

GLI ESPERIMENTI AL LEP DEL CERN: RISULTATI SCIENTIFICI E ASPETTI STORICI E SOCIOLOGICI di Fabrizio Fabbri e Giorgio Giacomelli

Per oltre quindici anni il progetto LEP del CERN ha costituito l'impresa scientifica che ha visto impegnati il maggior numero di scienziati e tecnici. Questo progetto, ormai giunto alla sua conclusione, verrà ricordato in particolare per aver dato una solida base sperimentale al cosiddetto Modello Standard, l'attuale modello teorico di riferimento per la comprensione quantitativa dei costituenti fondamentali della materia e delle loro interazioni. In questo lavoro cercheremo di tracciare a grandi linee quella che può essere considerata l'eredità scientifica di LEP, e ci soffermeremo anche su alcuni aspetti sociologici che ci sono sembrati interessanti, o quantomeno curiosi, legati alla storia degli esperimenti in questione.

INTRODUZIONE

Il collisionatore per elettroni e positroni LEP (*Large Electron Positron collider*) era un grande acceleratore circolare di quasi 27 km di circonferenza in funzione dall'agosto 1989 alla fine del 2000 presso il laboratorio europeo del CERN di Ginevra. Era alloggiato in una galleria sotterranea accessibile dalla superficie tramite otto pozzi situati in altrettante zone di accesso,

la cui profondità variava da un minimo di 50 metri ad un massimo di 150 metri. In quattro di queste zone erano collocati i quattro grandi esperimenti ALEPH, DELPHI, L3 e OPAL, che durante i quasi dodici anni di funzionamento hanno raccolto una mole impressionante di dati. Una vista d'insieme del LEP e delle quattro zone sperimentali è mostrata in figura 1.

Figura 1. Il LEP del CERN e i quattro esperimenti.

FIGURA 1

Dall'analisi delle collisioni elettrone-positrone ($e^+ e^-$), inizialmente ad energie nel sistema del centro di massa di circa 91 GeV, corrispondente alla zona di picco della risonanza Z^0 (fase LEP1) e successivamente a diverse energie nell'intervallo fra 130 e 209 GeV (fase LEP2), sono stati ottenuti risultati che hanno portato a grandi progressi nella fisica delle particelle elementari. Un rapido sguardo all'ultima edizione della *"Review of Particle Physics"* [1] o ad alcuni Atti di conferenze recenti [2-4], è sufficiente per farsi un'idea del contributo dato dal progetto LEP all'avanzamento delle conoscenze in questo campo.

In questo lavoro esporremo in modo estremamente qualitativo alcuni fra i risultati più significativi ottenuti al LEP, e cercheremo di mostrare come questo progetto scientifico, oltre a contemplare la costruzione del più esteso impianto ad elevata tecnologia mai costruito per la ricerca e di quattro sofisticati rivelatori di particelle di grandi dimensioni, abbia anche rappresentato un nuovo modo di fare fisica. Più di 1700 persone, fra

scienziati e tecnici provenienti da circa 200 tra Laboratori e Università di Europa, America e Asia, hanno infatti dato vita a quattro grandi collaborazioni internazionali, formate da un minimo di 300 ad un massimo di 550 persone circa, che si sono confrontate per molti anni, con i problemi di "convivenza" (scientifica e non) che si possono ben immaginare all'interno di gruppi così numerosi.

Ora che questa avventura è praticamente conclusa, si può tranquillamente affermare che il motore del suo successo è stato lo spirito di reale collaborazione internazionale e di sana competizione scientifica fra i quattro esperimenti, che si è sempre mantenuto vivo anche durante il ricambio generazionale di ricercatori e studenti (laureandi e dottorandi) al quale si è assistito. Evidentemente l'atmosfera di lavoro si è dimostrata sufficientemente stimolante e, allo stesso tempo, amichevole per attrarre i giovani, nonostante le grandi dimensioni delle collaborazioni. Ci sembra doveroso quindi riconoscere al LEP anche il merito di aver

dato un contributo importante alla didattica dei Corsi di Laurea in Fisica ed al Dottorato di Ricerca, nonché alla divulgazione scientifica.

L'EREDITÀ SCIENTIFICA DI LEP

Il LEP ha dato al Modello Standard (MS) una solida base sperimentale. Per apprezzarne la portata è utile riassumere, molto sinteticamente, l'assetto concettuale della teoria.

Il Modello Standard. Nel MS i *quark* ed i leptoni vengono considerati i costituenti fondamentali della materia, nel senso che non li si suppone dotati di struttura interna (formalmente vengono trattati come oggetti puntiformi). Oltre alla forza gravitazionale, che però non produce effetti apprezzabili nelle condizioni sperimentali attualmente realizzabili in laboratorio, è necessario supporre l'esistenza di altri tre tipi di interazioni (o forze) fra i costituenti fondamentali per poter interpretare le osservazioni sperimentali: (i) l'interazione elettromagnetica, che avviene fra i costituenti che possiedono carica elettrica; (ii) l'interazione forte, "sentita" dai *quark* ma non dai leptoni, dovuta alla cosiddetta carica di "colore" che può avere tre valori diversi; (iii) l'interazione debole, alla quale sono soggetti tutti i costituenti fondamentali, generata dalla cosiddetta carica debole. *Quark* e leptoni sono raggruppati in famiglie o generazioni, ciascuna formata da due tipi diversi di *quark* e da due leptoni, uno elettricamente carico ed uno neutro. La prima famiglia è costituita dai due *quark up* (u) e *down* (d), con carica elettrica rispettivamente di $2/3$ e $-1/3$ (in unità di carica del protone), e dai due leptoni elettrone (e) e neutrino elettronico (ν_e), con carica elettrica -1 e 0 . La materia ordinaria, composta di atomi, è fatta di *quark up* e *down* e di elettroni; è stata quindi una sorpresa l'aver osservato in natura l'esistenza di altre due repliche della prima famiglia che si presentano con identiche cariche elettrodeboli e di colore. La seconda famiglia è composta dai *quark charm* (c) e *strange* (s) e dai leptoni mu (μ) e neutrino muonico (ν_μ), la terza è composta dai *quark top* (t) e *bottom* (b) e dai leptoni tau (τ) e neutrino tauonico (ν_τ). L'unica differenza tra le famiglie sembra

essere solo la massa, che aumenta progressivamente passando dalla prima alla terza famiglia. Il MS non spiega il motivo di questa ripetizione, così come non stabilisce un limite al numero di repliche che potrebbero esistere. Nel MS il discorso fatto per *quark* e leptoni viene esteso in modo naturale ai corrispondenti anti-*quark* e anti-leptoni.

Nelle moderne teorie, le interazioni fra i costituenti vengono descritte in termini di uno scambio reciproco di altre particelle elementari che, nel MS, prendono collettivamente il nome di "bosoni di gauge". I bosoni che vengono scambiati nell'interazione forte fra i *quark*, dotati di carica di colore, sono chiamati gluoni (g). L'interazione elettromagnetica e debole, unificate nell'interazione elettrodebole, sono mediate rispettivamente dal fotone γ e dai bosoni deboli W^+ , W^- e Z^0 .

La struttura formale della teoria e la sua consistenza interna si basano su una prescrizione di simmetria, detta simmetria di gauge, che fissa in modo univoco le interazioni tra *quark*, leptoni e bosoni di gauge in modo identico per le tre famiglie. Questa simmetria, però, richiede che le masse dei *quark*, dei leptoni e dei bosoni di gauge siano nulle, mentre le misure sperimentali mostrano che i *quark*, i leptoni e i bosoni deboli (W^+ , W^- , Z^0) hanno massa. Per spiegare l'origine di queste masse si introduce nel MS un nuovo elemento, il cosiddetto meccanismo di Higgs, che ipotizza l'esistenza di una o più particelle (bosoni di Higgs) dotate di accoppiamenti elettrodeboli e con interazioni diverse a seconda del tipo di *quark* e di leptoni con i quali queste particelle interagiscono. L'effetto, che tecnicamente prende il nome di "rottura spontanea della simmetria", è quello di generare le masse.

Perché il LEP. La possibilità concreta di effettuare esperimenti ad un collisionatore $e^+ e^-$ di altissima energia, il LEP, prospettata nel 1980, raccolse un immediato successo presso la comunità scientifica europea ed internazionale. In una prima fase (LEP1), il LEP avrebbe prodotto grandi quantità di bosoni neutri Z^0 (all'epoca non ancora scoperti) con la prospettiva di poter effettuare misure di precisione nel settore elettrodebole del Modello Standard, il settore cioè che riguardava l'unificazione fra la forza elettromagnetica, che spiega la struttura atomica della materia, e la forza debole,

responsabile dei decadimenti radioattivi. Un altro elemento di grande interesse risiedeva nel fatto che la Z^0 , con una massa pari a quasi cento volte quella del protone, era prevista decadere come si usa dire "democraticamente" in tutte le coppie *quark-antiquark* o leptone-antileptone, purché di massa inferiore a 45 GeV. Questo avrebbe permesso di studiare in dettaglio i *quark* ed i leptoni della terza famiglia, all'epoca poco conosciuti. In una seconda fase (LEP2) l'energia dei fasci dell'acceleratore sarebbe stata gradualmente aumentata fino a poco più di 200 GeV, consentendo studi dettagliati sui bosoni deboli carichi W^+ e W^- , prodotti in coppia ad energie al di sopra di circa 160 GeV, e consentendo di estendere la ricerca diretta del bosone di Higgs e di altre eventuali nuove particelle a valori di massa molto maggiori rispetto alla prima fase.

Oltre al grande interesse scientifico, questa nuova macchina acceleratrice offriva ai fisici sperimentali delle condizioni di lavoro altrettanto attraenti. Il basso numero atteso di eventi al secondo ed un fondo minimo dovuto ad eventi spuri, consentivano la progettazione di una nuova generazione di rivelatori caratterizzati da una grande completezza, con la possibilità di analizzare in dettaglio le caratteristiche di tutti gli eventi prodotti nelle collisioni. I quattro esperimenti, che furono approvati dal comitato scientifico del CERN, adottarono soluzioni tecniche a volte diverse fra loro e a volte simili; furono costruiti in modo da avere una copertura pressoché totale dell'angolo solido, con un efficiente tracciamento delle particelle cariche in campo magnetico, con calorimetria elettromagnetica e adronica, e con una buona possibilità di identificazione delle particelle.

Tre e solo tre famiglie. Il primo risultato di grande rilievo ottenuto dagli esperimenti a LEP1 è stato quello di mostrare con grande precisione che ci sono tre e solo tre famiglie di neutrini e quindi di *quark* e leptoni. La figura 2a mostra la sezione d'urto del processo (cioè la probabilità che esso avvenga) $e^+ e^- \rightarrow q\bar{q}$ (\rightarrow *adroni*) in funzione dell'energia nel centro di massa. La linea continua sovrapposta ai punti sperimentali rappresenta la previsione del MS. È evidente il picco ad una energia pari a 91 GeV che corrisponde alla formazione della Z^0 , che decade successivamente in una coppia *quark-antiquark* rivelata sotto forma di "jets" di adroni. La determinazione accurata della forma del picco (larghezza della risonanza) fornisce una misura precisa della vita media della particella che, a sua volta, è legata al numero di tipi di neutrini diversi nei quali essa può decadere.

Nel MS la vita media della Z^0 diminuisce con l'aumentare del numero di tipi diversi di neutrino esistenti, e quindi di famiglie. La figura 2b, oltre ad un esempio di risultati sperimentali (punti), mostra le previsioni teoriche (curve) della forma che il picco avrebbe a seconda che esistano 2, 3 o 4 tipi di neutrini. La misura più precisa della larghezza della Z^0 (pari a un'incertezza relativa dell'uno per mille), ottenuta combinando i risultati di tutti e quattro gli esperimenti, ha dato come risultato $N_\nu = 2,9841 \pm 0,2283$. Questo risultato costituisce un punto fermo in quanto, come sottolineato in precedenza, non si ha idea del perché esistano le famiglie e, prima di LEP, non si sapeva con precisione quante queste potessero essere.

Figura 2. (a) Dipendenza della sezione d'urto per il processo $e^+ e^- \rightarrow q\bar{q}$ (\rightarrow *adroni*) dall'energia nel centro di massa. (b) Dalla forma della curva di risonanza della Z^0 si può risalire al numero dei tipi di neutrini.

FIGURA 2A

FIGURA 2B

Misure di precisione a LEP1. La misura accurata di altre proprietà fisiche

della Z^0 ha reso possibile una serie di verifiche delle previsioni del settore

elettrodebole del MS con una precisione di gran lunga superiore a quelle ottenute precedentemente [5]. Ricordiamo ad esempio la misura della massa della Z^0 ($M_z=91,187\pm 0,002$ GeV/c²), che costituisce ora una delle costanti fondamentali della fisica per via della precisione ottenuta, la sezione d'urto adronica al picco della risonanza (conosciuta con una precisione di circa l'uno per mille), il rapporto R fra la probabilità di decadimento in adroni rispetto alla probabilità di decadimento in leptoni (anch'esso all'uno per mille circa), e la misura delle asimmetrie avanti-indietro (*forward-backward*). Dalla misura degli accoppiamenti della Z^0 ai leptoni si è potuta verificare sperimentalmente la validità dell'ipotesi che va sotto il nome di *universalità leptonica*, nel senso che l'interazione debole cui sono soggetti elettroni, leptoni μ e leptoni τ è la stessa per le tre particelle, come avviene per l'interazione elettromagnetica.

Con il passare del tempo si sono misurate molte altre grandezze fisiche e la combinazione dei risultati dei quattro esperimenti, divenuta una procedura regolare, ha permesso di ottenere i risultati più precisi. Una delle conseguenze più interessanti dell'aver raggiunto precisioni così alte, è stata quella di aver potuto verificare, per la prima volta, l'effetto delle correzioni quantistiche deboli alle previsioni teoriche del MS e verificarne la validità. L'accordo con i valori sperimentali, infatti, risulta soddisfacente solo se vengono incluse anche queste correzioni, piccole ma non più trascurabili considerata la precisione sperimentale raggiunta.

Determinazione sottosoglia della massa del quark top e del bosone di Higgs. Le correzioni quantistiche sono sensibili alle masse di tutte le particelle che vanno considerate nei calcoli teorici dei processi, anche quelle che, risultando troppo massive per essere prodotte come particelle reali, entrano solo a livello virtuale negli stadi intermedi del calcolo perturbativo. Assumendo la validità e l'autoconsistenza del MS, è possibile dedurre la massa di particelle non osservabili direttamente (perché troppo pesanti) tramite le correzioni virtuali che esse inducono. Questo perché l'entità delle correzioni necessarie per far sì che le previsioni teoriche descrivano al meglio i dati sperimentali dipende, per l'appunto,

dal valore della loro massa. E' una sorta di "scoperta" sotto soglia.

m_t . Una impressionante dimostrazione della potenza di questo metodo la si ebbe nel 1993 quando, sulla base degli effetti virtuali imputabili all'esistenza di un sesto quark (all'epoca non ancora scoperto) e dai vincoli sempre più stringenti imposti dai risultati delle misure di precisione degli esperimenti al LEP, la massa del quark top risultò essere di 166 GeV/c² [6], con un errore di circa 30 GeV. L'annuncio ufficiale della scoperta del quark top venne dato nel 1995 [7,8], congiuntamente dalle collaborazioni CDF e D0 al Laboratorio Fermilab di Chicago. I due esperimenti al collisionatore protone-antiprotone all'epoca quotarono i valori di $178 \pm 8 \pm 10$ GeV/c² e $199 \pm 20 \pm 22$ GeV/c², rispettivamente. Dai risultati finali di LEP oggi disponibili si ottiene una massa del top più precisa, $M_t=171\pm 10$ GeV/c², così come più preciso è il risultato che si ottiene dalla misura diretta effettuata dagli esperimenti al Fermilab, $M_t=174\pm 5$ GeV/c². Come si vede l'accordo fra i due valori è tutt'ora eccellente.

m_{H^0} . Un altro importante risultato che emerge dal complesso delle misure di precisione effettuate al LEP dai quattro esperimenti è che effettivamente le interazioni della Z^0 sono quelle che ci si aspetta da una "soggiacente" simmetria di gauge in natura. Dalla constatazione che le masse dei costituenti fondamentali e dei bosoni di gauge deboli non sono nulle si potrebbe, peraltro, giungere alla conclusione opposta. Questa situazione apparentemente paradossale è in realtà tipica di simmetrie "rotte spontaneamente" tramite il meccanismo di Higgs, e si può quindi affermare che LEP ha fornito una prova sperimentale molto solida in favore dell'esistenza in natura di un meccanismo di questo tipo. Oltre alla ricerca diretta del bosone di Higgs, come si dirà brevemente più avanti, si è tentato di dedurre in modo indiretto la sua massa utilizzando il metodo adottato per prevedere la massa del quark top. Sfortunatamente le correzioni quantistiche alle osservabili misurate al LEP indotte dal bosone di Higgs non sono così sensibili alla massa come nel caso del quark top. Al momento, utilizzando anche i risultati ottenuti da altri esperimenti, sembra piuttosto chiaro

che il MS richiede un bosone di Higgs relativamente leggero, con un limite superiore alla sua massa di circa 200 GeV/c² (95 % C.L.). Rammentiamo che nel MS la massa dell'Higgs è tutt'al più confinata in un intervallo di massa che grossolanamente va da 1 GeV/c² a 1 TeV/c².

Fisica dei "sapori pesanti". Un altro settore nel quale il LEP ha contribuito in maniera rilevante è quello dei cosiddetti "sapori pesanti", cioè dei *quark* e dei leptoni con massa elevata, in particolare il *quark* b ed il leptone τ . Non si sono osservate discrepanze particolarmente significative negli accoppiamenti della Z^0 ai *quark* e leptoni della terza generazione. Le probabilità di decadimento per $Z^0 \rightarrow b\bar{b}$, $Z^0 \rightarrow c\bar{c}$ e $Z^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$ sono state misurate con precisione e le previsioni del MS sono risultate completamente consistenti con i valori sperimentali. Misure di caratteristiche quali le vite medie e le masse di adroni contenenti il *quark* b, la vita media ed i modi di decadimento del leptone τ , sono tutt'ora competitive.

QCD. Il LEP è stato pensato principalmente come una macchina per la fisica elettrodebole, ma l'impatto che ha avuto anche sul progresso delle conoscenze nel settore dell'interazione forte è stato superiore alle previsioni. L'ottima conoscenza delle condizioni iniziali delle collisioni $e^+ e^-$, la relativa semplicità e "pulizia" dello stato finale $e^+ e^- \rightarrow q \bar{q}(g\dots) \rightarrow \text{adroni}$, la grande energia disponibile per la creazione di jets adronici, associate alle caratteristiche di completezza dei rivelatori di LEP, l'alta statistica disponibile e, non ultima, una buona base teorica di partenza, hanno permesso di consolidare la nostra fiducia nella QCD, la teoria di *gauge* che nel MS

descrive l'interazione forte fra i *quark* e i gluoni.

Misura di α_s . Fra i tanti risultati importanti ottenuti al LEP in questo settore, quello più significativo è probabilmente la misura della costante di accoppiamento forte, α_s . Lo studio dettagliato dei decadimenti adronici della Z^0 da parte dei quattro esperimenti ha permesso di determinarne il valore con una eccezionale precisione. La consistenza dei valori di $\alpha_s(M_{Z^0})$ ottenuti utilizzando moltissime osservabili indipendenti e con approcci sperimentali e teorici diversi, ha costituito un importante test di verifica della teoria. Questa prevede che α_s non sia una costante, ma che diminuisca all'aumentare dell'energia ("running" della costante di accoppiamento). Ciò è stato per la prima volta dimostrato sperimentalmente in modo indiscutibile dalle misure precise di LEP. I quattro esperimenti hanno misurato α_s ad energie che vanno dalla massa del leptone τ (~ 1.8 GeV) fino a 209 GeV, ed hanno mostrato come la sua evoluzione energetica sia compatibile con quella prevista dalla teoria (figura 3). Le ottime capacità di identificazione dei rivelatori hanno inoltre permesso di verificare sperimentalmente la fondatezza dell'assunzione teorica secondo la quale il valore di α_s non dipende dal tipo di *quark* o, come si è soliti dire, non dipende dal "sapore" dei *quark*.

E' forse utile ricordare che anche la costante di accoppiamento elettromagnetica ha una dipendenza energetica, ed il suo valore di 1/137 a bassa energia aumenta fino a circa 1/128 all'energia di LEP1.

Figura 3. Misure sperimentali della costante di accoppiamento forte, α_s , in funzione dell'energia. La linea continua rappresenta l'evoluzione energetica predetta dalla QCD.

FIGURA 3

"Fattori di colore" e differenze fra *jets* di *quark* e di gluoni. Un'altra misura

particolarmente rilevante per la QCD alla quale gli esperimenti al LEP hanno dato

un contributo determinante, è quella dei cosiddetti "fattori di colore", C_F, C_A e T_F . Questi fattori rappresentano l'intensità relativa effettiva della forza forte negli accoppiamenti $q \rightarrow qg$ (*quark* \rightarrow *quark* + *gluone*), $g \rightarrow gg$ e $g \rightarrow q\bar{q}$: il loro valore dipende dalla struttura stessa della simmetria alla base della teoria. I valori numerici ottenuti dagli esperimenti risultano in ottimo accordo con quelli previsti da una teoria basata sulla simmetria SU(3), come QCD per l'appunto, e ne costituiscono quindi una verifica fondamentale. In conseguenza di questa differenza nelle intensità relative degli accoppiamenti fra *quark* e gluoni e fra gluoni e gluoni, ci si aspetta che *jets* prodotti da *quark* e *jets* prodotti da gluoni mostrino delle differenze peculiari. A parità di energia, per esempio, un gluone dovrebbe produrre un *jet* con una molteplicità di particelle maggiore rispetto a quella di un *jet* prodotto da un *quark*. Inoltre i *jets* di gluoni dovrebbero essere più "larghi" e più "soffici". Prima di LEP non esistevano evidenze convincenti di questo fatto mentre ora sappiamo che le previsioni di QCD sono supportate dalle osservazioni sperimentali che, grazie alla capacità dei rivelatori al LEP di distinguere con una certa efficienza *jets* di *quark* da *jets* di gluoni, hanno mostrato chiaramente queste differenze.

Misure di precisione a LEP2. Alcuni degli aspetti di fisica trattati fino a questo punto si riferiscono già alla seconda fase di LEP, quella che prende il nome di LEP2, iniziata a metà del 1995 e conclusasi nel novembre del 2000 con la chiusura definitiva del collisionatore.

Dopo una breve fase iniziale, chiamata LEP1.5 nella quale l'energia nel centro di

massa fu portata a 130 e a 136 GeV, si passò ad una energia di 161 GeV, sufficiente per produrre coppie di W^+W^- in soglia ($e^+e^- \rightarrow W^+W^-$). L'energia fu gradualmente aumentata fino a raggiungere l'energia record di 209 GeV. Venne aperta così la strada allo studio dettagliato delle proprietà dei bosoni deboli carichi ed intensificata la "caccia" a nuove particelle, prima fra tutte il bosone di Higgs. La massa del bosone W^\pm misurata a LEP combinando i risultati dei quattro esperimenti è oggi nota con una precisione dello 0.5 per mille ($M_w = 80.450 \pm 0.034 \text{ GeV}/c^2$). Il valore che si ricava dal MS, sulla base delle misure elettrodeboli di precisione, è in accordo con la misura diretta di LEP entro gli errori; inoltre l'accordo col valore misurato dagli esperimenti al collisionatore del Fermilab è eccellente.

Triplo vertice bosonico. Sulla base dell'ottimo accordo fra le previsioni teoriche ed i risultati di LEP sulla misura della sezione d'urto $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ alle varie energie, si veda ad esempio la figura 4, si è potuto verificare in maniera diretta, per la prima volta, l'esistenza del vertice di accoppiamento triplo fra i bosoni di gauge carichi e neutri previsti dal MS: $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow W^+W^-$; ciò ha confermato la cosiddetta "natura non abeliana" della teoria.

Tutte le misure fino ad ora effettuate a LEP per evidenziare l'esistenza di accoppiamenti triplici fra soli bosoni di gauge neutri, del tipo $\gamma Z^0 Z^0$, $Z^0 \gamma \gamma$, e $Z^0 Z^0 Z^0$, non contemplati nel MS, hanno dato esito negativo, così come non sono stati per ora osservati contributi anomali agli accoppiamenti fra bosoni.

Figura 4. Misura della sezione d'urto di produzione di coppie W^+W^- a varie energie. La linea continua rappresenta la previsione del MS, quella tratteggiata rappresenta la previsione in assenza del triplo vertice bosonico.

FIGURA 4

Ricerca diretta di nuove particelle. Il bosone di Higgs. A conclusione di questa rassegna dei risultati scientifici di maggior rilievo ottenuti a LEP, vogliamo menzionare i punti salienti di una attività di ricerca condotta da una agguerrita schiera di fisici fin dal primo giorno di funzionamento di LEP. Ci riferiamo al

settore delle ricerche di nuove particelle che fino agli ultimi giorni di presa dati di LEP ha tenuto viva l'attenzione della comunità scientifica. Durante tutto il periodo di funzionamento del collisionatore, gli esperimenti hanno continuamente aggiornato i limiti inferiori sulla massa di particelle, più o meno

esotiche, la cui esistenza è contemplata in scenari che vanno oltre il Modello Standard, per esempio la supersimmetria, i subcostituenti, ecc., fino a raggiungere i limiti cinematici imposti dall'energia massima dell'acceleratore. A parte qualche "avvisaglia", rientrata poi come falso allarme ad una analisi statisticamente più significativa, non si ebbe mai evidenza di produzione di nuove particelle.

Tuttavia, proprio negli ultimi mesi di presa dati alla massima energia di LEP verso la fine del 2000, l'osservazione di alcuni eventi candidati Higgs particolarmente interessanti, con una massa, purtroppo, vicina al limite cinematico di produzione ($115 \text{ GeV}/c^2$), provocò una notevole eccitazione nell'ambiente e motivò la richiesta congiunta da parte dei quattro esperimenti di un ulteriore anno di funzionamento di LEP. La significatività del segnale era interessante, ma non convincente, e si voleva capire se si trattava di una semplice fluttuazione statistica del fondo o se invece si trattava veramente dei primi segni di una scoperta. La richiesta, comunque, non fu accolta. Alla luce di quanto ottenuto in tempi più recenti con la combinazione dei risultati finali dei quattro esperimenti, e cioè un abbassamento nella significatività di un ipotetico segnale di Higgs con una massa di $115 \text{ GeV}/c^2$, non si può dire che la scoperta, che LEP avrebbe ben meritato, fosse dietro l'angolo. Ma non lo si può neppure escludere. Oggi si sa che la sua massa deve essere maggiore di $113 \text{ GeV}/c^2$ e, se il MS è corretto, inferiore a $200 \text{ GeV}/c^2$.

ASPETTI STORICI E SOCIOLOGICI

Negli ultimi 50 anni vi sono stati dei grandi cambiamenti nell'organizzazione e nella struttura degli esperimenti nel campo della fisica delle particelle elementari. Negli anni '50 e '60 gli esperimenti avevano dimensioni modeste ed erano condotti da piccoli gruppi di fisici e tecnici di una singola Università; il gruppo era tipicamente costituito da un professore ordinario, da un assistente, forse da un ricercatore di un Ente di Ricerca, da qualche studente e da un tecnico. L'entrata in funzione di

acceleratori sempre più potenti localizzati in laboratori regionali o internazionali portò alla costruzione di esperimenti sempre più grandi e complessi. Negli anni '60 gli esperimenti effettuati con camere a bolle iniziarono ad essere formati da collaborazioni di alcuni gruppi di ricercatori provenienti da varie Università e Laboratori di nazioni diverse. Negli anni '70 anche gli esperimenti condotti con tecniche elettroniche divennero più grandi e più complessi, con la tendenza a studiare contemporaneamente processi fisici diversi, utilizzando rivelatori che coprivano una buona parte dell'angolo solido. Gli esperimenti al LEP richiesero un ulteriore passo in avanti: ciascuno dei quattro esperimenti voleva (e doveva, per risultare competitivo) essere il più completo e versatile possibile per sfruttare al massimo le potenzialità di fisica offerte da una macchina come il LEP. Il progetto e la costruzione di tanti componenti specializzati (sottorivelatori) ciascuno dedicato a uno scopo ben preciso, come i rivelatori di tracce e di vertici, i calorimetri, i rivelatori di muoni ecc., da inglobare nel modo più efficace in un unico rivelatore di grande accettazione, richiedeva una collaborazione di tipo nuovo. Decine di gruppi di fisici ed ingegneri geograficamente dislocati in molte nazioni diverse e con uno spiccato senso dell'autonomia, avrebbero dovuto autocordinarsi per far sì che il risultato del loro lavoro distribuito potesse, alla fine, integrarsi perfettamente nel luogo e nei tempi convenuti.

Il cambiamento della sociologia degli esperimenti di fisica delle particelle elementari è stato analizzato e seguito da molti comitati internazionali, come il comitato ECFA (Comitato Europeo per i Futuri Acceleratori) e ICFA (Comitato Internazionale per i Futuri Acceleratori) [9-12]

Nel seguito discuteremo alcuni aspetti storici, sociologici o semplicemente curiosi, legati alle varie fasi degli esperimenti al LEP: i *workshops* preliminari, il progetto, l'approvazione, la costruzione, la presa dati, le analisi fisiche, la fine degli esperimenti.

I *workshops* preliminari. L'approvazione degli esperimenti. La costruzione del LEP è stata approvata nel 1981. Prima e dopo l'approvazione numerosi *workshops* furono tenuti al CERN

e in differenti nazioni europee. Di particolare importanza fu il *workshop* a Villars, in Svizzera, nel 1981. Subito dopo questo *workshop* iniziarono a formarsi varie collaborazioni che discussero e prepararono le Lettere di Intenzioni, presentate nel 1982 al CERN per essere analizzate da un apposito comitato, il LEPC. Gruppi sempre più numerosi di fisici prepararono le proposte di esperimento, le esposero al LEPC, che, dopo lunghe discussioni e riunioni, ne approvò quattro. A questo punto ogni gruppo dovette provvedere a richiedere finanziamenti alle proprie Istituzioni Nazionali (per l'Italia l'INFN). Nel 1983 iniziò la costruzione del LEP ed anche la costruzione e test di alcuni sottorivelatori di ciascun esperimento.

Questa fase fu particolarmente vivace: ciascun fisico trovò un suo ruolo o ebbe l'opportunità di presentare proposte e risultati di test sia nell'ambito delle collaborazioni che all'esterno, nei numerosi *workshops* e nelle riunioni di vari *working groups* e comitati. La visibilità dei fisici degli esperimenti al LEP era evidente in tutti i *workshops* e negli atti preliminari delle collaborazioni.

La costruzione degli esperimenti. I quattro esperimenti approvati richiesero la costruzione di rivelatori "*omnipurpose*", con molti sottorivelatori a simmetria cilindrica organizzati in una sorta di strati coassiali. I rivelatori ALEPH e OPAL si distinguevano per l'eccellente risoluzione in impulso permessa dalle grandi camere di tracciamento. DELPHI si distingueva per la capacità di identificazione della natura delle particelle, mentre L3 per l'eccellente risoluzione in energia dei fotoni. In ogni esperimento il compito di progettare, costruire e collaudare un sottorivelatore era responsabilità di uno o più gruppi di fisici, ingegneri e tecnici che, nella maggior parte dei casi, svolgeva il proprio compito presso il proprio istituto o laboratorio. Il lavoro finito veniva poi portato al CERN per essere integrato con quello degli altri collaboratori. Questo modo di procedere, all'apparenza molto dispersivo, è risultato efficiente e tutta la costruzione è stata portata a termine nei tempi previsti.

I gruppi italiani diedero un contributo determinante alla costruzione dei rivelatori al LEP. Per esempio i calorimetri adronici furono in gran parte costruiti e

mantenuti in funzione da fisici e tecnici italiani. Tre dei quattro calorimetri utilizzavano una tecnologia di rivelazione sviluppata in Italia, i tubi a streamer limitato o tubi di Iarocci. Questi furono in gran parte costruiti dai rispettivi gruppi responsabili presso i Laboratori Nazionali dell'INFN a Frascati, avvalendosi di una apposita facility locale denominata, folkloristicamente, "il tubificio". Questo nome si affermò nell'ambiente come una sorta di nome ufficiale, e non era raro trovarlo scritto su pubblicazioni scientifiche o sentirlo nelle conferenze specialistiche, magari pronunciato in un improbabile italiano da colleghi stranieri. Anche in questo periodo ci furono, sia all'interno che all'esterno delle singole collaborazioni, dibattiti scientifici e tecnici interessanti e a volte curiosi, quali per esempio quello sulla opportunità di trattare o meno con un olio particolare (il BREOX), indicato come "olio magico" o "olio santo", la copertura di grafite dei catodi dei tubi. Le alte tensioni applicate li rendevano infatti suscettibili a fenomeni di scarica, e sarebbe stato conveniente migliorarne la stabilità dal punto di vista elettrico. Ogni gruppo si comportò in modo diverso. ALEPH preferì adottare una miscela di gas diversa da quella standard per "lavorare" ad una tensione inferiore. DELPHI, all'interno del quale originariamente l'idea dell'olio era stata proposta, preferì effettuare un "*polishing*" dei catodi senza "ungerli". OPAL, dopo aver effettuato ulteriori test, lo adottò.

Gran parte della responsabilità del progetto e della realizzazione dei rivelatori di vertice è stata italiana, così come importante è stato il contributo dato nella costruzione degli apparati adibiti alla misura di precisione della luminosità del collisionatore (i cosiddetti luminometri). Ricordiamo che la luminosità è un parametro fondamentale per un acceleratore perché è legato alla frequenza di collisione: più alta è la luminosità, maggiore è la frequenza di collisione fra elettroni e positroni.

In alcune indagini del comitato ECFA veniva chiesto ai fisici partecipanti alla fase di costruzione, se tale fase sembrasse interessante. Molti risposero positivamente: i fisici che si occupavano di rivelatori la consideravano molto interessante perché potevano sviluppare e costruire vari tipi di rivelatori avanzati. La

maggioranza dei giovani mostrava entusiasmo, ma si preoccupava per l'assenza di risultati e di pubblicazioni a carattere scientifico per un lungo periodo. Altri consideravano la fase di costruzione troppo lunga in relazione alla durata del *PhD*. Fu proprio durante questa fase che in Italia fu istituito il dottorato di ricerca, il che comportò inizialmente nuovi problemi in varie sedi.

Struttura organizzativa delle quattro collaborazioni. Fin dalle prime fasi fu evidente ad ognuna delle quattro collaborazioni che per portare a buon fine un progetto tecnico-scientifico così complesso sarebbe stata necessaria una non semplice struttura gerarchico-organizzativa. Queste strutture, che assunsero la loro forma finale solo dopo alcuni anni, erano abbastanza simili nelle loro caratteristiche generali. Era previsto innanzitutto un organo decisionale scientifico (*Collaboration Board* o simile) composto da un rappresentante di ogni Istituzione partecipante all'esperimento, presieduto dal portaparola (*spokesperson*) della collaborazione. Questa sorta di parlamentino era coadiuvata da un comitato esecutivo (*steering committee*), formato da un numero ristretto di esperti con potere sulle decisioni tecniche, e da un comitato delle finanze.

Ciascuno dei progetti nei quali era suddiviso l'apparato sperimentale, tipicamente un sottorivelatore con funzioni specifiche (calorimetri, rivelatori di muoni, camere centrali ecc.) o una componente omogenea dell'esperimento (sistema di trigger, acquisizione dati, *software* di ricostruzione ecc.), aveva un responsabile (*project leader*) che nei vari anni ha coordinato l'attività degli svariati ricercatori, tecnici e studenti nelle fasi di progettazione, di costruzione e, infine, di mantenimento del sistema. Analogamente, le numerose attività di analisi dei dati che si svolgevano, e tutt'ora si svolgono, in parallelo, erano raggruppate in settori di fisica omogenei (*working groups*) e coordinati da uno o due "conveners". Infine, uno o due coordinatori di fisica avevano il compito di supervisionare le attività dei *working groups* e di fungere da intermediari ufficiali della collaborazione per le questioni relative alle analisi.

Ogni collaborazione, oltre a numerosi meetings specifici, organizzava tipicamente quattro riunioni plenarie

all'anno della durata di una settimana. Queste riunioni rappresentavano momenti di grande intensità, sia dal punto di vista scientifico che sociale, nei quali molti dei partecipanti all'esperimento avevano la possibilità di trovarsi riuniti nello stesso luogo per discutere l'andamento del progetto tecnico-organizzativo, lo stato di avanzamento dei lavori di analisi fisica, la politica scientifica dell'esperimento, ecc.

I primi risultati di fisica. Nella notte fra il 13 ed il 14 agosto del 1989, il LEP accelerò positroni ed elettroni all'energia di circa 45 GeV e produsse le prime collisioni nelle zone sperimentali in quello che fu chiamato il "pilot run". Ci fu subito una forte competizione fra i quattro esperimenti, tutti operativi, per rivelare il primo evento di LEP. Fu OPAL a vederlo, ma nel giro di poche ore tutti gli esperimenti ne videro almeno uno. La forma della risonanza Z^0 fu misurata con una precisione considerevole già nei due mesi successivi, e questo permise agli esperimenti di pubblicare subito il primo risultato rilevante: esistono tre e solo tre tipi di neutrini. Contemporaneamente, l'assenza di osservazione dell'ipotetico *quark top* stava ad indicare che questo doveva avere una massa insolitamente alta, maggiore di $44.5 \text{ GeV}/c^2$, limite cinematico per la sua produzione in coppia.

Il numero di giovani fisici al CERN aumentò considerevolmente, e tutti lavoravano instancabilmente con grande passione ed interesse. Questo periodo è ricordato da tutti come uno dei migliori del LEP.

Il LEP e le misure di precisione. Col progredire della precisione sulla misura della massa della Z^0 , dovuto soprattutto al costante aumento della luminosità, si verificarono alcuni fatti curiosi. Uno dei quattro esperimenti otteneva un valore della massa significativamente diverso da quello ottenuto dagli altri. La convinzione da parte dei fisici di quell'esperimento di aver considerato tutte le sorgenti di errore sistematico legate al proprio apparato, portò alla conclusione che l'effetto dovesse essere legato ad una imperfetta conoscenza dell'energia dei fasci di elettroni e positroni nell'acceleratore in corrispondenza di quella particolare zona sperimentale. Questa possibilità era stata esclusa dai tecnici di LEP, ma una analisi più rigorosa rivelò un piccolo effetto

dovuto al sistema di radiofrequenze delle cavità acceleratrici che poteva influenzare localmente l'energia dei fasci. L'entità dell'effetto era di qualche parte su diecimila, ma la correzione da applicare fu sufficiente per far sì che la misura della massa della Z^0 risultasse in accordo col valore ottenuto dagli altri esperimenti. Ci si rese quindi conto che anche i dettagli apparentemente più insignificanti dovevano essere valutati con grande cura.

Nel frattempo era stato osservato un nuovo effetto: il valore della massa della Z^0 ottenuto dai quattro esperimenti variava leggermente se misurato su brevi intervalli di tempo. Destò una certa meraviglia l'apprendere che l'effetto era dovuto alle forze di marea le quali, deformando di qualche centimetro le dimensioni del tunnel di LEP e di conseguenza del suo sistema di magneti, influenzavano il valore dell'energia dei fasci. Fu adottato un metodo di misura più sofisticato e si riuscì a mostrare inequivocabilmente la correlazione fra quest'ultima e le maree!

Ultima in ordine di tempo, l'osservazione di un misterioso "disturbo" sempre sul valore dell'energia dei fasci che si presentava, per brevissimi periodi, durante il giorno ma non di notte. Fu così scoperto il "TGV effect", cioè l'effetto prodotto dal passaggio dei treni francesi (TGV) che durante il giorno collegano Ginevra con Lione e Parigi. Una parte della corrente elettrica persa attraverso i binari sul terreno circostante ritornava alla stazione di potenza del sistema attraverso il tunnel di LEP, sfruttando l'ottima conducibilità elettrica del tubo a vuoto dell'acceleratore. Il flusso di corrente agiva sul campo magnetico dei dipoli e di conseguenza sull'energia dei fasci.

Ci volle molto tempo, ma alla fine tutti questi effetti vennero valutati accuratamente. Questo permise di migliorare la calibrazione energetica di LEP ad un punto tale che l'incertezza sul valore della massa della Z^0 poté essere ridotta di un fattore 10 rispetto a quanto previsto nel progetto originale.

Miglioramenti tecnici nei rivelatori.

Durante i primi anni di presa dati ci si rese conto che si potevano ottenere risultati più precisi e aprire nuove possibilità sperimentali con l'aggiunta di alcuni sottorivelatori particolari.

ALEPH fu il primo dei quattro esperimenti a dotarsi di un rivelatore di "vertice" utilizzando rivelatori a stato solido: divenne così possibile rivelare il vertice primario d'interazione e quelli secondari di decadimento con una precisione di una decina di micron. Questo permise lo studio di eventi nei quali si producevano adroni con *quark* b, adroni che hanno vite medie molto brevi, corrispondenti a distanze percorse fra produzione e decadimento di alcuni millimetri. Si aprì così un filone di studi, quello dei "sapori pesanti", che ha dato risultati molto importanti. La stessa cosa avvenne per il leptone τ .

Ci si accorse anche che le incertezze nelle misure assolute di sezioni d'urto potevano essere fortemente ridotte se si fossero misurate con maggior precisione e fino ad angoli più piccoli le collisioni elastiche positrone-elettrone (*Bhabha scattering*) per diminuire l'errore sperimentale sulla misura della luminosità. Questo divenne possibile con la costruzione dei "luminometri", utilizzando la tecnologia dei rivelatori a silicio, con i quali divenne possibile misurare la luminosità del collisionatore con una precisione inferiore a 0.1 %. Il miglioramento fu tale che l'errore sulla misura della luminosità divenne dominato da incertezze di origine teorica. Fu quindi necessario calcolare con maggior precisione le correzioni radiative allo scattering Bhabha: nacque così un profondo collegamento fra fisici sperimentali e fisici teorici, collegamento che permane tuttora.

Anche per la costruzione del miglior luminometro si gareggiò. Forse è solo un caso, ma DELPHI fece costruire la parte meccanica del proprio apparato a Maranello!

Importanti visite agli esperimenti al LEP. Dal 1989 al 2000, il LEP e i quattro esperimenti sono stati visitati da un numero impressionante di visitatori importanti, provenienti da tutte le parti del mondo. Anche le diverse migliaia di studenti delle scuole medie superiori che ogni anno visitano i laboratori del CERN

venivano quasi sempre inviate ai pozzi del LEP. Gli studenti provenivano da tutte le nazioni europee, e in particolare dall'Italia [circa la metà dei visitatori]. Gli esperimenti al LEP, le nuove tecnologie e i risultati fisici sono stati spesso citati dalla stampa e anche nel *web* (vedi per es. le "Physics Pictures of the week" che mostrano "classic images from the world of particle physics featuring discoveries, people, experiments or images that are simply too good to look at").

I contributi italiani. I contributi italiani sono stati molto importanti in tutte le fasi dei quattro esperimenti al LEP: nella costruzione, nelle analisi fisiche e negli organi di governo degli esperimenti (6 fisici italiani sono stati o sono ancora *spokesperson* degli esperimenti). Anche il contributo finanziario è stato rilevante.

Il ruolo dei fisici teorici italiani non è stato da meno: hanno contribuito in modo determinante ai calcoli delle correzioni radiative necessarie per le misure di precisione ed hanno esteso la collaborazione a quasi tutti i campi di ricerca del LEP.

La collaborazione tra fisici sperimentali e teorici è stata fin dall'inizio cordiale e fruttuosa; assieme hanno inoltre organizzato ogni anno un convegno nazionale sulla fisica al LEP, molto seguito ed apprezzato.

Da LEP1 a LEP2. Dall'agosto 1989 sino alla metà del 1995 il LEP ha operato ad energie vicine al picco della risonanza Z^0 . La luminosità del LEP aumentò con regolarità, e tutti i campi di ricerca beneficiarono considerevolmente dell'aumento di statistica. Ancora oggi ora escono pubblicazioni relative alla grande quantità di dati raccolti in quella fase.

Dal 1994 tutti gli esperimenti iniziarono ad apportare una serie di migliorie ad alcuni sottorivelatori per prepararsi alla fase di LEP2. Una di queste, effettuata da tutti gli esperimenti, fu la progettazione e implementazione di rivelatori di microvertice più lunghi e più precisi, in vista di nuove ricerche del bosone di Higgs e di nuovi studi sulla fisica del *quark* b e del leptone τ .

Il LEP2 permise di effettuare misure ad energie nel centro di massa da 130 a 209 GeV con l'acceleratore che migliorò

ulteriormente in affidabilità e in luminosità. Ciò permise di effettuare misure di precisione anche per i bosoni W^+W^- , di dimostrare l'esistenza del vertice bosonico triplo $Z^0 W^+W^-$ e di estendere le ricerche di nuove particelle sino alle più alte energie del LEP.

Il calcolo scientifico. Il calcolo scientifico riguardava il calcolo on-line, la ricostruzione degli eventi, simulazioni Monte Carlo e analisi fisiche.

Il calcolo on-line veniva fatto principalmente con *clusters* di *Vax-stations*; vi sono stati molti cambiamenti, ma non così tanti come per il calcolo *off-line*, perché è più difficile fare cambiamenti nell'*on-line* su esperimenti che stanno prendendo dati.

Il calcolo *off-line* ha avuto cambiamenti molto radicali, seguendo i veloci progressi degli elaboratori. Nel 1983 la maggior parte delle simulazioni *off-line* erano fatte su "grandi calcolatori" del tipo IBM 370/168 (che chiameremo "una unità"); questi calcolatori si trovavano in grandi centri di calcolo. Nel 1983 il CERN dichiarò di contribuire al calcolo di ciascun esperimento con due unità; nel 1985 tale numero salì a tre unità. Nel 2001 ciascun esperimento disponeva di circa 1000 unità equivalenti! Questo drastico cambiamento avvenne in "steps": i grandi calcolatori furono sostituiti da *clusters* di *Workstations* (Vax-VMS, HP-unix, Silicon Graphics) e negli ultimi tempi si è passati a *clusters* di PC sotto Linux.

Durante lo stesso periodo i grossi nastri magnetici furono sostituiti da cartucce magnetiche sempre più piccole e molto più capienti, fino ad arrivare al Terabyte con dischi rigidi!

In questo periodo il sistema di reti fra calcolatori si potenziò enormemente e il CERN fece la sua più grande invenzione: WWW, il *World-Wide-Web*.

"Produttività scientifica". Dall'inizio del LEP sono stati pubblicati circa 1100 lavori su riviste scientifiche internazionali con referees; i lavori riguardano circa 1750 autori. La figura 5 mostra l'evoluzione temporale del numero integrato di pubblicazioni da parte delle quattro collaborazioni.

Figura 5. Il numero integrato di pubblicazioni scientifiche da parte di ogni collaborazione al LEP nel periodo 1989-2002.

FIGURA 5

La Tabella 1 mostra il numero medio di autori per pubblicazione ed il rapporto $\langle R \rangle = (\text{numero di pubblicazioni} / \text{numero di autori})$ per grandi esperimenti effettuati a diversi collisionatori. E' difficile fare un confronto diretto tra i diversi esperimenti e tra esperimenti a collisionatori diversi; inoltre il rapporto non tiene conto della qualità delle pubblicazioni, né di scoperte particolarmente importanti. Ad ogni modo

si può dire che gli esperimenti al LEP si difendono bene. E' da notare come il rapporto $\langle R \rangle$ sia in generale sensibilmente inferiore a 1. E' molto difficile raggiungere una pubblicazione per autore. Ed è molto difficile spiegare ai colleghi di altri campi della fisica il perché di tanti autori per pubblicazione e il perché di un così basso numero di pubblicazioni se riferito al numero di autori!

Tabella 1. Varie collaborazioni in fisica delle alte energie, il numero medio approssimato degli autori ed il rapporto $\langle R \rangle = \text{numero di pubblicazioni scientifiche} / \text{numero di autori}$, vedi testo. I valori si riferiscono alla produzione scientifica fino al 2000.

| Collaborazione | Numero medio di autori | $\langle R \rangle$ |
|----------------|------------------------|---------------------|
| LEP | 330 – 550 | 0.5 – 1 |
| CDF - D0 | 400 – 470 | 0.3 - 0.5 |
| H1 – ZEUS | 420 – 460 | 0.23 |
| UA1 – UA2 | 65 – 150 | 0.33 |

“Visibilità” dei giovani ricercatori. Per giovani ricercatori (e anche per professori associati) è molto importante che l'attività di ricerca venga propriamente riconosciuta e che essi abbiano una certa “visibilità” sia all'interno che all'esterno della collaborazione. Si potrebbe pensare che ciò sia difficile in grandi collaborazioni con centinaia di fisici. A causa della grande frammentazione di responsabilità, sia nella costruzione e mantenimento degli apparati sia nelle fasi di analisi, ogni ricercatore può invece trovare un proprio ruolo. All'interno di ogni collaborazione vi sono state e vi sono regolari presentazioni nei *working groups* e nelle riunioni plenarie; vi è inoltre la possibilità di scrivere note interne (con e senza referees) firmate da pochi autori.

ricercatori riesce a trovare un proprio ruolo e la propria visibilità. Sembra che questo sia invece un po' più difficile per ricercatori al livello di professori associati.

Per la visibilità all'esterno di una collaborazione vi sono molte conferenze, *workshop*, scuole estive e invernali, dove possono essere presentati risultati tecnici e di analisi fisiche (in realtà nella seconda fase di ogni esperimento sono avvantaggiati i ricercatori che svolgono analisi fisiche).

Le indagini effettuate dall'ECFA indicano che la maggior parte dei giovani

Il Comitato LEPC. Il Comitato per gli Esperimenti al LEP fu formato subito dopo l'approvazione del LEP e ha giocato un ruolo molto importante in tutte le fasi degli esperimenti: nell'approvazione, durante la costruzione, nei miglioramenti tecnici, nelle relazioni con gli esperti del collisionatore, durante le analisi fisiche. Il comitato terminò bruscamente la sua attività alla fine del 2000, dopo che i suoi membri, interpellati dal Direttore Generale per avere un parere sull'opportunità di proseguire o meno col LEP un altro anno sulla base di una richiesta congiunta delle quattro collaborazioni, non riuscirono a trovare un accordo: fu una fine gloriosa? Investigò in modo completo la possibilità di acquistare al momento opportuno tutte le radiofrequenze superconduttrici necessarie per portare l'energia del LEP al valore massimo possibile? Perché nella sua

ultima riunione del 2000 incluse discussioni su LHC? Si farà un'ultima riunione formale nel prossimo anno?

Come già detto gli esperimenti al LEP diedero un'importante stima della massa del bosone di Higgs tramite misure di precisione ad energie al di sotto della soglia; oltre ad un limite inferiore diretto hanno dato una possibile indicazione di segnale alle massime energie utilizzate. Vale la pena ricordare che sin dall'inizio della sperimentazione i quattro esperimenti fecero a gara per ricercare il bosone di Higgs in modo indipendente; ma alla fine, analogamente a quanto fatto per le misure elettrodeboli, cercarono di combinare tutti i dati per ottenere la massima significatività. Questo cambiamento di strategia è ben mostrato nella figura 6. Abbiamo raggiunto un risultato credibile? Su ciò si discute ancora.

Figura 6. La ricerca del bosone di Higgs al LEP (cortesia di G. Forconi, L3).

FIGURA 6

I segretariati dei quattro esperimenti. Ogni esperimento aveva al CERN un segretariato efficientissimo, che provvedeva a rispondere non solo a problemi scientifici e burocratici, ma che era pronto a risolvere in ogni momento anche i problemi pratici più disparati, generati spesso dalle dimenticanze o "sviste" tipiche dei fisici. Gli ultimi arrivati trovavano nei segretariati un aiuto ed una fonte di informazioni aggiornate insostituibili per risolvere i classici problemi legati alla ricerca di alloggio, alle dogane, alla lingua francese e all'inserimento nella comunità locale, scientifica e non.

Prima dell'avvento massiccio del web i segretariati, con i loro archivi cartacei ben organizzati, costituivano la "memoria storica" dell'esperimento ed il luogo per eccellenza nel quale trovare le informazioni che interessavano i ricercatori: pubblicazioni, rapporti interni, fotocopie dei lucidi di presentazioni a conferenze o a meetings di gruppo, ecc. Una parte del merito della riuscita di LEP va quindi anche a questo personale, ed abbiamo l'impressione che il coinvolgimento nello spirito di gruppo fosse tale da generare una sorta di competizione anche fra segretariati, al fine

di offrire al proprio esperimento il supporto migliore.

Lo sport. I quattro esperimenti parteciparono attivamente e con grande entusiasmo anche alla vita sportiva del CERN. Uno degli appuntamenti più sentiti è probabilmente rappresentato dalla gara a staffetta, fra squadre composte da sei podisti, che annualmente si danno battaglia lungo i quasi 4 km di percorso per le vie del Laboratorio. Le squadre devono avere una affinità (tutti corridori della stessa divisione, o dello stesso esperimento, o Università, ecc.) ed ogni esperimento LEP poteva permettersi di avere staffette più o meno in tutte le categorie (*senior*, veterani, *dame*, *open*). Una partecipazione massiccia (tipicamente una cinquantina di squadre) ed un pubblico numeroso e simpatico, hanno sempre reso questa competizione un evento atteso. Durante questo periodo lo spirito sportivo e quello di gruppo hanno raggiunto il loro livello massimo: i corridori, sostenuti lungo tutto il percorso da un tifo quasi calcistico, davano il massimo ed erano contenti anche quando vincevano la "*random cup*" (estratta a sorte fra tutte le squadre partecipanti) o il premio riservato alla squadra arrivata ultima! Una provvidenziale ambulanza

del *Medical Service* del CERN seguiva le staffette, ed aveva il suo da fare a raccogliere "atleti" motivati, ma un po' fuori forma.

Il campionato di calcio interno al CERN costituiva un altro appuntamento importante. La differenza tecnica fra le varie squadre a volte era abissale. Come nei campionati dal 1989 al 1994, con la squadra di DELPHI quasi sempre prima e quella di OPAL quasi sempre ultima. La potenza del Direttore Generale (DG) del CERN fu osservata sperimentalmente quando, per reclutare nuovi giovani calciatori, apparve il seguente messaggio nelle news dell'esperimento: "*Subject: Important message from the DG to OPAL*". Ogni membro della collaborazione aprì il messaggio, trovando che DG indicava un fantomatico "Direttore dei Goals"; ma neppure questo DG fu in grado di risollevarne le sorti della squadra. Forse si trattava di una compensazione al fatto che le staffette di OPAL erano fra le più agguerrite, come dimostrarono in particolare nel 2000, anno in cui si aggiudicarono la coppa in tutte le categorie, inclusa la "*random cup*"!

Le relazioni amorose (*Love affairs*). In una collaborazione scientifica con molti giovani ricercatori/ricercatrici è naturale aspettarsi dei "*love affairs*" tra i collaboratori. Ogni esperimento ebbe "molti eventi" di questo tipo, ma ve ne furono anche parecchi tra membri di esperimenti "avversari". La sociologia amorosa seguì i rapidi cambiamenti nelle relazioni tra i sessi che avvennero nei circa 20 anni di durata delle collaborazioni LEP. Agli inizi degli anni '80 la parola fidanzato/a era un termine normale molto usato, mentre più tardi quasi scomparve e fu sostituita da nuovi termini come partner, boyfriend/girlfriend, amico, amica e altri. Vi furono parecchie "nuove esperienze", molti cambiamenti di rotta, incontri, nuovi incontri, molte convivenze, pochissimi matrimoni e pochissimi bimbi.

All'inizio del nuovo millennio sono state rivelate "tracce" di nuovi cambiamenti, con un piccolo incremento nel numero di matrimoni e nel numero di "bimbi prodotti". Ma la "produzione" resta apparentemente ancora troppo limitata per poter minimamente competere con quella nei Paesi in via di Sviluppo!

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

Dalla nostra esperienza personale e sulla base dei risultati ottenuti dall'indagine dell'ECFA, ci sembra di poter affermare che la maggior parte dei fisici che hanno partecipato ad uno dei quattro esperimenti al LEP abbia considerato "l'esperienza" molto positiva sotto tutti gli aspetti. Ciò è stato particolarmente vero nelle fasi in cui venivano ottenuti i risultati fisici più importanti, che possiamo di nuovo riassumere come segue: le tre famiglie di neutrini; le misure effettuate con precisione crescente dei parametri elettrodeboli, che hanno permesso anche la determinazione sotto soglia della massa del *quark top*, e di alcuni parametri dell'interazione forte; il "*running*" della costante di accoppiamento forte; le misure precise nel campo dei "sapori pesanti"; l'osservazione diretta del triplo vertice bosonico; i limiti inferiori sempre migliori sul valore della massa del bosone di Higgs e su quello della massa di nuove particelle non contemplate all'interno del Modello Standard; possibili indicazioni della massa del bosone di Higgs.

Al di là del successo scientifico di LEP, non è azzardato supporre che è stato probabilmente grazie al successo tecnico-organizzativo di questo progetto che una nuova avventura scientifica, ancora più impegnativa da questo punto di vista, è stata intrapresa al CERN. Al futuro collisionatore LHC (*Large Hadron Collider*), infatti, ciascuna delle quattro collaborazioni che prepara un esperimento è costituita da centinaia di gruppi per un totale di 1500-2000 fisici, interconnessi in una complessa organizzazione a carattere mondiale.

Ricordiamo inoltre che i dati raccolti dagli esperimenti sono stati la base per un gran numero di tesi di Diploma, di Laurea, di Perfezionamento e di Dottorato e che la grande maggioranza di queste tesi è di ottima qualità. Infine i risultati ottenuti al LEP sono anche stati la base di un'intensa attività di divulgazione scientifica.

Ma tutto ha un termine; nel caso del LEP ciò è stato ben indicato dai titoli delle *Physics Pictures of the Week* apparse sul web nel 2000: "*First events at LEP's final frontier*" (aprile 2000), "*DELPHI's end in*

sight" (maggio 2000), "LEP's final hour approaches" (agosto 2000).

E le prospettive future? E' chiaro che la ricerca del bosone di Higgs, della supersimmetria e di altre particelle e fenomeni al di là del Modello Standard proseguirà al collisionatore di Fermilab, al *Large Hadron Collider* LHC e, molto probabilmente, ad un futuro collisionatore lineare elettrone-positrone di altissima energia. Viene naturale pensare che nei nuovi esperimenti, molto più grandi di quelli al LEP e che coinvolgeranno collaborazioni a carattere mondiale ancora più numerose, i problemi ai quali si è accennato in questo lavoro si

BIBLIOGRAFIA

1. K. Hagiwara et al, The Review of Particle Physics, Phys. Rev. D66, 010001 (2002).
2. Proceedings of the 7th Topical Seminar on the Legacy of LEP and SLC, Siena 2001, Edited By F.-L. Navarria, M. Paganoni and P.G. Pelfer, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 109 B (2002).
3. Proceedings of LEPTRE, XIII Italian Workshop on LEP Physics, Edited by A. Baroncelli, E. Graziani, B. Mele and A. Passeri, Roma 18-20 Aprile 2001. ISBN 88-7438-002-X.
4. G. Giacomelli and B. Poli, Results from High Energy Accelerators, hep-ex/0202023.
5. The LEP Collaborations ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, the LEP Electroweak Working Group, and the SLD Heavy Flavour and Electroweak Groups, A Combination of Preliminary Electroweak Measurements and Constraints on the Standard Model, CERN-EP 2001-098.
6. The LEP Collaborations ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, Measurement of the mass of the Z^0 boson and the energy calibration of LEP, Phys. Lett. B 307 (1993) 187. CERN-PPE/93-53.
7. F. Abe, et al. (CDF collaboration), Phys. Rev. Lett. 74, 2626 (1995).
8. S. Abachi, et al. (DØ collaboration), Phys. Rev. Lett. 74, 2632 (1995).
9. The ECFA Report on Sociology of Large Experiments, ECFA/95/178 (1995).
10. U. Amaldi, "Considerazioni sulla sociologia delle grandi collaborazioni in fisica delle alte densità di energia", pag. 51; G. Goggi, "Le grandi collaborazioni internazionali", pag. 511; apparsi su "L'Italia al CERN", a cura di F. Menzinger, INFN (1995) – ISBN 88-86409-06-0.
11. G. Giacomelli, Historical and sociological aspects of the experiments at LEP; Proceedings of LEPTRE, XIII Italian Workshop on LEP Physics, Roma 3 (2001), Edited by A. Baroncelli, E. Graziani, B. Mele and A. Passeri, ISBN 88-7438-002-X.
12. L. Lederman, Una digressione sociologica: l'origine della "Big Science", in La particella di Dio, pag. 243, Mondadori (1993).

ripresenteranno amplificati e, sicuramente ne compariranno di nuovi. Ci piace però credere che il risultato positivo dell' "esperienza LEP" sia il miglior auspicio per le sfide del futuro.

RINGRAZIAMENTI

Desideriamo ringraziare i colleghi del LEP e delle collaborazioni ALEPH, DELPHI, L3 e OPAL, e ci scusiamo per tutte le omissioni, inevitabili in un breve rapporto di questo tipo. Ringraziamo la dott.ssa Anastasia Casoni per il suo aiuto nella preparazione del manoscritto.

FABRIZIO FABBRI

Primo ricercatore dell'INFN presso la sezione di Bologna. Svolge attività di ricerca sperimentale nel campo della fisica subnucleare con acceleratori. E' il responsabile nazionale dell'esperimento OPAL al LEP.

Contatti:

INFN e Dipartimento di Fisica dell'Università, V.le Berti Pichat 6/2, 40127 Bologna.
tel. 051-2095242 fax. 051-2095269 E-mail fabrizio.fabbri@bo.infn.it

GIORGIO GIACOMELLI

Professore Ordinario di Fisica Generale all'Università di Bologna. La sua attività scientifica riguarda la fisica delle interazioni fondamentali (sperimentale) effettuata con e senza acceleratori. E' collaboratore dell'INFN e del CERN.

Contatti:

Dipartimento di Fisica dell'Università, V.le Berti Pichat 6/2, 40127 Bologna.
tel. 051-2095233 fax. 051-2095269 E-mail giorgio.giacomelli@bo.infn.it