

Gli acceleratori del futuro per la Fisica delle alte energie

Fabio Bossi *Laboratori Nazionali di Frascati*

Dai primi esperimenti di diffusione di particelle alpha su bersagli metallici eseguiti da Rutherford Geiger e Marsden nel secondo decennio del secolo scorso l'uso di fasci di particelle cariche accelerate ad energie sempre più elevate ha costituito lo strumento principe per il progresso della nostra conoscenza sulla struttura ultima della materia.

Dall'epoca di Rutherford ai giorni nostri la scienza degli acceleratori è progredita enormemente. Uno dei momenti più importanti in questa storia è stata senza dubbio la realizzazione del primo collisore materia-antimateria da parte di Bruno Touschek e del suo gruppo ai Laboratori Nazionali di Frascati nei primi anni '60 del secolo scorso.

Lo sforzo per costruire *collider* di particelle ad energie sempre più elevate è recentemente culminato con la realizzazione di LHC al CERN di Ginevra, una macchina di più di 27 km di circonferenza che ha portato alla scoperta nel 2012 del Bosone di Higgs.

La comunità scientifica sta già pensando a realizzare in futuro nuove macchine, ancora più potenti di LHC. È tuttavia universalmente riconosciuto come la costruzione degli acceleratori di nuova generazione costituisca una impresa estre-

mamente impegnativa. Oltre a numerose questioni di natura tecnica da risolvere, vanno anche tenute in conto problematiche quali il contenimento dei costi di costruzione, i consumi energetici e la sostenibilità ambientale delle nuove macchine. Per questa ragione l'intera comunità internazionale di fisici ed ingegneri degli acceleratori si sta impegnando in un grande programma di ricerca e sviluppo, volto ad affrontare e risolvere le suddette questioni [1].

Prima di discutere quali siano le principali tematiche su cui questo sforzo si concentra, è utile dare alcune definizioni essenziali. I due parametri principali per descrivere le prestazioni di un collisore sono l'energia nel centro di massa ottenibile, energia che si misura in multipli dell'elettrovolta, eV, e che determina il potenziale di scoperta di nuove particelle; la luminosità, che misura la frequenza con cui si riescono a produrre interazioni fisiche tra i fasci collidenti e che si misura in unità di $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Ad esempio, LHC opera ad una energia nel centro di massa di 14 TeV (1 TeV è pari a mille miliardi di eV), e ad una luminosità di circa $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Un'ulteriore grandezza che menzioneremo nel seguito è l'emittanza dei fasci, che dà una misura di quanto le traiettorie delle particelle accumulate si disco-

stano dalla traiettoria ideale; emittanza piccole corrispondono in generale ad alte luminosità.

I collisori possono avere una geometria circolare o lineare. Un acceleratore circolare ha l'ovvio vantaggio di poter utilizzare più volte gli stessi fasci accumulati nell'anello (o negli anelli) che lo costituisce, ed è dunque in genere la soluzione preferita. Tuttavia per curvare fasci di particelle cariche di sempre maggiore energia occorre utilizzare magneti ad alto campo per i quali esistono inevitabili limiti tecnologici. Dal Tevatron negli anni '80, ad LHC, dei nostri giorni, si è fatto uso a questo scopo di magneti superconduttori costruiti con avvolgimenti in lega di niobio e titanio, per un campo massimo raggiungibile (in LHC) di 8.3 Tesla. Il passo immediatamente successivo, per il progetto HighLumi-LHC [2] consisterà nel costruire dipoli curvanti con un campo di 12 T, per cui è necessario utilizzare fili sottili di Nb₃Sn, e che ad oggi non si è ancora in grado di produrre nelle quantità e con i costi sperati. Il problema diviene ancora più complesso quando si pianifica di raggiungere i 16 T, necessari per il funzionamento del Future Circular Collider (Fcc), la gigantesca macchina circolare da 90 km che si progetta di costruire ed operare al CERN nella seconda metà del secolo [3]. Fcc aspira a fornire collisioni protone-protone con energia nel centro di massa di 100 TeV. Un'altra tecnologia di grande interesse è quella dei magneti superconduttori ad alta temperatura (HTS), in grado, in linea di principio, di raggiungere campi di 20 T, ma che ad oggi non hanno ancora superato lo stadio di semplici prototipi.

Tutti gli attuali acceleratori si basano sulla tecnologia delle cavità a radiofrequenza (RF) per ottenere gli alti gradienti acceleranti necessari a raggiungere le energie di interesse in fisica delle particelle.

Esistono due categorie principali di strutture RF: quelle che operano a temperatura ambiente, e quelle superconduttrici che lavorano a temperature criogeniche. La scelta di quale tecnologia usare è determinata dagli specifici parametri di fascio che caratterizzano la macchina in oggetto. In entrambe i casi, tuttavia, i gradienti acceleranti raggiungibili sono di alcune decine di MeV/m. Ne consegue, dunque, che se si mira a raggiungere energie dei fasci di parecchie decine di TeV, è necessario costruire macchine lunghe parecchie

decine di chilometri, con conseguente aumento della complessità del progetto e dei costi di costruzione. Di conseguenza è in atto un grande sforzo di ricerca e sviluppo per esplorare la possibilità di ottenere strutture acceleranti con gradienti sempre più elevati. A questo scopo sono sotto studio materiali innovativi che, in particolare, diminuiscano la probabilità di scarica, aumentino il fattore di merito delle cavità RF, contengano i consumi energetici.

D'altro canto, nuove tecniche di accelerazione, in particolare la accelerazione al plasma, sono, in linea di principio, in grado di raggiungere gradienti 100-1000 volte più intensi delle normali strutture a RF. In questo caso, i campi elettrici necessari per accelerare particelle cariche sono creati in un plasma eccitato da un impulso laser (laser driven acceleration) o da un pacchetto di particelle cariche (beam driven acceleration). Alcuni fondamentali esperimenti in questo senso sono stati eseguiti con successo in parecchi laboratori del mondo, dalla Cina, all'Europa, agli Stati Uniti. Tuttavia la capacità di costruire un collider che si basi su questa tecnologia è ancora tutta da dimostrare. Le sfide principali da affrontare includono lo sviluppo di schemi per accelerare i positroni, la capacità di accelerare fasci con alte correnti e la possibilità di mantenere l'emittanza dei fasci accelerati ai valori utili per produrre collisioni di alta luminosità. Un passo importante in questa direzione è costituito dalla pianificata costruzione, presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN, di EuPRAXIASPARC_LAB, che sarà la prima *user facility* al mondo basata sulla accelerazione al plasma [4]. Gli elettroni così accelerati saranno utilizzati per produrre fasci di fotoni monocromatici a loro volta utilizzabili in numerose applicazioni di ricerca, in particolare nel campo della fisica dei materiali e delle scienze della vita. La costruzione della macchina è stata interamente finanziata dal governo italiano, mentre futuri finanziamenti europei sono previsti rafforzare la *facility* di Frascati e realizzarne una seconda in un sito ancora da definire.

Tutti i collisori sin qui costruiti utilizzano fasci di elettroni o protoni e/o delle relative antiparticelle. L'uso degli elettroni presenta l'indubbio vantaggio di basarsi su collisioni tra particelle

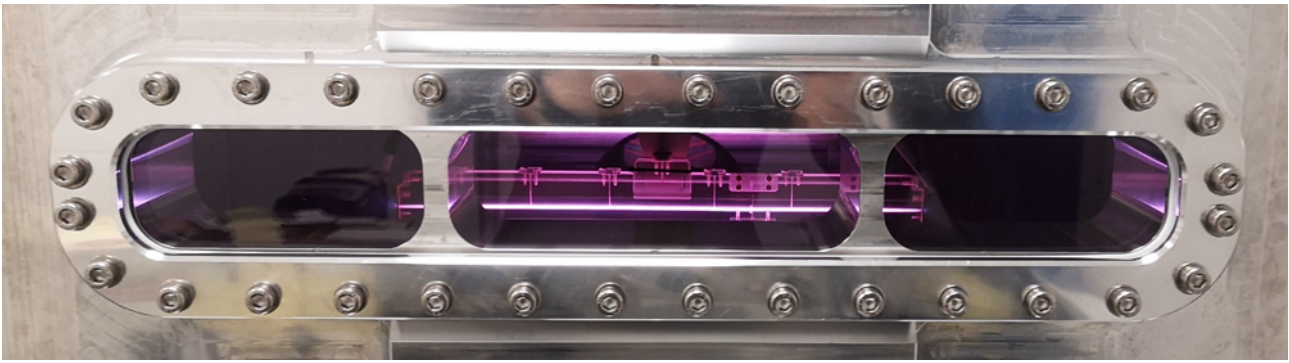


Figura 1: Scarica di plasma in un capillare per la *plasma acceleration* a Frascati.

realmente elementari (i protoni sono particelle complesse) e dunque di permettere lo studio di fenomeni più puliti, più semplici da descrivere teoricamente. D'altra parte, però, gli elettroni, curvando, tendono a perdere una grande quantità di energia a causa della emissione della cosiddetta radiazione di sincrotrone; la perdita di energia risulta essere proporzionale all'inverso della quarta potenza della massa della particella emittente e dunque i protoni (la cui massa è circa 2000 volte maggiore di quella dell'elettrone) sono preferibili quando si cerca di raggiungere le più alte energie di collisione.

Da qualche tempo è in corso un grande sforzo di ricerca e sviluppo per la realizzazione del primo collider che faccia uso di fasci di muoni, i fratelli più pesanti degli elettroni. Un simile *collider* avrebbe il vantaggio di produrre interazioni pulite tra particelle elementari come gli elettroni, sopprimendo drasticamente le perdite di energia dovute alla emissione di radiazione di sincrotrone, consentendo perciò un uso estremamente più efficiente delle cavità a radiofrequenza e la costruzione di un acceleratore più compatto e con consumi sostanzialmente ridotti a parità di energia nel centro di massa [5]. Sfortunatamente esiste una serie di problemi tecnici la cui soluzione non è stata ancora trovata. Innanzi tutto i muoni sono particelle instabili e perciò i fasci hanno vita media relativamente breve, e soprattutto producono intense quantità di radiazione lungo l'intero perimetro della macchina. Per quanto a prima vista paradossale, la radiazione di neutrini rappresenta un problema di sicurezza non trascurabile. Infatti l'ammontare di neutrini prodotti e le loro caratteristiche di collimazione possono produrre attivazione dei materiali nelle zone pubbliche vicine alla macchina ben oltre i

limiti consentiti dalle vigenti leggi in materia. In secondo luogo lo spettro di produzione dei muoni, ottenuto dal decadimento di pioni secondari in interazioni protone-bersaglio fisso, è piuttosto ampio e questo comporta una grande difficoltà a produrre fasci con una emittanza tale da consentire la massimizzazione della luminosità della macchina.

Nonostante queste difficoltà, al CERN si sta progettando la costruzione di un dimostratore di *muon collider*, con la speranza di poter realizzare il vero collisore nella seconda metà del secolo.

Quale che sia la macchina del futuro, la sua progettazione dovrà tener conto della sua sostenibilità ambientale e della ottimizzazione dei consumi energetici. Per avere un'idea dell'entità del problema possiamo ricordare che LHC consuma 700 GWh/anno, il consumo energetico di una città di medie dimensioni. Le richieste di Fcc, con le tecnologie all'attuale stato dell'arte, sarebbero un ordine di grandezza superiori. Metodi per mitigare questi consumi vanno dall'uso di tecnologie più efficienti energeticamente (risonatori a basse perdite, magneti permanenti, sistemi criogenici ad alta efficienza) a soluzioni più innovative, come per esempio l'uso di Linac a recupero energetico, che si basano sulla riutilizzazione della potenza del fascio, decelerandolo nelle stesse strutture RF che lo hanno accelerato. In generale il cosiddetto "*carbon footprint*" dei nuovi acceleratori è oggetto centrale di studio ed è parte integrante della loro progettazione.

La comunità dei fisici delle particelle elementari si trova ad affrontare un momento storicamente molto particolare e complesso. Da una parte le principali questioni teoriche in discussione spingono verso la sperimentazione a scale di energia sempre più elevate. Dall'altra, per riu-

scire a raggiungere queste energie c'è necessità di cambiare drasticamente le nostre tecniche di accelerazione, perchè quelle attualmente in uso sono o insufficienti o economicamente insostenibili. È dunque un momento di grande incertezza ma anche di grandi potenzialità di scoperta.



- [1] C. Adolphsen et al.: *European Strategy for Particle Physics – Accelerator R&D Roadmap*, CERN Yellow Rep. Monogr., 1 (2022) 1. eprint arXiv = 2201.07895
- [2] O. Bruning, L. Rossi: *The High Luminosity Large Hadron Collider*, Advanced Series on Directions in High Energy Physics, 24, World Scientific (Singapore). 2015
- [3] A. Abada et al.: *FCC-hh: the Hadron Collider*, Eur. Phys. J. Spec. Top., 228 (2019) 755.
- [4] W. Assmann et al.: *EuPRAXIA Conceptual Design Report*, Eur. Phys. J. Spec. Top., 229 (2020) 3675.
- [5] D. Schulte: *The Muon Collider*, JACoW, IPAC2022 (2022) 821.



Fabio Bossi: è Dirigente di Ricerca dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. La sua attività scientifica è da sempre focalizzata allo studio della fisica delle particelle elementari con acceleratori ed è stata svolta al CERN di Ginevra e presso i Laboratori Nazionali di Frascati. All'interno dell'INFN ha ricoperto vari ruoli dirigenziali, tra i quali la direzione della Sezione di Lecce e attualmente quella dei Laboratori Nazionali di Frascati.