

## Ciclotrone e Sincrotrone

### Ciclotrone:

**Circa 54 anni fa a Frascati fu costruito il prototipo dell'acceleratore Lhc di Ginevra: quell'Anello di accumulazione (Ada) che nel 1961 rappresentò la prima macchina al mondo nella quale i fasci di particelle si scontravano frontalmente dopo aver orbitato. Nell'ormai lontano febbraio 1960, una serie di circostanze non casuali portò la scienza italiana in un'affascinante avventura che avrebbe lasciato nel futuro il segno della "fisica delle particelle elementari".** Quella fisica era nata negli anni quaranta con l'esperimento di fisici italiani che avevano identificato un componente dei raggi cosmici non previsto da alcuna teoria: il "muone". Poi si realizzò il sogno di Fermi: un acceleratore nazionale che affiancasse in Italia le macchine europee del Cern di Ginevra: il sincrotrone per elettroni dei Laboratori nazionali di Frascati (Lnf) che era, al tempo, l'acceleratore più efficiente di quel tipo al mondo. Si trattava in sostanza di sparare particelle relativistiche contro particelle in moto contrapposto al fine di raggiungere un'energia "disponibile" alle trasformazioni della materia enormemente più alta di quella che è disponibile sparando particelle contro bersagli fissi (come avveniva negli esperimenti con i sincrotroni dell'epoca); inoltre se uno dei due proiettili fosse stato una antiparticella (elettroni contro positroni) si sarebbe potuto usare un solo anello magnetico (come nel sincrotrone) in cui gli urti avrebbero prodotto "annichilazioni" con scomparsa di entrambi i due proiettili e deposizione di energia di enorme densità in un punto del vuoto (ossia, un mini big-bang). In altre parole si trattava di eccitare il vuoto per fargli produrre particelle nuove! Purtroppo però i positroni non esistono in natura ma il gruppo di scienziati italiani non si scoraggiò e riuscì ad ottenerli utilizzando lo stesso sincrotrone per la loro creazione; successivamente sarebbe stato utilizzato un anello magnetico ad hoc come iniettore nel quale avrebbero girato controcorrente rispetto a un fascio di elettroni della stessa energia. Fu infine creato il massimo vuoto spinto (vedi oltre il relativo significato) affinché si incontrassero, senza ostacolo alcuno, e si annichilassero dopo aver girato nell'anello per ore e ore collassando nel mini big-bang.

Un ciclotrone da 150 centimetri di diametro del 1939, da cui fuoriesce un fascio di particelle accelerate (protoni e deuteroni) che ionizzano l'aria provocando un bagliore azzurro.

Il principio sfruttato è la risonanza ionica ciclotronica. All'interno della camera a vuoto circolare sono presenti due elettrodi semicircolari cavi a forma di D. I due elettrodi sono come due gusci accostati per le aperture (la parte piatta della D). Questi elettrodi possono essere colpiti da particelle spurie che ne causano il riscaldamento e devono essere raffreddati mediante circolazione di acqua in appositi tubi. La camera è posta tra le espansioni polari di un potente magnete, in modo che il campo attraversi il piano su cui giacciono gli elettrodi.

Quando una particella viene introdotta tangenzialmente alla camera, ortogonalmente al campo magnetico, essa viene deviata e mantenuta su un'orbita circolare per effetto della forza di Lorentz. Nel vuoto la particella è libera di ruotare, ma, perdendo lentamente energia (tutte le cariche elettriche, se accelerate, emettono fotoni), percorre una traiettoria a spirale fino al centro.

Se ora viene applicata una opportuna differenza di potenziale alternata ad alta frequenza tra i due elettrodi, le particelle subiscono un'accelerazione ogni volta che passano nello spazio tra essi. Accelerando, il diametro dell'orbita aumenta, fino a quando il fascio non fuoriesce tangenzialmente dal bordo del dispositivo.

La forza centripeta che trattiene le particelle nella traiettoria circolare è generata dal campo magnetico trasversale  $B$  per effetto della forza di Lorentz.

Si può constatare che per una particella di massa costante la frequenza necessaria è indipendente dal raggio dell'orbita. Mentre il fascio si allarga a spirale la sua frequenza di rotazione non diminuisce, poiché la particella continua ad accelerare, percorrendo la maggiore lunghezza dell'orbita nello stesso tempo.

Quando la particella si avvicina alla velocità della luce la trattazione non relativistica esposta sopra non è più sufficiente, e questo richiede delle correzioni alla frequenza o all'intensità del campo magnetico.

Il ciclotrone è stato progettato con l'intenzione di superare le limitazioni dell'acceleratore lineare. In questo dispositivo le particelle cariche sono accelerate in linea retta all'interno di un tubo a vuoto contenente una serie di elettrodi cilindrici. A questi elettrodi è applicato un potenziale elettrico alternato in modo che il potenziale successivo alla posizione delle particelle sia sempre attrattivo.

Nonostante i significativi miglioramenti raggiunti nel tempo, la struttura del dispositivo ne limita la convenienza economica per potenze molto elevate. Il problema principale è che per ottenere energie elevate è necessario incrementare il diametro del tubo, quindi della camera a vuoto, del magnete e dell'intensità del campo prodotto da questo.

Questo limite è stato superato con l'invenzione del sincrociclotrone che risolve i problemi causati dagli effetti relativistici e dal sincrotrone che supera il problema della limitatezza del campo magnetico e della dimensione del ciclotrone.

### Sincrotrone

L'introduzione di un campo magnetico variabile in sincronismo con il moto delle particelle consente di mantenere le particelle sempre sulla stessa orbita circolare; poiché, a causa dell'accelerazione subita dalle particelle, questa orbita circolare viene descritta con velocità sempre più elevata, per mantenere il sincronismo tra il moto di rivoluzione delle particelle e le oscillazioni della tensione acceleratrice si rende necessario l'aumento progressivo della frequenza della tensione acceleratrice. La velocità angolare  $\omega$  delle particelle accelerate è legata alla massa a riposo  $m$  delle particelle, alla loro carica elettrica  $q$ , all'induzione magnetica  $B$  a cui sono soggette, al raggio dell'orbita  $R$  e alla velocità della luce nel vuoto  $c$ . L'energia cinetica massima  $T_M$  ottenibile con un  $s$ . dipende dal raggio della macchina e dall'induzione magnetica massima  $B_M$ . In un  $s$ . la camera da vuoto, nella quale si muovono le particelle accelerate, si riduce a un anello cavo (ciambella) immerso nel campo magnetico generato da elettromagneti opportunamente disposti intorno all'anello, assai meno ingombranti e costosi di quelli che, a parità di raggio, sarebbero richiesti per un ciclotrone, un sincrociclotrone o un betatrone. Un'ulteriore riduzione della regione sede del campo magnetico è ottenuta impiegando magneti a foccheggiamento forte. Il  $s$ . può essere usato per l'accelerazione di elettroni (elettrosincrotrone), di protoni (protosincrotrone) e di particelle pesanti ( $s$ . per ioni), che vengono in esso iniettate dopo essere stati preventivamente accelerate da un acceleratore ausiliario (iniettore) e vengono poi ulteriormente accelerate da una o più cavità risonanti disposte lungo l'anello. Una variante degli elettrosincrotroni e dei protosincrotroni, profondamente innovativa dal punto di vista concettuale ma non da quello strutturale, è costituita dagli anelli di accumulazione o di collisione.

### Sincrotrone e vuoto spinto

Acceleratore circolare per particelle cariche, quali elettroni e protoni.

Gli acceleratori sono oggi i “microscopi” utilizzati per studiare le proprietà elementari della materia, analizzando i prodotti delle collisioni fra particelle portate ad energie elevate.

Le particelle cariche vengono accelerate per mezzo di campi elettrici e, negli acceleratori circolari, vengono mantenute sulle orbite stabilite tramite campi magnetici.

Nel sincrotrone le particelle, confinate in un anello **in cui c'è vuoto spinto per non avere interferenze ed evitare che gli elettroni emessi vengano perduti nell'interazione con la materia**, si muovono su un'orbita di raggio costante accelerate da campi elettrici oscillanti. La frequenza di oscillazione del campo elettrico deve essere sincronizzata in modo tale da aumentare con l'energia delle particelle, così come l'intensità del campo magnetico.

Le particelle cariche, muovendosi su orbite circolari a velocità relativistiche (vicine a quella della luce), perdono inevitabilmente parte della loro energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. L'intensità della radiazione emessa è inversamente proporzionale al raggio di curvatura dell'orbita e alla quarta potenza della massa delle particelle accelerate. Quindi la radiazione (o luce) di sincrotrone è molto più importante quando si accelerano elettroni piuttosto che protoni (che hanno una massa quasi 2000 volte superiore) e diminuisce all'aumentare del raggio dell'acceleratore.

A partire dal 1950 la luce di sincrotrone ha trovato numerose applicazioni e sono stati costruiti acceleratori dedicati al suo uso. Essa viene utilizzata per lo studio delle proprietà dei materiali, ad esempio magnetici o superconduttori, per l'analisi di strutture biologiche, quali proteine e virus, o nel campo della microelettronica e micromeccanica. Le radiazioni usate in questi progetti sono soprattutto nella gamma dell'ultravioletto e dei raggi X.

**Per ottenere il vuoto molto spinto, i recipienti vengono riscaldati a qualche centinaio di gradi °C in modo da anticipare il rilascio del gas. I gas liberati dal recipiente vengono tolti con pompe (criopompa, pompa ionica e pompa a diffusione) finché la maggior parte delle molecole di gas sono state rimosse, e dopo la temperatura può essere nuovamente abbassata. Il processo per liberare il gas non sarebbe altrettanto efficace se fosse eseguito a temperatura ambiente.**

**Le pressioni più basse attualmente ottenibili in laboratorio sono di circa 10–13 Pa.**