

è

a
e

4

8

Gli acceleratori di particelle

Esperienze di oggetti in moto a velocità elevatissime sono attuabili attraverso i raggi cosmici, provenienti dallo spazio, oppure grazie agli acceleratori di particelle, dispositivi che accelerano particelle cariche, per esempio elettroni, protoni o altre.

Gli acceleratori di particelle, impiegati nella ricerca fisica di base per indagare la struttura del nucleo e i componenti ultimi della materia, trovano applicazione anche in campo medico, per la produzione di radioisotopi per la diagnostica e la terapia, e in campo industriale.

I tre principali sono gli **acceleratori lineari**, i **sincrotroni** e i **collisionatori** (*colliders*).

■ L'acceleratore lineare

Figura 15 Schema dell'acceleratore lineare di Stanford SLAC (Stanford Linear Accelerator) "Fabbrica di B". Ha una lunghezza di 3,2 km e accelera elettroni fino a 50 GeV.

Gli acceleratori lineari sono utilizzati soprattutto per accelerare elettroni (fig. 15), che raggiungono energie massime dell'ordine del GeV. Gli elettroni prodotti per effetto termoionico sono iniettati in una regione di alto vuoto in cui è presente un campo elettrico oscillante che esercita su di essi una serie di impulsi acceleranti.

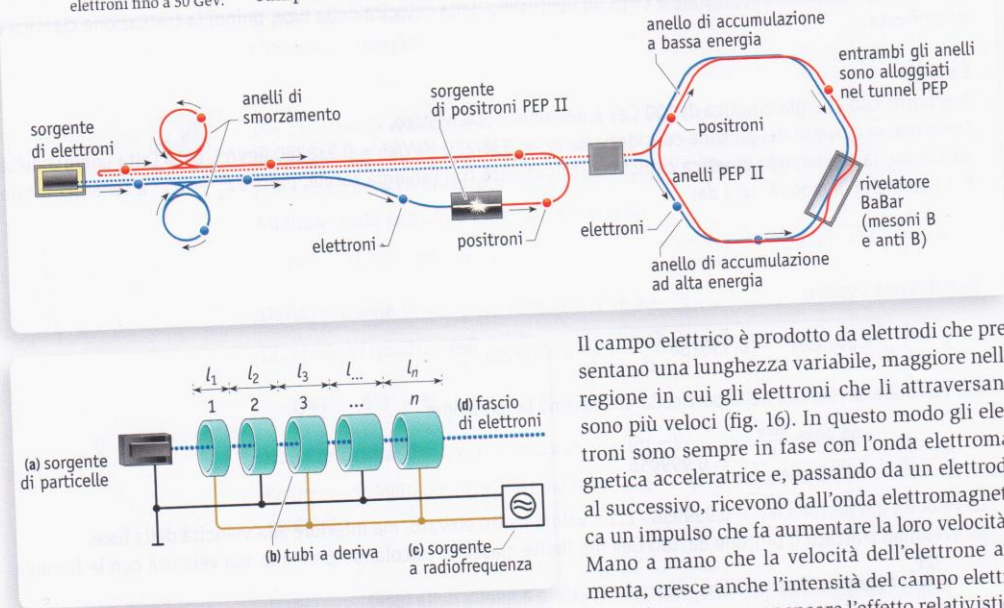


Figura 16 Schema di un acceleratore lineare.

Il campo elettrico è prodotto da elettrodi che presentano una lunghezza variabile, maggiore nella regione in cui gli elettroni che li attraversano sono più veloci (fig. 16). In questo modo gli elettroni sono sempre in fase con l'onda elettromagnetica acceleratrice e, passando da un elettrodo al successivo, ricevono dall'onda elettromagnetica un impulso che fa aumentare la loro velocità. Mano a mano che la velocità dell'elettrone aumenta, cresce anche l'intensità del campo elettrico applicato per compensare l'effetto relativistico

dell'aumento della sua massa, quindi la sua maggiore inerzia. Gli acceleratori lineari, per ovvi motivi tecnici, hanno una lunghezza limitata, quindi anche l'energia delle particelle non può superare certi valori.

■ Il sincrotrone

Per eliminare gli inconvenienti degli acceleratori lineari e poter accelerare le particelle a più alte energie, sono stati costruiti i sincrotroni nei quali le particelle cariche sono accelerate su orbite circolari di diametro fisso che vengono percorse tante volte finché le particelle non raggiungono l'energia programmata.

Per aumentare la velocità delle particelle si sfrutta sempre l'azione dei campi elettrici. In questo caso gli elettrodi, alternati a magneti, sono disposti lungo il canale in cui circolano le particelle.

Per curvare le traiettorie delle particelle cariche si impiegano campi magnetici orientati perpendicolarmente al piano in cui circolano le particelle. Il raggio dell'orbita descritta si ricava uguagliando la forza di Lorentz alla forza centripeta necessaria per eseguire il moto circolare, per una particella di massa m e carica q :

$$qvB = m \frac{v^2}{r} \quad \text{da cui si ricava l'intensità del campo magnetico: } B = \frac{mv}{qr}$$

Questa relazione, utilizzata nel capitolo 10 (volume Dai fenomeni ondulatori ai cam-

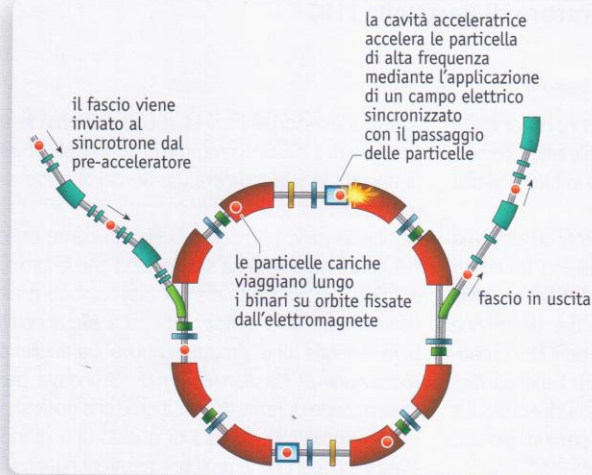


Figura 17 Schema di sincrotrone. I dipoli magnetici incurvano la traiettoria, mentre i quadrupoli focalizzano il fascio in modo che non si disperda in tutto il canale.

pi elettrici e magnetici), per ricavare la carica specifica dell'elettrone, si applica anche al caso di particelle relativistiche, tenendo presente che il prodotto mv rappresenta la quantità di moto relativistica e non quella classica.

Poiché l'intensità del campo magnetico B è direttamente proporzionale alla quantità di moto delle particelle sottoposte ad accelerazione, mentre le particelle circolano nel canale, anche B deve aumentare in maniera opportuna in considerazione dell'aumento della massa con la velocità.

Il campo elettrico acceleratore è prodotto in cavità a radiofrequenza e deve essere sincronizzato con la particella in modo tale che, per ogni passaggio nella cavità, la particella possa assorbire energia dal campo per incrementare la sua velocità.

Le particelle non sono accelerate in maniera continua, iniettate nell'acceleratore in *bunches*, cioè in grappoli, viaggiano nel canale, sotto vuoto spinto, dell'acceleratore formando come un salsicciotto. Ogni volta che attraversano una cavità a radiofrequenza assorbono energia dalle onde radio e incrementano la loro velocità.

Raggiunta l'energia desiderata le particelle sono deviate dalla loro traiettoria, mediante un campo magnetico deflettore, e inviate su un bersaglio fisso, per esempio idrogeno liquido. Le interazioni delle particelle ad alta energia con il bersaglio generano nuove particelle che sono evidenziate mediante appositi sistemi di rivelazione.

■ Il collider

Un *collider* ha una struttura circolare come il sincrotrone e utilizza campi elettrici di cavità a radiofrequenza per accelerare le particelle e magneti per incurvare e focalizzare le loro traiettorie. In un *collider* vengono fatti circolare in senso opposto e in canali separati, ma molto vicini tra loro, due fasci di particelle cariche, per esempio un fascio di elettroni e di positroni (come con il LEP al CERN di Ginevra). Una volta raggiunta l'energia desiderata le particelle sono fatte collidere, alla medesima energia, le une contro le altre in regioni dove sono stati installati i rivelatori per gli esperimenti. Il vantaggio di questo modo di operare è che l'energia che si ha a disposizione durante la collisione è maggiore di quella che si otterrebbe inviando le particelle su un bersaglio fisso.

... DOVE SIAMO

L'acceleratore di particelle LHC

L'LHC (*Large Hadron Collider*), l'acceleratore di particelle più grande e più potente al mondo, realizzato presso i laboratori del CERN di Ginevra, è entrato in funzione alla fine del 2009.

LHC realizza collisioni p-p tra fasci di protoni ad altissima energia (7 TeV nel centro di massa) e collisioni tra nuclei di piombo a un'energia di 574 TeV (2,76 TeV/u.m.a.). Nel 2014, grazie all'eliminazione definitiva dei difetti che bloccarono per un anno la macchina dopo il suo collaudo nel settembre 2008, LHC aumenterà l'energia raggiungendo 13-14 TeV nel centro di massa dei protoni e in maniera equivalente 1066-1148 TeV per ioni piombo (5,52-5,16 TeV/u.m.a.).

Gli esperimenti a LHC hanno lo scopo di sondare la validità del Modello Standard della struttura della materia (vedi cap. 9), cercando di comprendere più profondamente come è fatto l'Universo in cui viviamo. Come mai le particelle subatomiche hanno masse così diverse fra loro? Che cos'è la massa? Le forze della natura sono tutte la manifestazione di un unico tipo di forza? Come mai viviamo in un Universo fatto di materia dal quale l'antimateria è praticamente scomparsa? Che cosa sono la materia oscura e l'energia oscura (vedi cap. 10)?

Le particelle accelerate ad alta energia sono utilizzate come sonde per studiare i costituenti ultimi della materia. Consideriamo per esempio l'energia di 1 TeV equivalente a $1,60 \cdot 10^{-7}$ J; per confronto ricordiamo che 1 g di

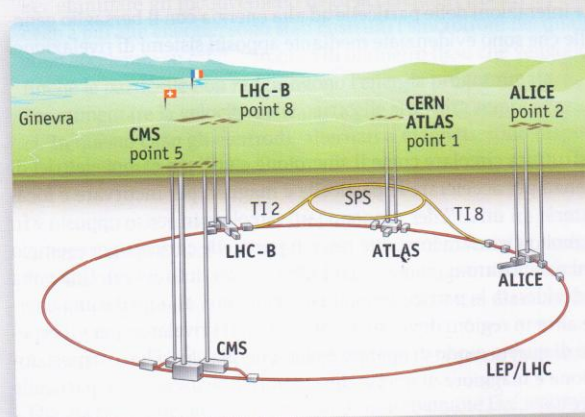
acqua che assorbe 1 cal (4,186 J) aumenta la sua temperatura di 1 °C. Se il grammo di acqua assorbisse 1 TeV di energia la sua temperatura aumenterebbe di soli 40 miliardesimi di grado.

L'efficacia delle particelle accelerate come proiettili per penetrare nella materia sta nel fatto che la loro energia è confinata in un volume piccolissimo, cioè è altamente concentrata. Dalle collisioni tra particelle accelerate si libera energia che produce nuove particelle secondo l'equazione di Einstein $E = mc^2$. Si indaga perciò che cosa accade durante la collisione e che cosa si produce. Per esempio, un risultato di questo tipo di indagine è stata la scoperta che protoni e neutroni hanno una struttura interna formata da altre particelle dette **quark**.



Figura A Fotografia aerea di Ginevra. La circonferenza più grande indica il tracciato dell'acceleratore LHC costruito in un tunnel a 100 m di profondità.

Figura B Spaccato dell'area che ospita LHC. Si accede all'acceleratore sotterraneo attraverso otto pozzi di cui solo quattro sono sfruttati per le collisioni fra le particelle. I quattro punti di interazione si chiamano CMS, ALICE, ATLAS, LHCb, in corrispondenza dei quali si trovano le aree sperimentali sotterranee dove i fasci di particelle vengono fatti collidere e i prodotti delle collisioni sono analizzati da potenti rivelatori.



Lo scopo dell'attività del CERN è la ricerca pura; nessuno è in grado di prevedere se e come le scoperte effettuate grazie a LHC modificheranno il futuro, anche se ciò che lì avviene ha già avuto ricadute sulla vita quotidiana. Per esempio, il word wide web (www), cioè il servizio di Internet che permette di pubblicare in forma elettronica e digitale software e documenti multimediali, è nato al CERN nel 1991 grazie alle idee di tre ricercatori: Tim Berners, Lee e Robert Cailliau. Altro esempio: al CERN nacque la PET (*Positron Emission Tomography*), tecnica di diagnostica funzionale di vari organi del corpo, eseguita attraverso la valutazione di assorbimento di traccianti radioattivi. La prima immagine PET fu realizzata nel 1977 al CERN su un cervello di ratto.

LHC è un acceleratore di particelle costruito nel tunnel sotterraneo occupato dal precedente acceleratore, il LEP. Il tunnel di LHC è una circonferenza lunga 26660 m che si trova a 100 m di profondità in una regione alla periferia di Ginevra, in parte su territorio francese e in parte su quello svizzero (fig. A e B).

LHC accelera due fasci di protoni, ciascuno contenuto in un tubo in ultra-alto vuoto, che circolano in senso opposto.

L'accelerazione delle particelle cariche si ottiene mediante l'imposizione di campi elettrici in cavità di radiofrequenza mentre il percorso circolare delle particelle e la focalizzazione del fascio sono realizzati mediante l'utilizzo di campi magnetici prodotti da magneti superconduttori (fig. C), i dipoli magnetici incurvano le traiettorie mentre i quadrupoli magnetici focalizzano il fascio in modo che non si disperda nello spazio interno al tubo.

Lungo l'anello circolare di LHC sono piazzati ben 1232 magneti superconduttori a dipolo, ciascuno lungo circa 15 m. L'intensità di picco del campo magnetico prodotto è di 8,33 T. Il fascio di protoni circolante nel tubo è suddiviso in 2880 pacchetti a forma di cilindro sottilissimo lungo circa 10 cm con un raggio di circa 500 μm ; ogni pacchetto contiene cento miliardi di protoni! Per aumentare la probabilità di scontro tra protoni il raggio nei punti di collisione viene ridotto, con speciali magneti superconduttori a soli 16,6 μm .

Prima di essere iniettati in LHC i protoni sono accelerati fino all'energia di 450 GeV utilizzando la catena di acceleratori esistente al CERN prima della costruzione del tunnel dove alloggia LHC (fig. D). Le fasi della pre-accellerazione sono le seguenti:

- stadio 1: LINAC2 (*Linear Accelerator 2*), energia dei protoni, $E_p = 50 \text{ MeV}$
- stadio 2: PSB (*Proton-Synchrotron Booster*): $E_p = 1,4 \text{ GeV}$
- stadio 3: PS (*Proton-Synchrotron*), 628 m di circonferenza: $E_p = 26 \text{ GeV}$
- stadio 4: SPS (*Super Proton-Synchrotron*), 7 km di circonferenza: $E_p = 450 \text{ GeV}$
- stadio 5: LHC (*Large Hadron Collider*), 27 km di circonferenza: $E_p = 7 \text{ TeV}$

I protoni sono cioè pre-accelerati fino all'energia di 450 GeV e quindi sono iniettati in LHC, tramite due tunnel lunghi ciascuno 3 km, dove raggiungono l'energia finale di 7 TeV per fascio.

Lungo la circonferenza del tunnel sono state predisposte quattro principali aree sperimentali nelle quali le particelle circolanti nell'acceleratore collidono.

In LHC non è possibile estrarre il fascio di particelle dalla macchina per inviarlo su bersagli fissi, ma le collisioni avvengono solo tra fasci di particelle circolanti in verso opposto, all'interno della macchina stessa. Quindi gli apparati sperimentali di rivelazione sono strettamente integrati con la macchina e sono progettati e costruiti insieme a essa.

Figura C Il tunnel di LHC. I fasci di particelle viaggiano all'interno dei moduli rappresentati che producono il campo magnetico necessario per mantenere le particelle in moto su un'orbita circolare.



... DOVE SIAMO

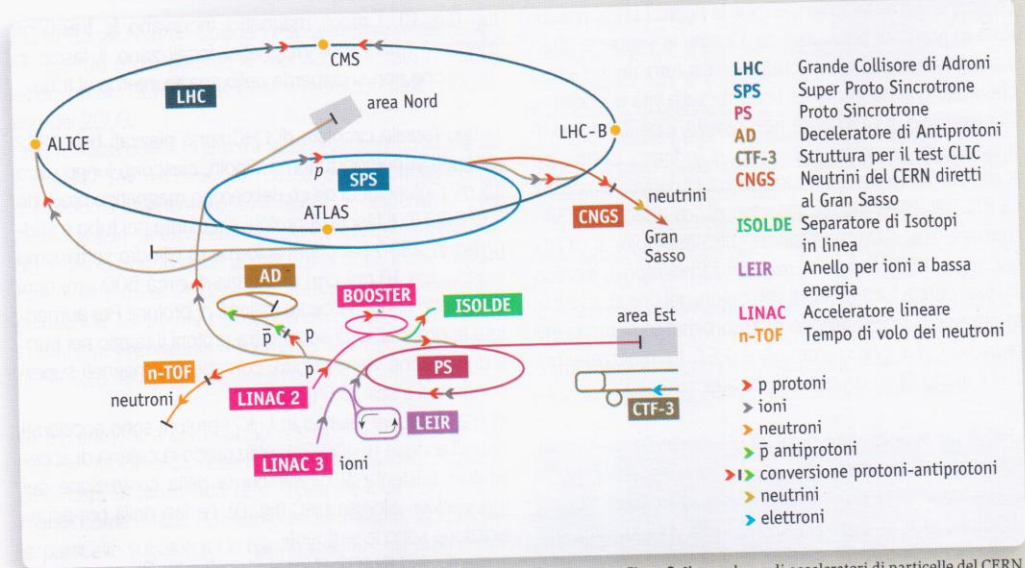


Figura D Il complesso di acceleratori di particelle del CERN.

Gli enormi e sofisticatissimi rivelatori (fig. E) posizionati nelle aree sperimentali permettono di individuare quali sono le particelle secondarie che si generano dalla colli-

sione delle particelle primarie, cioè di individuare il tipo di particella, la sua traiettoria, la sua energia e la sua quantità di moto (fig. F).

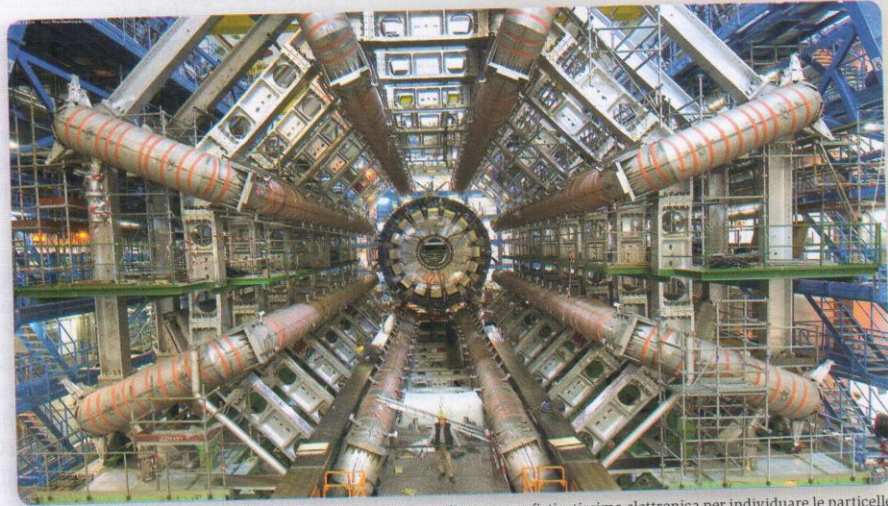


Figura E Il rivelatore ATLAS utilizza una sofisticatissima elettronica per individuare le particelle che si creano in seguito alla collisione dei fasci accelerati da LHC.

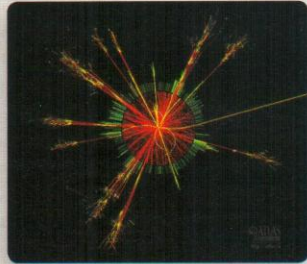


Figura F Simulazione al computer delle tracce delle particelle prodotte in seguito alla collisione di due protoni durante un esperimento che utilizza il rivelatore ATLAS.

In queste collisioni fra particelle subatomiche si riproducono le condizioni fisiche esistenti nei primissimi istanti di vita dell'Universo, così come sono descritte dalla teoria dell'Hot Big Bang (vedi cap. 10).

Come funziona LHC

Quando una particella carica penetra in un campo magnetico perpendicolarmente alle sue linee di forza è costretta a muoversi lungo una circonferenza chiusa intorno alle linee di forza del campo magnetico (vedi cap. 10, volume Dai fenomeni ondulatori ai campi elettrici e magnetici).

La relazione fra la quantità di moto della particella, il campo magnetico B , il raggio della circonferenza descritta e la carica e (supponiamo si tratti di un protone) della particella è: $p = e r B$.

Relazione che si ricava uguagliando la forza di Lorentz alla forza centripeta, cioè:

$$e v B = m \frac{v^2}{r}$$

Consideriamo un fascio di protoni circolante in LHC.

I dati a disposizione sono:

- la carica elettrica e del protone è $1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$;
- il campo magnetico B dei dipoli superconduttori è $8,33 \text{ T}$;
- la circonferenza del tunnel è 26660 m ;
- l'energia del fascio è 7 TeV .

Ricaviamo la quantità di moto dei protoni considerando la relazione relativistica fra energia e quantità di moto:

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2$$

Sappiamo che l'energia E dei protoni del fascio è 7 TeV e che l'energia di massa a riposo del protone è circa 938 MeV , valore che approssimiamo a $1 \text{ GeV} = 0,001 \text{ TeV}$. L'energia di massa a riposo è trascurabile rispetto al valore che assume il termine $(pc)^2$. Ne segue che, se si assume per la quantità di moto dei protoni circolanti nell'acceleratore il valore di $7 \text{ TeV}/c$, si ha una stima molto ragionevole.

Ricordando che:

$$1 \text{ eV}/c = 5,34 \cdot 10^{-28} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

si ottiene:

$$7 \text{ TeV}/c = 3,74 \cdot 10^{-15} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Calcoliamo il raggio dell'orbita circolare dei protoni:

$$r = \frac{p}{eB} = \frac{3,74 \cdot 10^{-15} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}}{1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 8,33 \text{ T}} \approx 2800 \text{ m}$$

cui corrisponde una circonferenza lunga circa 17584 m . Questo dato è paragonabile con le caratteristiche di LHC; infatti lungo il tubo circolare di LHC in cui viaggiano i protoni sono posizionati 1232 dipoli superconduttori ciascuno di lunghezza effettiva di $14,20 \text{ m}$.

Ma $17584 \text{ m} / 1232 = 14,30 \text{ m}$ valore che dovrebbe corrispondere alla lunghezza di un magnete dipolare. Tenendo conto delle approssimazioni fatte, il risultato trovato è più che ragionevole e conferma la bontà dell'approccio relativistico nella descrizione di LHC.

Esercizio

Considera che la quantità di moto del fascio di protoni sia di $7 \text{ TeV}/c$. Calcola classicamente e relativisticamente la velocità dei protoni.

Classicamente, considerando che $v = \frac{p}{m}$ si trova un risultato insensato, molto più grande della velocità della luce, cioè $v = 2,24 \cdot 10^{12} \text{ m/s}$.

Relativisticamente, considerando:

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

si ottiene un valore accettabile, cioè:

$$v = 2,999978 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$