

## 2. IL COLLIDER ANTIPROTONE-PROTONE DEL CERN

---

La trattazione delle collisioni ad alto momento trasferito è usualmente divisa in studi effettuati agli anelli di accumulazione adronici ( $\bar{p}p$ ,  $pp$ ) e agli anelli  $e^+e^-$ . La differenza dello stato iniziale ha infatti importanti conseguenze :

- dal punto di vista della macchina acceleratrice, l'accelerazione di adroni relativamente "pesanti" si presenta più facile di quella degli elettroni (vedi §1.3.1) : il valore di  $\sqrt{s}$  ottenibile in macchine adroniche esistenti o in costruzione è oltre 20 volte superiore a quello degli anelli  $e^+e^-$  (2 TeV contro circa 100 GeV);
- la frazione dell'energia utile a livello partonico è però molto minore in macchine adroniche, poiché, a differenza degli elettroni, che sono essi stessi dei partoni puntiformi, gli adroni sono degli aggregati di partoni elementari (vedi §1.1.3);
- dal punto di vista dei rivelatori, una macchina adronica produce eventi con una sezione d'urto totale molto superiore ad una macchina  $e^+e^-$  (decine di mb contro alcuni nb); gran parte di questa sezione d'urto è però data da processi a basso  $p_T$ , in cui gli adroni interagiscono in modo coerente, senza mostrare la loro struttura partonica;
- nelle macchine adroniche, anche in collisioni ad alto  $p_T$ , gran parte dell' energia, portata dai partoni spettatori, non è utilizzata nell'interazione elementare (cioè  $\sqrt{\hat{s}} \ll \sqrt{s}$ );
- un vantaggio delle macchine adroniche è pertanto che, ad un dato valore di  $\sqrt{s}$ , gli esperimenti hanno accesso ad un largo intervallo di  $\sqrt{\hat{s}}$ ; tuttavia, a  $\sqrt{\hat{s}}$  fissato, il flusso partonico <sup>(5)</sup> disponibile è molto minore; inoltre, il valore dell'energia a livello partonico è differente in ogni collisione e, a causa della presenza dei partoni spettatori, la struttura degli eventi è più complessa.

In genere, le caratteristiche delle macchine adroniche le rendono adatte ad un lavoro di esplorazione di un dominio di energia nuovo : la minore difficoltà di costruzione e la possibilità di osservare nello stesso momento vari stati iniziali partonici di differente energia compensano la minore luminosità differenziale e i problemi dell'analisi. Le macchine  $e^+e^-$  sono invece insostituibili per gli studi det-

---

<sup>(5)</sup> Considerando un adrone come un fascio incoerente di partoni, si può definire una sorta di "luminosità differenziale" per ogni tipo di stato iniziale, in funzione di  $\sqrt{\hat{s}}$  (vedi §2.3.2).

tagliati, ove l'analisi richiede la conoscenza esatta dello stato iniziale del processo ed un'efficienza di osservazione pressoché totale.

Tra le macchine adroniche, è necessario effettuare un'ulteriore distinzione tra macchine  $pp$ , come gli ISR e (presumibilmente) LHC, e macchine  $\bar{p}p$ , come i Collider del Cern e di Fermilab. Dal punto di vista dell'acceleratore, le macchine  $pp$  sono concettualmente più semplici, non necessitando di costose e sofisticate apparecchiature per la produzione, il "raffreddamento" e l'accumulazione degli antiprotoni, ma richiedono la costruzione di due anelli magnetici indipendenti. Rispetto invece ai processi osservabili, le macchine  $\bar{p}p$  offrono la possibilità di avere uno stato iniziale a numero barionico nullo, nelle collisioni tra un antiquark dell'antiprotone e un quark del protone. Tale stato iniziale è disponibile anche in macchine  $pp$ , utilizzando un antiquark del "mare", ma con una probabilità trascurabile ad alta massa, a causa della forma delle funzioni di struttura del mare. Pertanto, le macchine  $\bar{p}p$  sono favorite nell'osservazione dei processi di annichilazione (ad esempio, il processo  $q\bar{q} \rightarrow IVB$  al Collider del Cern), mentre le macchine  $pp$  offrono luminosità più elevate (e quindi più eventi) nei processi di scambio o con gluoni nello stato iniziale.

Questo Capitolo è dedicato alla trattazione delle collisioni adroniche, in particolare al Collider  $\bar{p}p$  del Cern [3, 4], mentre le interazioni  $e^+e^-$  sono discusse nel Capitolo 3.

Dopo una discussione sulla macchina (§2.1), dedicata principalmente al metodo di produzione e raffreddamento degli antiprotoni, nel §2.2 sono descritti i rivelatori UA1 e UA2, protagonisti di quasi tutti gli studi sulle interazioni ad alto  $Q^2$  effettuati al Collider. Si passa quindi alla discussione della Fisica: nel §2.3 sono trattate le interazioni forti, descritte dalla QCD, mentre il §2.4 è dedicato agli IVB, forse il soggetto più importante tra gli studi del Collider. Il §2.5 descrive il programma di sviluppo del Collider del Cern, che ha consentito di migliorare la luminosità della macchina e le prestazioni dei rivelatori. Infine, il §2.6 contiene un breve cenno sui collider adronici del futuro, in particolare l'acceleratore LHC del Cern.

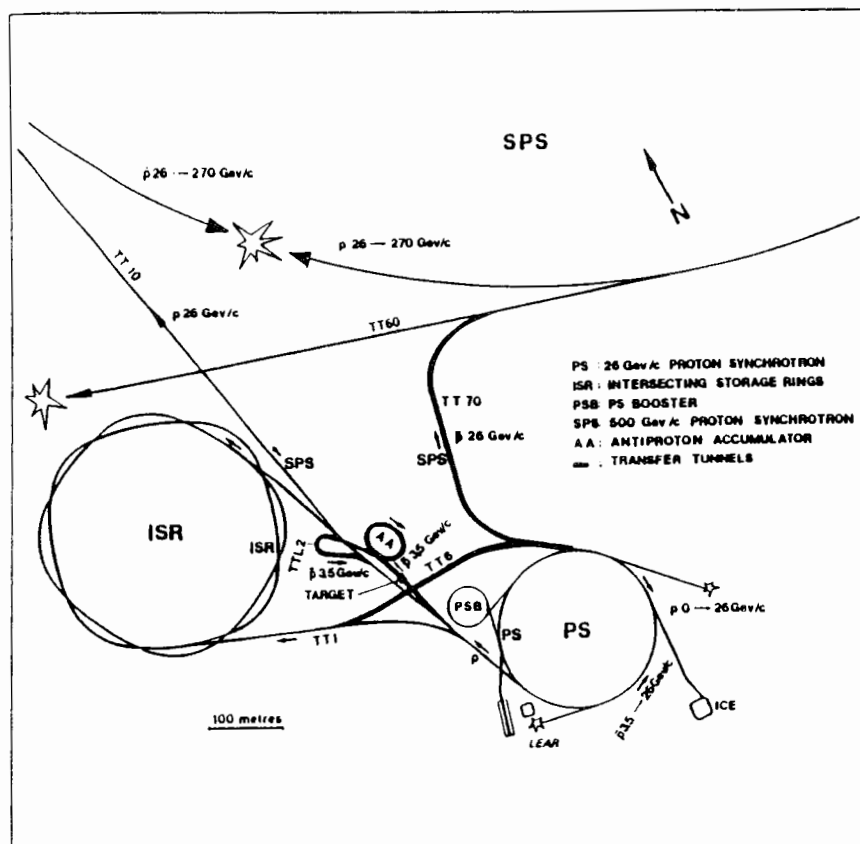


Figura 2.1 : Il complesso  $\bar{p}p$  del CERN.

## 2.1 Il Collider

La maggiore difficoltà incontrata nella fase di progettazione del Collider è stata la realizzazione di un fascio di antiprotoni in grado di fornire la luminosità richiesta per rivelare i bosoni vettoriali intermedi. Infatti, dal momento che le sezioni d'urto per la produzione di tali particelle sono dell'ordine di alcuni nanobarn, è necessario raggiungere una luminosità di almeno  $10^{29} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  per produrre qualche IVB al giorno. La figura 2.1 mostra lo schema generale del complesso protone-antiprotone del CERN.

Gli antiprotoni sono ottenuti come prodotti secondari delle collisioni di un fascio di protoni di 26 GeV proveniente dal PS ( $\approx 10^{13}$  protoni ogni 2.4 secondi) su un bersaglio di rame e tungsteno. Poiché la sezione d'urto di produzione di antiprotoni dalle reazioni protone-nucleo è piuttosto bassa (occorrono circa  $10^6$

protoni per produrre un antiprotoni) essi sono accumulati in uno speciale anello magnetico (AA = Antiproton Accumulator) per parecchie ore prima di essere iniettati nel SPS. Poiché gli antiprotoni sono creati con impulsi largamente differenti (sia in direzione, sia in modulo), l'AA deve possedere un'apertura sufficientemente grande (circa 70 cm), allo scopo di raccogliere uno spazio delle fasi di antiprotoni il più esteso possibile. Alcuni parametri caratteristici sono mostrati nella tabella (2.1).

Tabella 2.1 : Parametri dell' AA

|                                                       |                            |
|-------------------------------------------------------|----------------------------|
| Diametro lungo l'asse minore                          | 48.1 m                     |
| Diametro lungo l'asse maggiore                        | 49.6 m                     |
| Valore medio dell'impulso dei $\bar{p}$               | 3.5 GeV                    |
| $\Delta p/p$                                          | $\pm 30 \times 10^{-3}$    |
| Pressione                                             | $10^{-10}$ Torr            |
| Dimensioni del bersaglio - diametro                   | 3 mm                       |
| Dimensioni del bersaglio - lunghezza                  | 110 mm                     |
| Flusso di protoni per ciclo di PS                     | $1 \times 10^{13} / 2.4$ s |
| Flusso di antiprotoni dal bersaglio                   | $2.5 \times 10^7 / 2.4$ s  |
| Accumulazione iniziale ( $1 \times 10^{12} \bar{p}$ ) | 33 h                       |

È necessario applicare agli antiprotoni un processo che ne aumenti la densità nello spazio delle fasi in modo da renderla confrontabile con quella del fascio di protoni. Questa tecnica viene chiamata "raffreddamento", con un'espressione presa a prestito dalla teoria cinetica dei gas.

I primi tentativi di raffreddamento furono dovuti a Budker che, nel 1966, propose il *raffreddamento ad elettroni*. In questo caso, il fascio di antiprotoni è sovrapposto a fasci molto intensi di elettroni ben collimati, aventi la stessa velocità media degli antiprotoni. Gli urti ripetuti tra i due tipi di particelle hanno l'effetto medio di raffreddare gli antiprotoni.

Nel 1972, Van der Meer sperimentò il *raffreddamento stocastico*, basato sull'informazione fornita dalla misura dei parametri effettivi degli antiprotoni, come vedremo nel paragrafo seguente. Questa è la tecnica usata al Collider del CERN.

La figura 2.2 mostra lo schema temporale dell'accumulazione di antiprotoni nell'AA.

• 2.1.1 - Il raffreddamento stocastico. Questo sistema sfrutta le fluttuazioni della posizione media nello spazio delle fasi di piccole porzioni del fascio di antiprotoni e si basa sul fatto che le correzioni sono eseguite su un insieme finito di

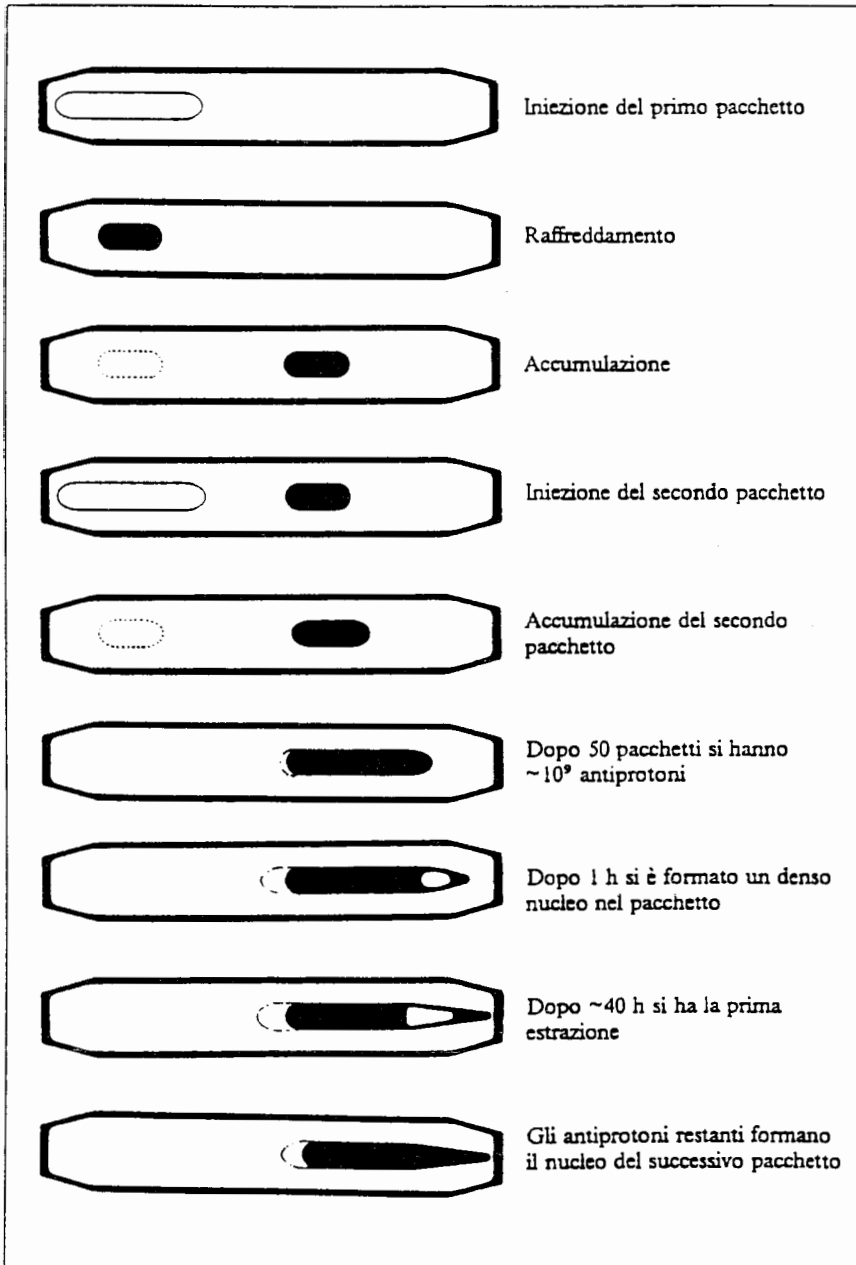


Figura 2.2 : Schema temporale dell'accumulazione di antiprotoni.

particelle. In questo caso, il teorema di Liouville, che stabilisce la conservazione della densità di un fluido nello spazio delle fasi sotto l'azione di un campo esterno, non viene violato, dal momento che esso è valido solo per sistemi con infiniti gradi di libertà. Il raffreddamento stocastico diminuisce sia la dimensione longitudinale del pacchetto (raffreddamento in momento) sia quella trasversale (raffreddamento di betatrone).

• 2.1.2 - *Raffreddamento trasverso.* Poiché è impossibile effettuare una misurazione e successiva correzione della posizione di ogni particella nel fascio, si devono analizzare separatamente piccole porzioni del fascio. Il numero di porzioni deve essere sufficientemente piccolo per motivi di realizzabilità pratica ma, nello stesso tempo, il valore medio della posizione e dell'impulso delle particelle che ne fanno parte deve poter fluttuare a valori significativamente differenti da quelli nominali, per consentire la correzione. L'informazione sulla posizione di tali campioni è raccolta da un cosiddetto "elettrodo di pick-up" (vedi figura 2.3) amplificata ed elaborata.

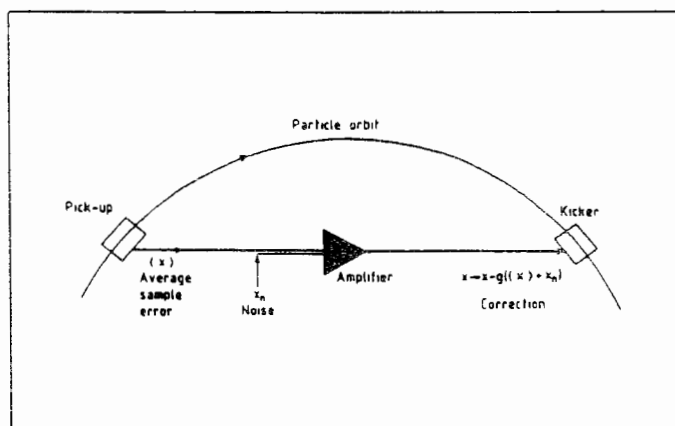


Figura 2.3 : Schema di raffreddamento trasverso.

La correzione viene effettuata da un deflettore magnetico, che imprime una deviazione proporzionale alla differenza tra la posizione misurata dal pick-up e la posizione nominale del fascio. Poiché il segnale di correzione e il campione di particelle devono arrivare contemporaneamente al deflettore magnetico, pick-up e deflettore devono essere opportunamente situati sulla circonferenza dell'AA: la distanza tra i due dispositivi deve essere pari a  $1/4$  dell'oscillazione di betatrone, eventualmente aumentata di un numero intero di lunghezze d'onda. In tal modo, solo particelle al massimo dell'ampiezza di oscillazione sono completamente corrette da una sola deflessione. Negli altri casi la deflessione corregge solo parzialmente la posizione. La presenza, nel campione analizzato, di particelle sfasate le une

rispetto alle altre fa sì che, all'effetto coerente di raffreddamento di una singola particella, si sommi quello incoerente di disturbo dovuto alle altre.

• *2.1.3 - Raffreddamento longitudinale.* Questa tecnica agisce sul momento delle particelle utilizzando le relazioni che legano momento e frequenza di rivoluzione. Il principio adottato è analogo al caso del raffreddamento trasverso dove si aggiunga l'inserimento di un filtro nella catena di controreazione. Questo fa sì che il segnale di correzione dipenda dalla frequenza e quindi dal momento. In questo modo le particelle troppo energetiche vengono decelerate e quelle poco energetiche accelerate, ottenendo una compressione del fascio rispetto alle variabili longitudinali. Il raffreddamento nell'AA riduce la densità nello spazio delle fasi e momento degli antiprotoni di un fattore  $10^9$ : tale riduzione è richiesta dall'accettanza del SPS. Quando un fascio sufficientemente elevato di antiprotoni è accumulato nell'AA, l'iniezione nell'SPS avviene attraverso sei cicli consecutivi di PS ad intervalli di 2.4 secondi. Nei primi tre cicli vengono iniettati, attraverso la linea TT10, tre pacchetti di protoni contenenti circa  $10^{11}$  particelle ciascuno, precedentemente accelerate a 26 GeV nel PS. Nei cicli successivi tre pacchetti di antiprotoni, contenenti tipicamente  $10^{10}$  particelle, sono estratti dall'AA e, attraverso la linea di trasferimento TTL2, sono iniettati nel PS, dove vengono accelerati a 26 GeV in direzione opposta a quella dei protoni e sono poi immessi nell'SPS attraverso la linea di trasferimento TT70 (vedi figura 2.1). Dopo l'iniezione, i sei pacchetti di protoni e antiprotoni, equispaziati lungo la circonferenza dell'SPS, sono accelerati dal sistema a radiofrequenza (RF) fino ad un'energia di 315 GeV, che rappresenta il limite imposto dalla dissipazione di potenza a campo magnetico costante. Dopo l'accelerazione, i fasci sono mantenuti a pacchetti dal sistema a RF. Ciascun pacchetto ha una distribuzione pressoché gaussiana con una r.m.s. longitudinale di circa 20 cm e trasversale di 1 mm.

I pacchetti collidono in sei diversi punti dell'SPS (LSS1 - LSS6), ma le aree sperimentali per la presa dati sono state predisposte solo in due zone LSS4 e LSS5. In queste regioni la luminosità istantanea viene aumentata grazie a speciali quadrupoli che provvedono a ridurre localmente le dimensioni trasverse del fascio. La luminosità decade esponenzialmente nel tempo con un periodo medio di decadimento dell'ordine di circa 20 ore. Questo valore rappresenta anche la durata tipica di una presa dati al Collider del CERN. Dopo tale periodo, i fasci vengono deviati su un assorbitore e si provvede all'iniezione di nuovi fasci.

• *2.1.4 - Le prestazioni del complesso  $S\bar{p}pS$ .* A conclusione del paragrafo, la tabella 2.2 mostra l'energia e la luminosità integrata del Collider negli anni 1981-88. La luminosità fornita dal  $S\bar{p}pS$  e quella raccolta dal rivelatore UA2 sono presentate separatamente. Dalla tabella appare evidente il progressivo miglioramento delle prestazioni della macchina e la buona efficienza degli esperimenti. Si noti inoltre il miglioramento della luminosità integrata dovuto all'entrata in funzione del nuovo collettore di antiprotoni a partire dal 1987 (vedi §2.5.1).

Tabella 2.2 : Luminosità integrata del  $S\bar{p}pS$ 

| Anno | $\sqrt{s}$<br>(GeV) | Luminosità<br>dal $S\bar{p}pS$<br>(nb <sup>-1</sup> ) | Luminosità<br>in UA2<br>(nb <sup>-1</sup> ) |
|------|---------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1981 | 546                 | 0.23                                                  | 0.08                                        |
| 1982 | 546                 | 28                                                    | 16.5                                        |
| 1983 | 546                 | 153                                                   | 122                                         |
| 1984 | 630                 | 395                                                   | 310                                         |
| 1985 | 630                 | 655                                                   | 440                                         |
| 1987 | 630                 | 94                                                    | 46                                          |
| 1988 | 630                 | 3400                                                  | 2700                                        |

## 2.2 I Rivelatori UA1 e UA2

UA1 e UA2 sono i due maggiori rivelatori del Collider. Essi hanno una struttura a strati successivi, attorno al punto di interazione, il cui principio di funzionamento è illustrato nella figura 2.4 <sup>(6)</sup> per i vari tipi di particella (o insieme di particelle) :

- Un elettrone dà un segnale singolo nelle camere a drift (JVD nella figura), nei rivelatori a semiconduttore (Silicon) e nei rivelatori a fibre scintillanti (SFD). Dà invece un segnale elevato nei rivelatori a radiazione di transizione (TRD). Nei calorimetri lo sciame elettromagnetico è caratterizzato da un inizio precoce (rivelato come molti "mip" <sup>(7)</sup> nel preshower) e dal contenimento pressoché totale dello sciame nella prima sezione (elettromagnetica) dei calorimetri. L'eventuale presenza di un campo magnetico consente di imporre l'ulteriore vincolo della compatibilità tra l'energia, misurata nel calorimetro, e l'impulso, misurato dalla deflessione magnetica nella camera a drift.
- Un adrone carico ( $\pi^\pm$ ) ha un comportamento simile ad un elettrone nel JVD, Silicon e SFD. Il segnale del TRD è invece differente, come anche la forma dello sciame nei calorimetri : contrariamente ad un elettrone, un adrone in

<sup>(6)</sup> La figura si riferisce in particolare al rivelatore UA2, nella sua seconda fase, dopo il 1987.

<sup>(7)</sup> La ionizzazione prodotta in un dato materiale da una singola particella energetica non interagente è talora chiamata *mip* (per *minimum ionizing particle*).

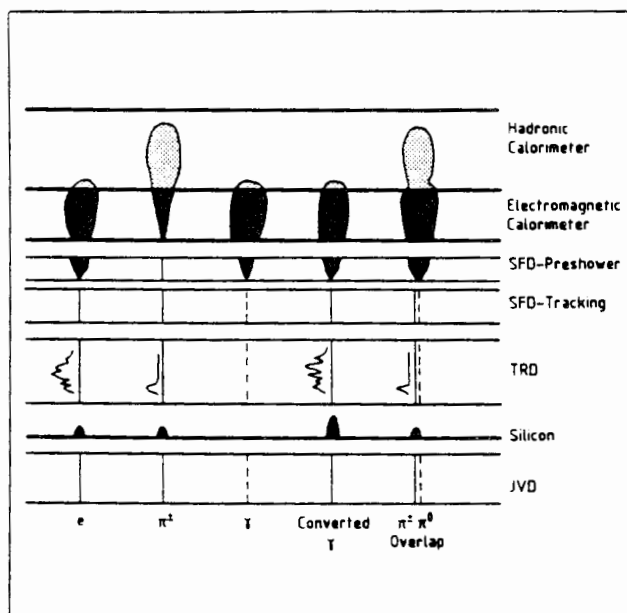


Figura 2.4 : Principi di funzionamento dei rivelatori al Collider.

genere dà un segnale di un mip nel preshower, mentre lo sciame adronico è più largo e profondo di quello elettromagnetico.

- Un fotone ( $\gamma$ ), che non converte nell'apparato, non lascia alcun segnale nelle camere di tracciamento, mentre ha un comportamento simile ad un elettrone nel preshower e nei calorimetri.
- Un fotone che converte (ad esempio nella camera del fascio) rappresenta un pericoloso fondo nella ricerca di elettroni: un campo magnetico, che divarica i due elettroni di conversione, consente l'identificazione di queste particelle. In assenza di esso, i rivelatori a semiconduttore distinguono tra la ionizzazione di una traccia singola (l'elettrone) e quella di due tracce (i due elettroni di conversione).
- Un altro pericolo nella ricerca di elettroni è dato dalla sovrapposizione ("overlap") tra un adrone carico di basso impulso e un  $\pi^0$  energetico. In tale caso, la selezione può essere basata tanto su un campo magnetico, quanto sul segnale del TRD e sulla distanza tra la posizione dello sciame nel preshower e l'estrapolazione della traccia.
- Un jet è dato dalla sovrapposizione di molti adroni, carichi e neutri, e dei fotoni provenienti dal decadimento dei  $\pi^0$ . Produce pertanto molte tracce nel JVD, Silicon, TRD, SFD e un unico sciame molto largo e non risolto, con caratteristiche intermedie tra gli sciame elettromagnetici (quasi comple-

tamente contenuti nei calorimetri e.m.) e quelli adronici (aventi la maggior parte dell'energia nei calorimetri adronici).

- Un  $\mu$  ha caratteristiche simili ad un mesone  $\pi^\pm$  nelle camere, mentre i calorimetri registrano la presenza di un solo mip. L'identificazione dei  $\mu$  si basa pertanto sul basso segnale dei calorimetri, in coincidenza con un segnale nel sistema di camere all'esterno del rivelatore. La misura dell'impulso è effettuata misurando la deflessione magnetica della traccia, che può essere ottenuta tanto con un campo all'interno del calorimetro, quanto magnetizzando il ferro del calorimetro adronico.
- Un  $\nu$  non è osservato da nessun rivelatore : la sua presenza appare come uno sbilanciamento nella somma vettoriale degli impulsi di tutte le altre particelle. Poiché, in genere, molte particelle di alta energia, provenienti dalla frammentazione dei partoni spettatori, sfuggono ai rivelatori lungo la camera del fascio, il solo sbilanciamento osservabile è quello nel piano trasverso alla linea dei fasci.

Queste osservazioni generali sono ora applicate ai singoli apparati sperimentali. Nei §2.2.1 e 2.2.2 sono descritti i rivelatori UA1 e UA2 nella prima fase del Collider, negli anni 1981-86, mentre la seconda fase della macchina e degli apparati è trattata nel §2.5.

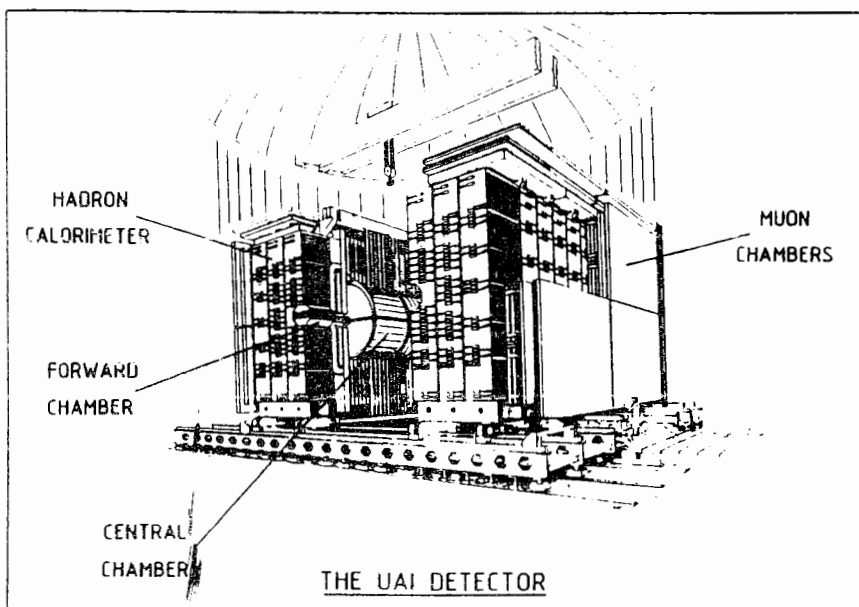


Figura 2.5 : Il rivelatore UA1.

• **2.2.1 - Il rivelatore UA1.** UA1 (figura 2.5) ha un campo magnetico di dipolo di  $0.7 T$ , ortogonale ai fasci  $p$  e  $\bar{p}$ . All'interno del magnete, una grande camera a drift, il *rivelatore centrale* (CD), misura gli impulsi delle particelle cariche, tramite la loro deflessione in campo magnetico. Poiché i fili del CD sono paralleli alla direzione dei fasci, il metodo della *divisione di carica* consente di calcolare la coordinata  $z$ .

Un sistema di calorimetri misura l'energia rilasciata dalle particelle, sia cariche che neutre. I calorimetri coprono tutto l'angolo solido attorno al punto di interazione <sup>(8)</sup>.

Nella regione centrale ( $25^\circ < \theta < 155^\circ$ ) i calorimetri elettromagnetici (*gon-dole*) sono segmentati in quattro compartimenti costituiti da strati successivi di piombo e scintillatore, per un totale di 26.6 lunghezze di radiazione (r.l.). Ciascuna gondola copre un angolo solido  $\Delta\theta \times \Delta\phi = 5^\circ \times 180^\circ$ .

Nella regione in avanti, i calorimetri elettromagnetici, profondi 27 r.l., coprono gli angoli polari  $5^\circ < \theta < 25^\circ$  e  $155^\circ < \theta < 175^\circ$ , per un totale di 64 moduli (32 per ciascun lato del rivelatore).

I calorimetri e.m. sono seguiti da un calorimetro adronico, di circa 5 lunghezze di assorbimento, costituito dal ferro di ritorno del flusso magnetico, intervallato da strati di scintillatore.

Un sistema di rivelatori per  $\mu$ , dato da camere a drift e camere a tubi a streamer, completa l'apparato.

• **2.2.2 - Il rivelatore UA2.** UA2 (vedi figura 2.6) è molto più piccolo di UA1. Esso consiste di due regioni, ciascuna delle quali ospita rivelatori differenti, aventi completa simmetria azimutale: la *regione centrale*, a  $40^\circ < \theta < 140^\circ$  e le *regioni in avanti*, a  $20^\circ < \theta < 40^\circ$  e  $140^\circ < \theta < 160^\circ$ .

La regione centrale (corrispondente a circa  $\pm 1$  unità di pseudorapidità) contiene il *rivelatore di vertice*, un sistema cilindrico di camere proporzionali e a drift. Dopo un radiatore di 1.5 r.l., un'ulteriore camera proporzionale è utilizzata come contatore di preshower.

Il calorimetro centrale (CC), a simmetria sferica, contiene 240 torri, ciascuna delle quali con una granularità  $\Delta\theta \times \Delta\phi = 10^\circ \times 15^\circ$ . Ciascuna torre è segmentata in tre compartimenti: un compartimento e.m., di 17 r.l., e due compartimenti adronici, ciascuno dei quali di circa 2 lunghezze di assorbimento. La precisione dei calorimetri è data dalla formula ( $E$  in  $GeV$ ):

$$\begin{cases} \left. \frac{\sigma_E}{E} \right|_{e.m.} \cong \frac{0.15}{\sqrt{E}} \\ \left. \frac{\sigma_E}{E} \right|_{had.} \cong 0.32 E^{-1/4} \end{cases} \quad (2.1)$$

<sup>(8)</sup> A causa della struttura meccanica del magnete, vi sono delle aperture a  $\phi = 0^\circ$  e  $\phi = 180^\circ$ . Le particelle prodotte a questi angoli rilasciano una energia minore nei calorimetri, peggiorando la misura del momento trasverso mancante  $\not{p}_T$ .

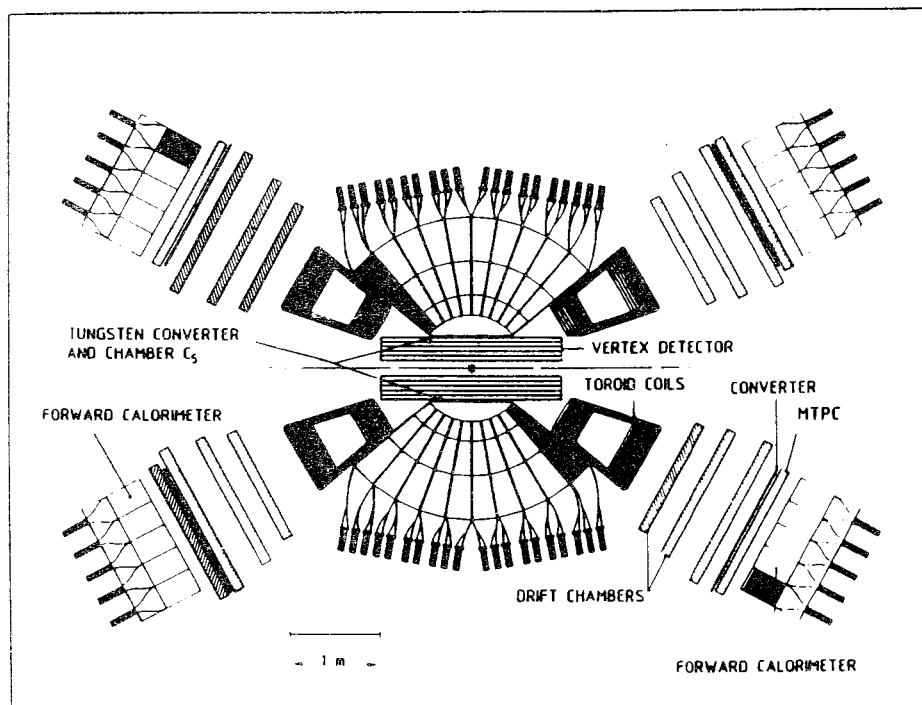


Figura 2.6 : Il rivelatore UA2.

Ciascuna delle regioni in avanti è equipaggiata con un campo magnetico toroidale, seguito da un sistema di camere a drift per la misura del momento delle tracce cariche, da camere a tubi proporzionali, che operano come contatori di preshower, e da calorimetri e.m. di 24 r.l., mentre è assente la calorimetria adronica.

In UA2 non c'è campo magnetico (a parte le regioni in avanti), né rivelazione di  $\mu$ . Manca inoltre la possibilità di rivelare ogni particella ad un angolo polare minore di  $20^\circ$  o maggiore di  $160^\circ$ .