nel 2000 a 206 GeV di energia nel centro di massa. Si hanno 2 soluzioni ad alta massa e 1 soluzione a bassa massa (a seconda se l'angolo tra i jet sia grande o meno). Una soluzione è compatibile con la produzione di ZZ mentre la seconda con una produzione di un Higgs a massa di ~ 113 GeV. L'algoritmo di DELPHI seleziona l'evento compatibile con ZZ. Un altro esempio (un evento di ALEPH) è mostrato in figura 49. Anche in questo caso le due soluzioni ad alta massa sono compatibili con la produzione di ZZ e di HZ. L'algoritmo di ALEPH seleziona però la combinazione HZ.



sei possibili coppie:

H dijet	(1,2) M=97 B=5.7	(1,3)	(1,4)	(2,3) M=113 B=3.4	(2,4)	(3,4)
Z dijet	(3,4) M= M_Z B=-0.5	(2,4)	(2,3)	(1,4) M= M_Z B=2.0	(1,3)	(1,2)

•Un solo valore di massa viene scelto

Fig.48

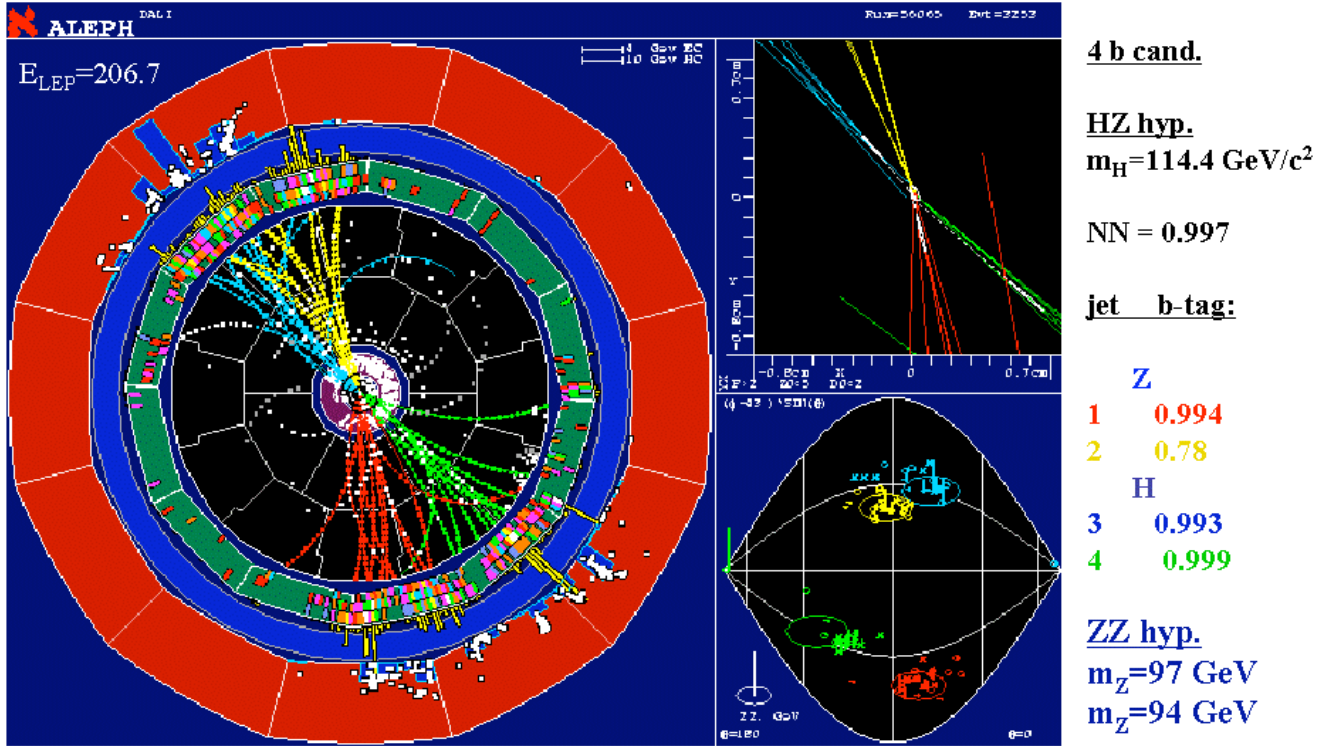


Fig.49

Il canale leptonic: questa topologia è la più pulita dal momento che è quasi priva di fondo. Un candidato in questa topologia sarebbe stato il “candidato d’oro” che tutti gli esperimenti hanno sognato di rivelare. Anche in questo canale è possibile introdurre degli errori sperimentali, infatti è possibile erroneamente ricostruire un candidato ad alta massa se un fotone di radiazione di stato iniziale o emesso da uno dei due leptoni del decadimento della Z viene associato ad uno dei jet, aumentando in tal modo artificialmente la massa del di-jet. Ovviamente i 2 leptoni avrebbero una massa non compatibile con la Z, ma nel fit e nella richiesta di conservazione energia e momento e di produzione associata HZ, il fatto può passare inosservato. In figura 50 è mostrato a sinistra un candidato di L3 con due elettroni dalla Z e due jet b-tagati, a destra un candidato di DELPHI $\mu\mu qq$ dove un fotone emesso da uno dei muoni può rischiare di essere associato ad uno dei jet.

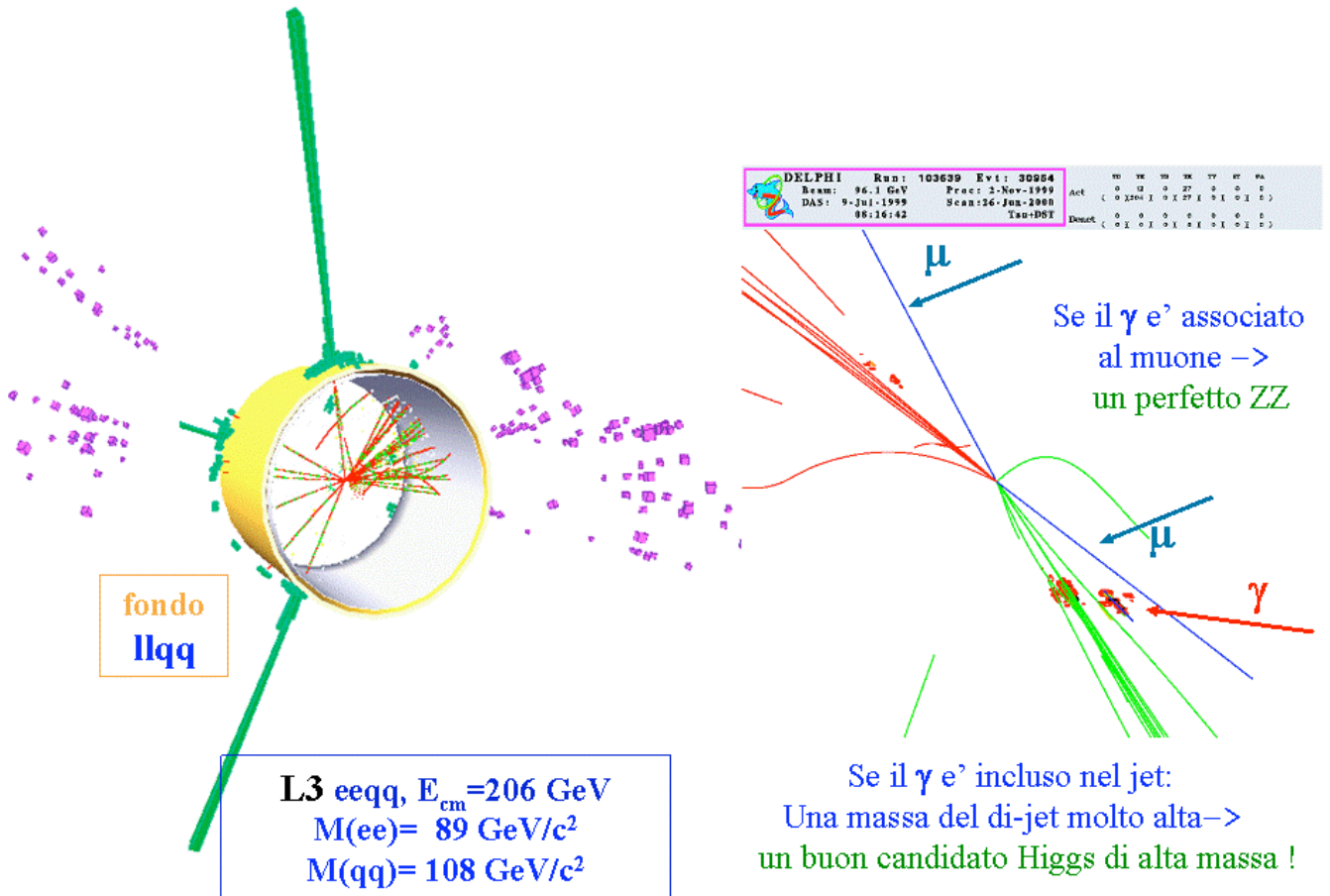


Fig.50

Il canale con neutrini: e' probabilmente il canale piu' difficile a causa dell'alta contaminazione del fondo e dalla scarsa risoluzione sulla massa del di-jet, se non si vuole imporre la conservazione dell'energia e del momento nell'ipotesi di produzione HZ. Se si vuole migliorare la risoluzione in massa bisogna imporre che la massa mancante sia quella del bosone Z, ovvero che l'energia e la massa mancante siano dovuti ai 2 neutrini provenienti dal decadimento della Z. Ma facendo questo parte del fondo e' anche forzato al limite cinematico $M(jj) = E_{cm} - m_Z$.

Per questa ragione gli eventi collineari $qq(\gamma)$ sono il fondo piu' difficile da controllare. Il segnale di un Higgs ad alta massa non e' mai collineare, perche' la convoluzione di una sezione d'urto che decresce rapidamente (vedi figura 44) con la larghezza finita della Z risultano sempre in un boost per l'Higgs. A collinearita' $< 5^\circ$, si aspetta di avere solo il 5% di segnale di Higgs (a $E_{cm}=206$ GeV e per $m_H=115$ GeV, $\sigma=0.015$ pb) e il 30% di $qq(\gamma)$ ($\sigma=80$ pb). Di quest'ultimi una frazione non trascurabile perde piu' di 60 GeV di energia in neutrini: 6×10^{-4} eventi $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$. Di questi 5×10^{-4} sono $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$. Nell'anno 2000 ogni esperimento a LEP ebbe in media ~ 10 eventi $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$ che persero piu' di 60 GeV di energia in neutrini (per una luminosita' $L=200$ pb⁻¹).

Un altro fondo insidioso per questa topologia e' il "doppio ritorno radiativo alla Z" ($Z\gamma\gamma$), dal momento che la sezione d'urto di questo processo non e' nota con gran precisione. In questi eventi 2 fotoni sono emessi back-to-back e la Z e' prodotta a riposo. Gli eventi sono caratterizzati da $E(\gamma\gamma)=E_{cm}-m_Z$. Se i fotoni vengono persi nella beam-pipe e la massa

manca e' forzata essere uguale a quella del bosone Z, la massa visibile e' forzata al limite cinematico (dunque come per un Higgs massivo al limite cinematico).

Risultati. Alla fine di LEP combinando i risultati della ricerca diretta dell'Higgs dei quattro esperimenti, si ottenne un limite inferiore sulla sua massa di 114.3 GeV.

Uno dei quattro esperimenti (ALEPH) osservava un eccesso di eventi a 4-jet compatibile con un Higgs di massa intorno ai 115-116 GeV. L'eccesso era di 3 deviazioni standard e non fu confermato da nessun altro degli esperimenti.

La sensibilita' degli esperimenti di LEP poteva escludere la produzione di un Higgs di massa maggiore di 115.3 GeV, e il limite osservato fu 114.3 GeV a causa del leggero eccesso di ALEPH.

Nonostante i 4-jet siano il canale a piu' alta statistica, risultando in un valore aspettato per esclusione dell'Higgs di 114.5 GeV e osservato di 113.3 GeV; combinando i vari canali leptonici insieme si ottiene una sensibilita' simile: un valore aspettato di 114.2 GeV e osservato di 114.2 GeV. Dunque il leggero eccesso visto da Aleph nei 4-jet non fu confermato da un simile eccesso nei canali leptonici.

Riassumendo: ad oggi il limite sulla massa dell'Higgs ottenuto da ricerche dirette e' di 114.3 GeV. Dalle misure di precisione elettrodeboli vi e' una indicazione che l'Higgs deve essere leggero e di massa probabilmente non superiore a 260 GeV. Affinche' il Modello Standard sia valido fino alla scala di Plank l'Higgs deve essere leggero e intorno ai 150 GeV.

Nella figura 51 tutti i limiti ad oggi sono riassunti in modo grafico.

L'Higgs esiste? Se si e' quello del Modello Standard? C'e' nuova fisica al di la del Modello Standard? Solo LHC nel prossimo futuro riuscirà a rispondere a queste domande

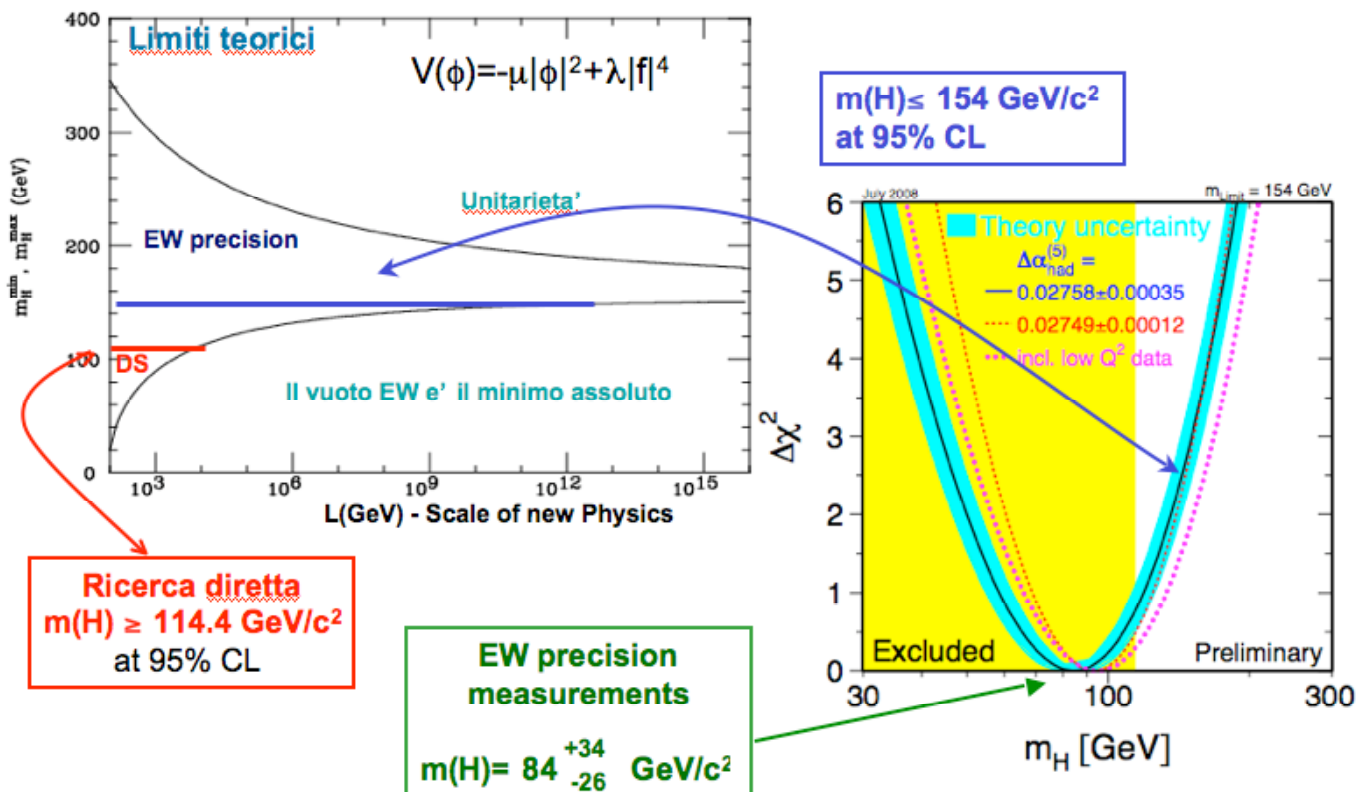


Fig 51