

LO SVILUPPO DELLA FISICA e^+e^- ED IL CONTRIBUTO DI FRASCATI

di Giorgio Capon

Lo studio delle collisioni elettrone-positrone è stato di fondamentale importanza nel determinare l'attuale quadro fenomenologico e teorico delle particelle elementari.

Oggi si ritiene che gli adroni cioè le particelle elementari soggette alle interazioni nucleari (dette anche forti), come il protone e il neutrone, nonché varie specie di mesoni, siano in realtà composte di subcostituenti, i quarks. Esistono tre famiglie di coppie di quarks: i quarks convenzionalmente denominati d, u (down, up); i quarks s, c (strano, charm); i quarks b, t (bottom, top).

I quarks hanno carica elettrica frazionaria ($-1/3$ per d, s, b e $+2/3$ per u, c, t; in unità di carica dell'elettrone). I protoni e neutroni che compongono la materia ordinaria sono costituiti da tre quarks, di tipo u oppure d; i mesoni da una coppia quark-antiquark (anche di tipo diverso). I mediatori delle forze forti tra i quarks sono i gluoni, così come il fotone è il mediatore delle forze elettromagnetiche tra particelle cariche. Non si possono produrre quarks isolati, liberi; ad elevate energie essi si manifestano come fiotti (jets) di adroni.

In corrispondenza alle tre famiglie di quarks esistono tre tipi di leptoni (particelle dotate di carica elettrica, non soggette a interazioni forti), ritenuti puntiformi cioè senza struttura interna: l'elettrone, il mesone μ e il leptone τ .

Oltre alle interazioni forti ed elettromagnetiche esistono anche le interazioni deboli, responsabili della radioattività β , dei decadimenti dei leptoni μ e τ e delle interazioni dei neutrini. I mediatori delle interazioni deboli sono i bosoni W^+ , W^- , Z^0 , particelle di spin 1, pesanti, di massa 80 - 90 GeV (in queste unità la massa del protone è circa 1 GeV).

I decadimenti dei mesoni dovuti alle interazioni deboli sono governati dalla cosiddetta matrice di mixing dei quarks (o matrice CKM dagli autori Cabibbo, Kobayashi, Maskawa) che descrive le transizioni tra quarks di diverso tipo (flavour).

Lo studio delle collisioni e^+e^- nell'arco di circa quattro decenni ha portato alla conferma del modello a quarks, alla scoperta del quark charm e a quella del leptone τ ; alla osservazione di jets di particelle dovuti alla frammentazione di

quarks e/o gluoni, ha consentito la verifica più esauriente delle previsioni della moderna teoria elettro-debole (Modello Standard); ha permesso di provare la validità dell'elettrodinamica quantistica (QED) fino a distanze dell'ordine di 10^{-16} cm.

A questo campo di fisica i ricercatori e il gruppo macchina dei Laboratori di Frascati (LNF) hanno dato sin dall'inizio un contributo di tutto rilievo sia con le realizzazioni in sito sia partecipando a collaborazioni internazionali presso laboratori esteri.

Gli esperimenti di fisica delle particelle elementari sfruttarono all'inizio sorgenti naturali come i raggi cosmici o sostanze radioattive. Negli anni '30 si sviluppano le prime macchine acceleratrici che hanno il merito di fornire fasci di particelle intensi, collimati e monoenergetici da inviare su bersaglio fisso per studiare le interazioni tra particella fascio e particella bersaglio oppure la produzione di nuove particelle.

Successivamente si considerò la possibilità di studiare direttamente le collisioni tra due fasci [1]; queste hanno il vantaggio che a parità di energia del fascio la collisione di due fasci comporta una energia (nel centro di massa) molto maggiore che nel caso convenzionale di collisione su un bersaglio fisso. Ad energie elevate rispetto le masse delle particelle il guadagno è $\sqrt{(2E/m)}$ (E energia delle particelle del fascio, m massa particella bersaglio). D'altra parte - essendo la densità di particelle in un fascio in genere molto minore di quella di un bersaglio fisso - si perde invece nella frequenza delle collisioni.

Questa è proporzionale alla luminosità; il parametro fondamentale delle macchine e^+e^- . Infatti il numero di eventi prodotti per unità di tempo dN/dt per un dato processo è dato dal prodotto della sezione d'urto σ per la luminosità L : $dN/dt = L \sigma$

dove la sezione d'urto (l'analogo a livello subatomico della sezione trasversa della sfera nell'urto tra due palle di biliardo) è connessa alla probabilità di interazione.

La luminosità può essere calcolata in base alla frequenza di rivoluzione f dei fasci nell'anello, al numero di particelle N_1 , N_2 nei due fasci e alla

loro sezione trasversa S :

$$L = f N_1 N_2 / S$$

Il primo progetto (1959) di una macchina a due fasci fu quello degli anelli di Stanford - Princeton per studi di QED nelle collisioni elettrone-elettrone. In questa macchina - a forma di otto - i due fasci circolavano in due anelli separati, tangenti nella regione di interazione attorno alla quale vengono situati i rivelatori.

Bruno Touschek invece, propose nel 1960 di realizzare a Frascati un singolo anello per collisioni e^+e^- ; egli ebbe il merito di comprendere che collisioni di particelle di carica opposta - in virtù del processo di annichilazione - aprivano un campo di fisica molto più ricco ed inoltre che - per il principio di simmetria di carica - i due fasci potevano circolare (in senso inverso) ed essere accelerati nello stesso anello.

Nelle collisioni e^+e^- il processo dominante è l'annichilazione della coppia e^+e^- in un fotone virtuale, come mostrato in figura 1.

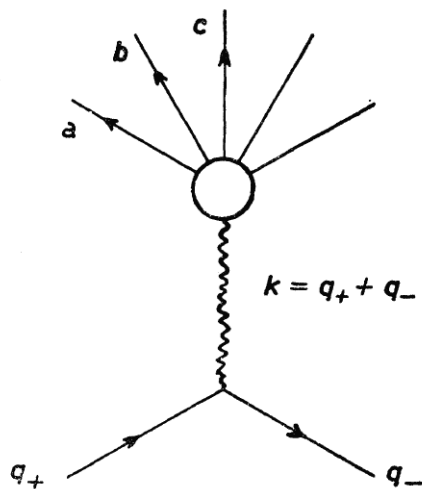


Fig. 1

Grafico rappresentante il processo di annichilazione e^+e^- in un fotone virtuale. q_+ , q_- , k sono rispettivamente i quadrimomenti del positrone, dell'elettrone e del fotone. a , b , c , rappresentano le particelle prodotte nello stato finale.

Di conseguenza lo stato finale ha numeri quantici J :spin (momento angolare intrinseco della particella), P :parità (riflessione delle coordinate spaziali), C :coniugazione di carica: $J^{PC}=1^{--}$, uguali a quelli del fotone. Ciò seleziona stati finali ben definiti e facilita di molto l'analisi dei dati.

Nella annichilazione e^+e^- può essere prodotta

anche una sola particella purché di massa pari all'energia totale dei fasci e con i suddetti numeri quantici $J^{PC}=1^{--}$. Ciò avviene per i mesoni vettoriali: ρ , ω , Φ ; di massa attorno 0.7-1 GeV e per le loro ricorrenze a masse più elevate.

La struttura di particelle non puntiformi - come i mesoni π , K oppure il protone - può essere studiata nei processi e^+e^- tramite la misura della loro produzione in coppie particella - anti-particella; più precisamente si misura il cosiddetto fattore di forma. Per un adrone h il fattore di forma può essere determinato in due regioni fisiche ben distinte: nei processi di annichilazione: $e^+e^- \rightarrow hh^-$ (time-like form factors) oppure nei processi di scattering di elettroni: $e^-h \rightarrow e^-h$ (space-like form factors).

I principali processi che consentono di studiare la validità dell'elettrodinamica quantistica (QED) sono $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$, $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$.

Nel 1961 Cabibbo e Gatto [2] pubblicarono una esauriente rassegna teorica dei processi misurabili a basse energie, in particolare ad Adone, questo lavoro è rimasto un riferimento fondamentale (la cosiddetta "Bibbia") per tutti i ricercatori del settore.

A seguito della proposta di Touschek si decise di usare il sincrotrone recentemente completato nei LNF per iniettare elettroni e positroni in un piccolo anello Ada (Anello Di Accumulazione) di energia 250 MeV per fascio e circa 1.5 metri di diametro. Il progetto venne approvato e rapidamente realizzato nell'arco di circa un anno; superando non trascurabili problemi tecnici come la necessità di un vuoto estremamente spinto nell'anello [3]. Le prime misure confermarono la validità del principio, mostrando che era possibile accumulare e mantenere i fasci circolanti per molte ore tra una iniezione e l'altra; le particelle accumulate in Ada erano visibili anche singolarmente ad occhio nudo tramite la luce da esse irradiata. Tuttavia esse ammontavano a solo poche centinaia in quanto l'intensità e la struttura temporale del fascio del sincrotrone non consentiva una efficiente iniezione.

Per poter dimostrare l'effettiva presenza di processi di interazione e^+e^- nel 1962 Ada fu trasportata ad Orsay dove un acceleratore lineare più potente permise di osservare il processo di bremsstrahlung singola $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma$. Ad Orsay fu anche osservato per la prima volta il cosiddetto effetto Touschek: l'interazione coulombiana tra elettroni (o positroni) all'interno dello stesso fascio (bunch) causa lo spostamento delle parti-

celle dall'orbita di riferimento con conseguente loro perdita e quindi diminuzione della vita media dei fasci.

Ada raggiunse una luminosità di circa $10^{25} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$; le macchine odierne ottengono valori dell'ordine di $10^{32} - 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$.

Il successo di Ada diede immediatamente luogo a progetti di macchine di maggiori dimensioni con un dedicato programma di fisica. Ad Orsay venne realizzato l'anello ACO di 500 MeV per fascio che studiò in dettaglio le proprietà dei mesoni vettori ρ , ω , Φ e pose le basi per la teoria della "Vector Meson Dominance" che descrive le interazioni del fotone considerandolo una opportuna sovrapposizione di mesoni vettori. A Novosibirsk per impulso di Budker fu costruito Vepp-2 di 750 MeV per fascio, la prima di una serie di macchine operanti nell'istituto ora a lui intitolato.

A Frascati, sotto la direzione di Ferdinando Amman, venne realizzato Adone: una macchina di energia 1500 MeV per fascio, di circa 16 m di raggio, con quattro zone di interazione per gli esperimenti. All'epoca Adone era una macchina di avanguardia; molti fisici stranieri vennero nei LNF sia per collaborare alla soluzione di vari problemi connessi alla dinamica e alla stabilità dei fasci sia per seguirne la messa a punto e i programmi di fisica. Tra questi anche Burt Richter direttore dell'esperimento Mark I all'anello Spear di Stanford (4 GeV per fascio, completato nel 1972).

Diverse università italiane concorsero alla realizzazione degli esperimenti: oltre a Roma anche Napoli, Bologna, Padova, Pavia. A fronte di apparati sperimentali più complessi e ambiziosi i gruppi sperimentali crebbero di consistenza (tipicamente una ventina di ricercatori), vennero impiegate nuove tecniche come le camere a fili e i primi sistemi di acquisizione dati su computer.

Una apposita commissione scientifica, la Commissione Adone, venne istituita per valutare e seguire la realizzazione degli esperimenti. Nel contempo il gruppo teorico dei LNF guidato da Touschek forniva guida e assistenza ai fisici sperimentali, con particolare riguardo alla stima delle correzioni radioattive. Adone cominciò a operare a fine 1969, gli esperimenti di prima generazione furono:

- $\mu\pi$ (studio della produzione di coppie $\mu^+\mu^-$ e di coppie $\pi^+\pi^-$),

- BCF (Bologna Cern Frascati: ricerca di un eventuale leptone pesante),
- bosone (ricerca di nuove risonanze e nuovi mesoni vettori)
- protone - anti protone (misura del fattore di forma)
- $\gamma\gamma$ (verifica della QED nella reazione $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$).

Le prime misure riguardarono la QED (produzione di coppie e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\gamma\gamma$) e i fattori di forma dei mesoni π e K . Furono cercati nuovi stati o risonanze; fu osservata nel canale $\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ una risonanza larga di massa circa 1.6 GeV: la ρ' , una ricorrenza del mesone vettore ρ (oggi misure più precise indicano la presenza di due risonanze $\rho(1450)$ e $\rho(1700)$ in questo intervallo di massa).

Ad Adone furono anche studiate per la prima volta le cosiddette interazioni $\gamma\gamma$: in queste reazioni l'elettrone e il positrone iniziali non si annichilano ma irradiano due fotoni che interagiscono dando luogo a uno stato finale con $C = +1$.

In particolare vennero osservati i processi $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$; $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \mu^+\mu^-$ (vedi figura 2) ed anche $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \pi^+\pi^-$.

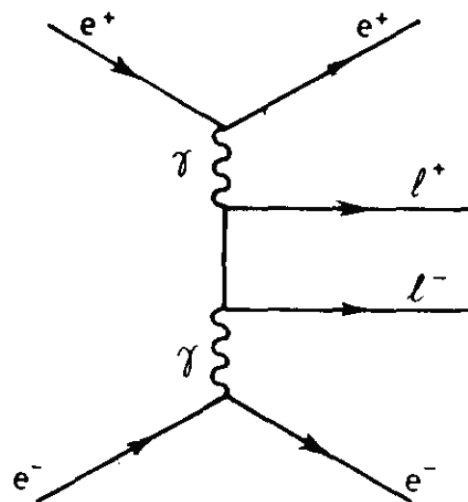


Fig. 2

Grafico rappresentante la produzione di una coppia di leptoni $l+l^-$ tramite la interazione $\gamma\gamma$.

Tuttavia il risultato più importante degli esperimenti di prima generazione fu la osservazione di una abbondante, impreveduta produzione di più (non solo coppie) mesoni π e K nello stesso evento.

Questo fenomeno (chiamato produzione multihadronica) costituiva una importante conferma

del modello a quarks originato dagli esperimenti di deep inelastic scattering elettrone-protone compiuti a Stanford. Questi mostravano come il protone fosse composto di oggetti "partoni" puntiformi, successivamente identificati con quarks di spin $\frac{1}{2}$. Infatti il rapporto R tra la sezione d'urto di produzione di adroni e quella di coppie μ era in accordo col valore previsto ($R=2$) secondo la nuova recente teoria, la Quantum Chromo Dynamics (QCD) che presupponeva un grado di libertà interno (convenzionalmente chiamato colore) dei quarks. Infatti secondo la QCD il rapporto R è dato da:

$$R \equiv \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{adroni})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = N_c \sum_i Q_i^2$$

dove $N_c = 3$ è il numero di colori e Q_i è la carica elettrica (in unità di carica dell'elettrone) del quark di flavour i ($i = u, d, s, c$). Alle energie di Adone solo i quarks leggeri u, d, s possono essere prodotti quindi si ottiene $R=2$.

Tutti gli esperimenti ad Adone contribuirono alla misura della produzione multiadronica [4, 5, 6, 7]; una combinazione dei loro risultati elaborata da Giorgio Salvini [8] è mostrata in figura 3.

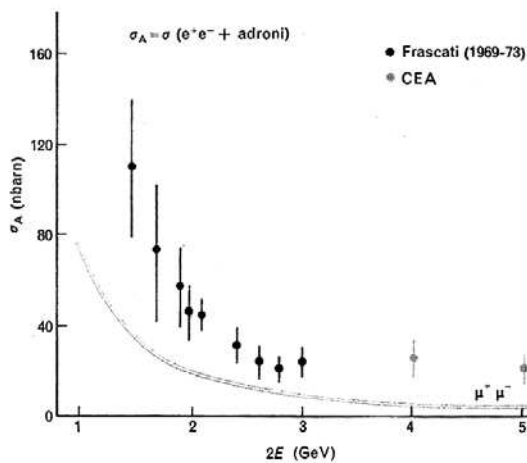


Fig. 3

Andamento della sezione d'urto per produzione multiadronica rispetto all'energia totale dei fasci e^+e^- . Sono riportate le misure fatte ad Adone e al CEA (Cambridge Electron Accelerator). La curva rappresenta la sezione d'urto per produzione di coppie $\mu^+\mu^-$.

Gli apparati di prima generazione ad Adone erano però inadeguati per una misura precisa della produzione multiadronica: sia per insufficiente copertura angolare, sia per incapacità di distinguere tra mesoni π e mesoni K .

Ciò indusse i ricercatori ad allestire una seconda generazione di esperimenti con apparati più adeguati e tecnologicamente più avanzati:

- $\gamma\gamma 2$;
- MEA (Magnete Esperienze Adone);
- Barione-antibarione.

Il MEA in particolare era l'unico apparato dotato di campo magnetico per la misura dell'impulso delle particelle cariche. In figura 4 è mostrato l'apparato $\gamma\gamma 2$: esso comprendeva camere a scintilla ottiche per le tracce di particelle cariche, convertitori di piombo per i fotoni e strati di ferro per i μ (sono le particelle più penetranti); scintillatori plastici fornivano segnali rapidi per il trigger che faceva scattare l'acquisizione dati e la fotografia delle tracce. Gli apparati di seconda generazione entrarono in funzione attorno al 1973 - 1974.

Pochi mesi dopo, nel novembre 1974, l'esperimento Mark I a Stanford e quello diretto da S. Ting a Brookhaven annunciarono contemporaneamente la scoperta di una nuova particella: la J/Ψ di massa ~ 3.1 GeV, del tutto inattesa e dalle proprietà particolari: la J/Ψ si presenta come un picco molto elevato e molto stretto nella sezione d'urto di produzione.

La massa della J/Ψ era di poco superiore alla massima energia nominale di Adone (3 GeV): non appena appresa la notizia (da Bellettini, il direttore dei LNF, che si trovava negli USA in quei giorni) si decise di tentare di innalzare l'energia di Adone fino al valore necessario per osservare la J/Ψ : l'operazione riuscì e in meno di due giorni anche gli esperimenti di Adone ottennero l'evidenza sperimentale della J/Ψ . I risultati di Adone vennero pubblicati (*) subito dopo quelli di Stanford e Brookhaven (per i quali Richter e Ting ottennero il premio Nobel) nella stessa rivista: Phys. Rev. Letters 33, number 23 (1974). L'editoriale della rivista è qui sotto riprodotto.

Poche settimane dopo, sempre a Stanford, venne osservata un'altra risonanza, la $\Psi'(3685)$, prima ricorrenza della J/Ψ : queste scoperte (la

* Nell'articolo sui risultati di Adone è specificato che la ricerca della J/Ψ avvenne a seguito delle informazioni ricevute dagli USA.

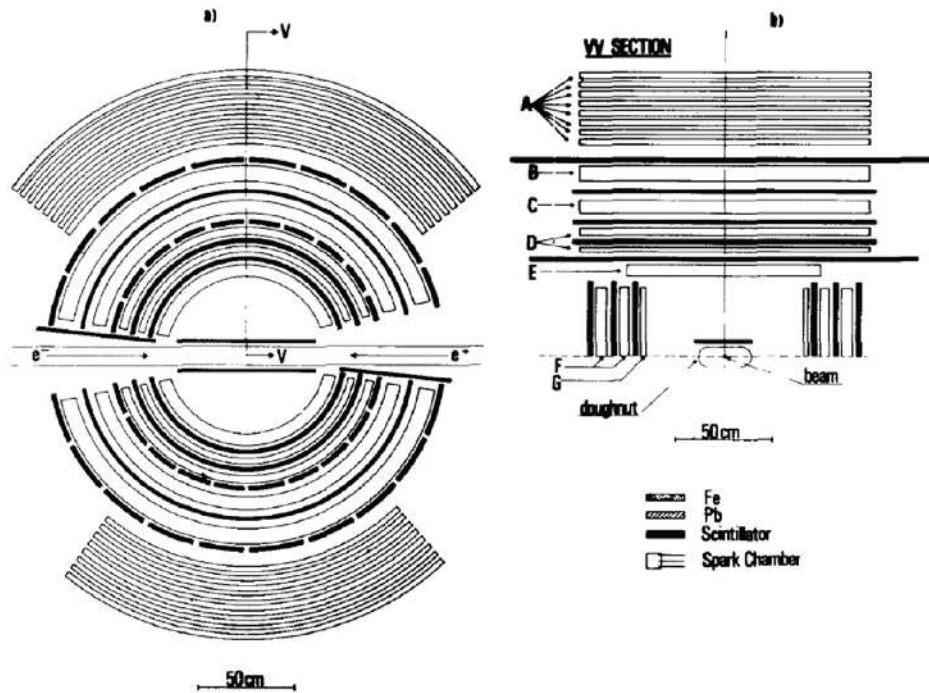


Fig. 4

Schema dell'apparato $\gamma\gamma 2$.

a) vista frontale da centro Adone. b) vista trasversa, normale all'asse dei fasci.

EDITORIAL

Publication of a New Discovery

This issue of Physical Review Letters must certainly be one of the most unusual in our history, with not just one but three extremely stimulating reports of a new discovery. Undoubtedly, the activity which will be aroused will be enormous and we happily join the rest of the physics community in congratulating those involved.

cosiddetta rivoluzione di novembre) destarono enorme interesse nella comunità dei ricercatori: varie interpretazioni vennero proposte sino a che progressivamente si consolidò l'ipotesi che le nuove particelle fossero stati legati di una coppia quark antiquark di tipo charm; la cui esistenza era già stata ipotizzata nel 1970 in un celebre lavoro [9] di Glashow, Iliopoulos e Maiani.

Ad Adone si decise allora di esplorare tutto l'intervallo di energie disponibile alla ricerca di nuovi stati variando l'energia dei fasci in manie-

ra fine a passi di 1-2 MeV invece che 25 - 50 MeV come in precedenza. Questa ricerca - la cosiddetta "spazzolata" in energia - non diede esito positivo; alcuni possibili segnali - la cui significanza statistica fu forse anche sopravvalutata a causa della psicosi allora diffusa di farsi sfuggire nuovamente delle scoperte - non ebbero conferma da altri esperimenti.

Un esempio dei risultati della "spazzolata" è riportato in figura 5 dove per confronto è mostrato anche il segnale della J/Ψ ; la forma del

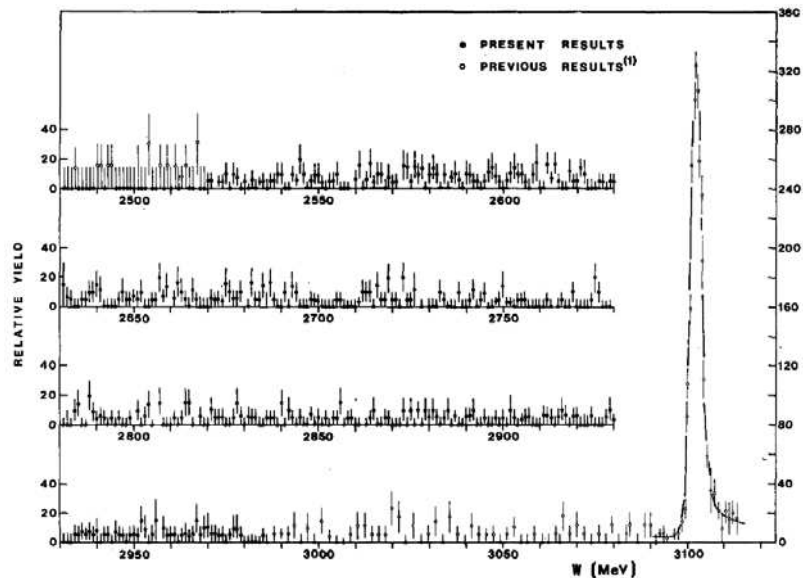


Fig. 5

Andamento del conteggio di eventi di produzione multiadronica rispetto all'energia totale dei fasci in Adone. A 3100 MeV svetta il picco dovuto alla produzione della J/ψ .

picco è data dalla formula di Breit e Wigner per la sezione d'urto di produzione di un mesone vettore di massa M :

$$\sigma = \frac{12\pi}{M^2} \frac{B_e B_f}{[(2E - M)^2 / \Gamma^2 - 1/4]}$$

dove E è l'energia del fascio, Γ è la larghezza dello stato cioè l'inverso della sua vita media mentre B_e ed B_f rappresentano le frazioni di decadimento del mesone rispettivamente in coppie e^+e^- e nello stato finale f . La coda a destra del picco è dovuta all'irraggiamento di fotoni. La figura evidenzia l'ironia della sorte: appena al di là del deserto di risonanze strette nel range di energie nominalmente accessibili ad Adone esisteva l'enorme segnale della J/ψ che non sarebbe potuto sfuggire agli esperimenti di Frascati.

Va qui ricordato che già nel 1965 Carlo Bernardini aveva suggerito [10] di prendere le misure variando con continuità l'energia di Adone, proprio per cercare nuovi mesoni vettori, però la sua proposta non ebbe seguito per difficoltà tecniche.

Gli esperimenti di Adone si dedicarono quindi alla misura delle proprietà della J/ψ e a migliorare le misure sulla produzione multiadronica, tuttavia erano ormai in competizione con Stanford dove operava una macchina di maggiori prestazioni (la luminosità di Spear era circa 10 volte quella di Adone) ed un rivelatore

più moderno. Mark I impiegava per la prima volta un magnete solenoide coassiale ai fasci; una configurazione poi seguita da quasi tutti i rivelatori general purpose alle macchine e^+e^- .

Anche per questa ragione alcuni ricercatori dei LNF decisero di andare a collaborare con l'esperimento Mark I a Stanford. Nel 1976 in particolare essi diedero un contributo fondamentale alla scoperta dei mesoni con charm (cioè formati da un quark charm ed un quark leggero) [11]. Il loro gruppo partecipò anche a successivi esperimenti alle macchine e^+e^- di Stanford e costituì il nucleo di una collaborazione tuttora attiva ed allargata ad altre componenti italiane.

Altri ricercatori dei LNF assieme a colleghi di Padova invece parteciparono all'esperimento DM2 alla macchina DCI di Orsay dove venne in particolare effettuata una sistematica campagna di studi sui decadimenti della J/ψ .

La fisica e^+e^- si arricchì nel 1976 di una nuova importante scoperta a Spear: il leptone τ di massa circa 1.8 GeV (troppo pesante per essere prodotto ad Adone) per cui il premio Nobel fu attribuito a M. Perl. Alla luce della teoria l'esistenza di un terzo leptone dopo l'elettrone e il mesone μ implicava l'esistenza di una terza famiglia di quarks. Infatti - presso l'acceleratore per protoni di Chicago - furono scoperti nel 1977 il quark bottom di massa circa 5 GeV e nel 1995 il quark top - a lungo cercato senza esito a causa della sua elevata massa, circa 170 GeV.

Questi sviluppi indicano chiaramente come dopo Adone fosse necessario proseguire la fisica e^+e^- con macchine di più alta energia ed in proposito l'INFN promosse lo studio (1974) di un SuperAdone. Per ragioni finanziarie e politiche il progetto non ebbe tuttavia seguito, anche per la competizione con esperimenti al Cern dove i gruppi italiani potevano allora disporre di moderne macchine per protoni ed efficienti infrastrutture di supporto.

Dopo la fine del progetto SuperAdone il gruppo macchina di Frascati ha comunque mantenuto una attività di alto livello partecipando a diverse collaborazioni con altri laboratori: Stanford, Desy ad Amburgo ed il Cern, per studi e sviluppo di prototipi per nuove macchine e^+e^- .

Il gruppo macchina dei LNF ha anche recentemente contribuito alla realizzazione di una macchina a protoni per la terapia dei tumori nel Nord Italia (il centro CNAO).

Gli esperimenti di seconda generazione terminarono la presa dati nel 1977. Adone continuò a funzionare con un solo fascio circolante per esperimenti di luce di sincrotrone e di fisica nucleare. Nel 1989 il funzionamento con due fasci fu riattivato per l'esperimento Fenice; questo ottenne la prima misura al mondo del fattore di forma del neutrone nella regione time-like con un apparato specialmente dedicato. Nel 1993 Adone fu definitivamente spento e quindi smantellato per consentire, nello stesso edificio, la costruzione della nuova macchina DaΦne.

Nel frattempo la fisica e^+e^- veniva coltivata a una nuova generazione di macchine: Doris ed Petra ad Amburgo, PEP a Stanford, CESR a Cornell, Vepp-4 a Novosibirsk, Tristan in Giappone. Ulteriori sviluppi nella comprensione della dinamica dei fasci migliorarono le prestazioni delle macchine: in particolare la cosiddetta low β insertion permetteva una maggiore focalizzazione dei fasci proprio nel punto di incrocio, consentendo di raggiungere luminosità più elevate.

Venne osservata la frammentazione dei quarks in jets di adroni, venne provata sperimentalmente l'esistenza dei gluoni. La misura della asimmetria angolare nella produzione delle coppie $\mu^+\mu^-$, sensibile alla interferenza tra interazioni deboli e QED - confermò le predizioni della Modello Standard. Vennero studiati la produzione e i decadimenti dei mesoni B (formati da un quark bottom e un quark leggero) e misurato il fenomeno del mixing per i mesoni B neutri, fenomeno già noto per i mesoni K.

Alla fine degli anni '80 entrano in funzione le macchine di più alta energia che consentono di produrre lo Z^0 , il bosone intermedio delle interazioni deboli: SLC a Stanford ed il LEP al Cern. In particolare SLC (Stanford Linear Accelerator) non è più una macchina circolare, bensì un acceleratore lineare dove i bunches di e^+ ed e^- sono inviati in una struttura finale ad arco dove è situata la regione di interazione.

Ricercatori dei LNF parteciparono numerosi sia all'esperimento SLD a SLC che all'esperimento Aleph al LEP. In entrambi i casi il contributo dei LNF si concentrò nella realizzazione di rivelatori per i mesoni μ e per la misura dell'energia degli adroni. Lo studio della produzione e dei decadimenti dello Z^0 confermò con elevata precisione la validità dello Standard Model; speciale importanza ebbe la misura del numero di neutrini: $N_\nu = 2.92 \pm 0.06$ che esclude l'esistenza di una quarta famiglia di quarks.

A LEP vennero anche studiate le proprietà dei mesoni B e del leptone τ ; in particolare vennero misurate con grande precisione le vite medie di queste particelle che percorrono un cammino di soli pochi millimetri prima di decadere. Ciò fu possibile grazie all'impiego di rivelatori al silicio di altissima risoluzione spaziale.

Il LEP si è spinto fino ad energie ben oltre la massa dello Z^0 fino a ~ 200 GeV, alla ricerca senza esito del bosone di Higgs (la cui esistenza è richiesta dal Modello Standard) e delle ipotetiche particelle previste dalle teorie di supersimmetria.

Tuttavia segnali di nuova fisica possono venire non solo dall'osservazione diretta di nuove particelle ma anche dal loro contributo come stati virtuali (off mass shell) in processi di bassa energia. Ciò può essere rilevato disponendo di macchine e^+e^- di bassa energia ma di altissima intensità. Con questo intento furono realizzate le B-factories PEP-II a Stanford e KEKB in Giappone, col principale scopo di studiare la violazione di CP nei decadimenti dei mesoni B.

La simmetria CP implica l'invarianza dei fenomeni fisici a seguito di trasformazioni successive di coniugazione di carica e parità. Questa invarianza deve essere violata data l'evidente asimmetria tra materia ed antimateria nel nostro universo. Nel Modello Standard la violazione di CP origina dalla matrice di mixing delle tre famiglie di quarks; tuttavia ciò non è sufficiente a spiegare l'entità della asimmetria materia/antimateria osservata. Nuova fisica oltre il Modello

Standard potrebbe fornire ulteriori sorgenti di violazione di CP capaci di rendere conto delle osservazioni cosmologiche.

Gli esperimenti alle B-factories hanno prodotto una enorme messe di dati misurando asimmetrie dipendenti dal tempo in molti dei numerosi canali di decadimento dei mesoni B. Ad oggi non c'è evidenza di effetti di nuova fisica: tutti i risultati sono in accordo col Modello Standard secondo il meccanismo insito nella matrice CKM.

Al concetto di meson-factory si richiama anche la nuova macchina dei LNF: Daφne, in funzione dal 1999, il cui scopo primario è lo studio della violazione di CP nel sistema $K^0 \bar{K}^0$. Daφne è una macchina con due anelli separati, che opera ad energia fissa 1.02 GeV, pari alla massa della risonanza Φ . A Daφne la Φ viene prodotta con altissima rate; essa poi decade in $K^0 K^0$ oppure in K^+K^- . Ciò consente in linea di principio di misurare tutti i parametri di violazione di CP nel decadimento dei mesoni K.

A questo scopo nasce la collaborazione Kloe (LNF, Roma, Napoli, Lecce, Pisa, Karlsruhe). Sotto la direzione di Paolo Franzini viene realizzato un rivelatore di grandi dimensioni ed elevate prestazioni a seguito di un notevole sforzo costruttivo, essenzialmente tutto interno ai LNF.

Daφne ha raggiunto una luminosità massima di circa $1.5 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$, al di sotto del valore di progetto $5\text{-}10 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$, necessario per una misura competitiva di violazione di CP.

Kloe ha comunque conseguito una serie di importanti risultati nella fisica dei K: misure di precisione delle masse, vite medie e frazioni di decadimento hanno consentito un test stringente dell'unitarietà della matrice CKM.

Inoltre la Φ decade in uno stato coerente (entangled) $K^0 \bar{K}^0$: Kloe ha misurato gli effetti di interferenza e ha verificato le previsioni della meccanica quantistica. Altri studi hanno riguardato proprietà dei mesoni leggeri e una misura

di precisione della produzione adronica a basse energie; questa entra nella predizione teorica di costanti fisiche fondamentali come il momento magnetico anomalo del mesone μ e la costante di struttura fine.

La macchina ha offerto anche altre opportunità di fisica: l'elevato flusso di mesoni K carichi ha permesso lo studio (esperimento Finuda) della formazione di ipernuclei (cioè nuclei in cui un quark d viene sostituito da un quark s) e lo studio (esperimenti Dear e Siddharta) della formazione di atomi kaonici (in questi un elettrone orbitale è sostituito dal mesone K^-).

Attualmente il futuro di Daφne è in discussione: è stato installato ed è in corso di messa a punto un nuovo schema di ottica della macchina per migliorare la luminosità. In caso di successo l'esperimento Kloe potrebbe riprendere le misure. È stata anche studiata la possibilità di costruire una nuova macchina di energia totale circa 2.5 GeV per uno studio dei fattori di forma del nucleone, delle interazioni $\gamma\gamma$ e della produzione multiadronica.

Nel mondo altri progetti vengono portati avanti: l'evoluzione delle B-factories comprende un upgrade di KEKB e un progetto di SuperB attualmente allo studio, particolarmente caldeggiato dall'INFN con importante coinvolgimento del gruppo macchina dei LNF.

Per le altissime energie, oltre quelle di LEP, le macchine circolari non sono più praticabili per gli enormi dispendi di energia irraggiata dai fasci. Seguendo la via aperta da SLC si è formata una collaborazione mondiale per il progetto di una macchina lineare e^+e^- di energia 500 GeV: ILC (International Linear Collider).

Il filone iniziato a Frascati nei lontani anni '60 è quindi ben lungi dall'esaurirsi e da esso i fisici continuano ad aspettarsi risposte agli interrogativi sulla più intima ed ultima struttura della materia.

Bibliografia

Oltre agli altri contributi nella presente rivista maggiori dettagli e rievocazioni storiche si possono trovare in :

V. Valente. "La strada del sincrotrone km 12 - 50 anni di acceleratori e particelle nei laboratori di Frascati" - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (2007)

"Bruno Touschek and the birth of e^+e^- physics" - G. Isidori editor. Frascati Physics Series XIII (1999)

“ADONE – a milestone on the particle way” - V. Valente editor. Frascati Physics Series VIII (1997)

Articoli citati nel testo:

- 1) In proposito vedi C. Bernardini in “Present and future in Collider Physics”, pag 5, Atti di Conferenze, Vol 30 – Società Italiana di Fisica
- 2) N. Cabibbo and R. Gatto. Phys.Rev.124, 1577 (1961)
- 3) C. Bernardini et al. Nuovo Cimento 18, 1293 (1960); 34, 1473 (1964)
- 4) Multihadronic cross-sections from e^+e^- annihilation at c.m. energies between 1.4 and 2.4 GeV. C. Bacci, G. Penso, G. Salvini, B. Stella, R. Baldini-Celio, G. Capon, C. Mencuccini, G.P. Murtas, A. Reale, M. Spinetti. (gruppo gg) Phys.Lett.B38:551-554,1972.
- 5) Multiplicity in hadron production by e^+e^- colliding beams. F. Ceradini, R. Santonico, M. Conversi, L. Paoluzzi, M. Grilli, E. Iarocci, P. Spillantini, V. Valente, R. Visentin, M. Nigro. (gruppo mp) Phys.Lett.B42:501-503,1972.
- 6) Multiple particle production from e^+e^- interactions at c.m. energies between 1.6 and 2 GeV. B. Bartoli, B. Coluzzi, F. Felicetti, V. Silvestrini, G. Goggi, D. Scannicchio, G. Marini, F. Massa, F. Vanoli (gruppo bosone) Nuovo Cim.A70:615-631,1970.
- 7) The Energy Dependence of Sigma ($e^+e^- \rightarrow$ Hadrons) in the Total Center-Of-Mass Energy Range 1.2-GeV to 3.0-GeV. M. Bernardini, D. Bollini, P.L. Brunini, E. Fiorentino, T. Massam, L. Monari, F. Palmonari, F. Rimondi, A. Zichichi (gruppo BCF) Phys.Lett.B51:200,1974.
- 8) G. Salvini, L’urto elettrone–positone e le nuove particelle – Annuario Enciclopedia Scienza e Tecnica – Mondadori (1976)
- 9) S.L. Glashow, J. Iliopoulos, L.Maiani. Phys.Rev. D2, 1285 (1970)
- 10) C. Bernardini. “Vector boson hunting with Adone” - Nota LNF-65/047 (1965)
- 11) I. Peruzzi et al. Phys.Rev.Lett. 37, 569 (1976)